

可搬运锶光钟宽带调谐亚赫兹超稳钟激光系统

孔德欢¹, 闫俊佺¹, 郭峰²

(1. 山西工程科技职业大学 信息工程学院, 山西 太原 030000;
2. 中国科学院国家授时中心 时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600)

摘要: 针对可搬运锶光钟的应用需求, 研制了一种面向可搬运锶光钟应用的 698 nm 窄线宽激光系统。系统基于腔长 10 cm 的橄榄球型超低膨胀系数(Ultra-Low Expansion, ULE)光学参考腔, 采用三柱刚性支撑结构和双层控温真空室设计, 在保证性能的同时显著提升可搬运性。结合 GHz 带宽偏频 PDH(Pound-Drever-Hall)锁频技术, 实现了宽带频率调谐的激光输出, 并获得了线宽小于 1 Hz、秒稳定度 1.3×10^{-15} 的钟激光。实验表明, 该系统成功探测到锶原子钟跃迁简并谱, 线宽 6.1 Hz, 满足光钟闭环锁定要求, 为可搬运光钟工程化提供了关键技术支撑。

关键词: 光频标准; 钟跃迁; 线宽; 偏频锁定; 频率稳定度

中图分类号: TN249 文献标志码: A 文章编号: 0253-2395(2026)01-0143-07

Broadband Tunable Sub-hertz Ultra-stable Clock Laser for Transportable Strontium Optical Clocks

KONG Dehuan¹, YAN Junya¹, GUO Feng²

(1. College of Information Engineering, Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Taiyuan 030000, China;
2. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards of Chinese Academy of Sciences, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

Abstract: As the core component of transportable strontium optical clocks, ultra-stable clock lasers directly determine the precision of clock transition spectroscopy through their linewidth and frequency stability. To address the application requirements of transportable strontium optical clocks, a 698 nm narrow-linewidth laser system has been developed. The system employs an oval-shaped ultra-low expansion (ULE) optical reference cavity with a 10 cm cavity length, integrated with a three-post rigid support structure and a dual-layer temperature-stabilized vacuum chamber. This design ensures high performance while significantly enhancing transportability. By implementing GHz-bandwidth offset Pound-Drever-Hall (PDH) locking technology, the system achieves broadband tunable laser output with a linewidth of less than 1 Hz (Lorentzian-fit) and a fractional frequency stability of 1.3×10^{-15} at 1 s. Experimental results demonstrate successful detection of degenerate spectra from the strontium atomic clock transition, yielding a transition linewidth of 6.1 Hz. This performance meets the closed-loop locking criteria for optical clocks, providing critical technical support for the engineering of transportable optical frequency standards.

Key words: optical frequency standards; clock transition; linewidth; offset PDH locking; frequency stability

收稿日期: 2025-08-01; 修回日期: 2025-09-19

基金项目: 山西省高层次人才引进项目(RCK202401-1)

作者简介: 孔德欢(1988-), 女, 山西临汾人, 博士, 讲师, 研究方向为原子光钟。E-mail: kong_dehuan@126.com

引文格式: 孔德欢, 闫俊佺, 郭峰. 可搬运锶光钟宽带调谐亚赫兹超稳钟激光系统[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2026, 49(1): 143-149. DOI: 10.13451/j.sxu.ns.2025102.

0 引言

光学原子钟作为下一代时间频率基准,其精度已达 10^{-18} 量级^[1-4],在深空导航、大地测量等领域具有变革性潜力^[5-8]。作为原子钟跃迁的探测光,钟激光的频率稳定性直接决定光钟性能极限^[9-10]。以锶原子(^{87}Sr)光钟为例,其钟跃迁($^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$)的自然线宽仅约为1.3 mHz^[11],698 nm探测光的线宽须接近mHz量级,同时满足长期漂移率小于1 Hz/s的闭环锁定要求^[12]。

实验上一般采用高精度度法布里-珀罗腔作为参考,利用Pound-Drever-Hall(PDH)锁频方法对钟激光进行线宽压窄和频率稳定^[13-15]。2007年,美国国家标准与技术研究院(NIST)团队基于腔长为7 cm的橄榄球型竖直参考腔研制了698 nm激光器,激光线宽达到亚赫兹量级,秒稳定度为 1×10^{-15} ,并获得了线宽为2 Hz的钟跃迁谱线^[16]。2012年,Kessler等采用腔长为21 cm单晶硅竖直参考腔研制了波长为1 500 nm超稳激光器,实现了线宽小于40 mHz和 1×10^{-16} 的短期稳定度^[17]。2016年,欧盟“空间光钟项目”中,Świerad团队利用腔长为10 cm的圆柱型竖直参考腔开发了超稳钟激光系统,光学参考腔的腔长为10 cm,真空系统体积为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$,输出激光的秒稳定度为 2.5×10^{-15} ^[18]。2025年,柴渊等研制了一套用于在镱离子光钟的双波长超稳激光系统(871 nm/435.5 nm),871 nm激光锁定于腔长为20 cm的切槽型圆柱型腔,输出激光线宽约0.3 Hz,秒稳定度达 4×10^{-16} ^[19]。

现有超稳钟激光器在固定实验室环境虽已实现亚赫兹线宽,但是搬运情况下^[20-22],振动敏感度限制导致腔长抖动以致线宽变差,热控精度不足引发频率漂移,光学器件(如声光调制器、光纤等)的不稳定性导致频率调谐灵活性缺失。这些问题导致可搬运光钟受限于钟跃迁探测分辨率不足与野外环境适应性弱的矛盾。

本文系统报道了用于锶光钟的可搬运宽带调谐超稳钟激光系统的研制工作:首先构建包含真空控温与主动隔振的光源实验装置;继而通过GHz带宽偏频PDH锁频技术实现激光稳定锁定和频率连续调谐;然后进行线宽、稳定

度测试及锶光钟验证,最终成功观测到钟跃迁简并谱,证实系统满足光钟闭环运行需求。

1 钟激光光源的实验装置

在腔体选型方面,橄榄球型或圆柱型竖直腔相比同尺寸球型腔和立方体腔具有显著的空间优势^[23-25]。更重要的是其独特的力学特性:当支撑点位于腔体中部时,外力作用将导致腔体两端面产生同向位移,从而使参考腔腔长保持稳定^[14]。基于性能指标、工程成本及系统体积的综合考量,钟激光选用刚性固定的10 cm橄榄球型超低膨胀系数玻璃(Ultra-Low Expansion Glass, ULE)腔作为频率参考。

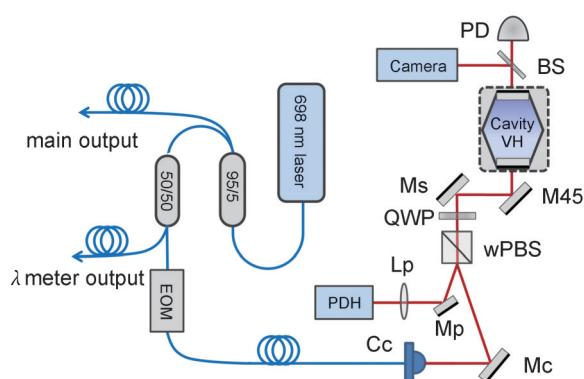
该腔体采用ULE制造,配置单片平面镜与单片平凹镜(曲率半径50 cm),构成10 cm腔长光学谐振结构,精细度达 2×10^5 。腔镜选用熔融石英材料以降低热噪声影响。腔体沿重力方向安装,通过三柱钛合金刚性支撑架构实现 $7.0 \times 10^{-11}/\text{g}$ 的垂直加速度敏感度^[16],在保障机械稳定性的同时满足可搬运需求。

为确保法布里-珀罗腔的腔长稳定性,该橄榄球型光学参考腔被集成于精密控温、高真空度的双层铝制真空室(ATF 6030)内。采用高精度控制器(Wavelength Electronics, LFI-3751)对内层腔体实施闭环温度调节,将ULE腔稳定在零膨胀温度点(35°C)附近,外层壳体作为热屏蔽层,使温度漂移小于 $5 \text{ mK}/^\circ\text{C}$ 。通过10 L/s抽速离子泵建立 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 极限真空环境,进一步降低气体分子热传导效应。

图1展示了锶光钟激光系统的光路图。波长为698 nm的激光器(TOPTICA DL Pro)通过光纤输出。该光纤输出光束首先经过一个95:5光纤分束器,其中95%的光用于原子钟跃迁谱线的探测。剩余的5%的光则继续通过一个50:50光纤分束器分成两部分:一部分(2.5%)用于波长监测,另一部分(2.5%)则进入光纤波导电光相位调制器(Electro-optic Modulator, EOM;型号为JENOPTIK PM705)进行调制。

经光纤EOM调制后的光由准直器输出。调节准直器的透镜,使激光光束的腰斑大小与置于真空室内光学参考腔的TEM₀₀基模腰斑

匹配。光束通过镀增透膜(针对 698 nm 设计)的真空室窗口后,由 45° 反射镜(45-degree Mirror, M45)垂直导入竖直腔体。水平偏振光从准直器输出,经沃拉斯顿棱镜导向参考腔。光在腔内往返两次通过四分之一波片,导致腔反射光的偏振方向旋转 90° 变为竖直偏振,并与入射光产生空间夹角分离。此竖直偏振的反射信号被反射镜(Mp)导向到探测器(Pound-Drever-Hall Detector)进行稳频误差信号的提取。



EOM: electro-optic modulator; Cc: collimator; wPBS: Wollaston polarizing beam splitter; Mc, Mp, Ms: mirror; Lp: lens; M45: 45-degree mirror; QWP: quarter-wave plate; BS: beam splitter; PD: photodetector; PDH: Pound-Drever-Hall detector.

图1 钟激光系统的光路图

Fig. 1 Optical layout of the clock laser system

参考腔的透射信号由分束镜分成两路:一路输入相机用于实时监测透射光斑模式(确保激光锁定于腔基模),另一路输入光电探测器(Photodetector, PD),其信号接入示波器用于实时监测激光与腔的模式匹配效率。

整个光路系统安装在一块尺寸为 61 cm × 43 cm × 50 cm 的铝制面板上。该面板固定在主动隔震平台(HERZAN TS-150)上,平台可主动抑制 0.7 Hz 至 1 kHz 范围内的振动,有效降低环境影响。系统整体置于隔震箱内以增强稳定性。

由于初始真空度差且不满足离子泵启动条件,实验首先使用复合分子泵对真空室抽气 2~3 天。为加速除气、更快提升真空度,在此期间将真空室升温至 70 °C 进行烘烤。当真空度达到 10⁻⁵ Pa 量级时,缓慢降温至零漂点 35 °C,随后开启离子泵维持高真空并关闭角阀。此后,真空室的高真空环境由离子泵独立维持。

2 钟激光的锁定

当激光与橄榄球型腔模式匹配后,实验采用 PDH 技术将激光频率锁定于参考腔^[26]。基于现场可编程逻辑门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)的高速数字激光伺服/锁频单元(Laser Servo and Offset Lock, LSOL)为光纤 EOM 提供相位调制射频信号。腔反射光通过由沃拉斯顿棱镜和四分之一波片构成的光学循环器实现空间分离并导入探测器。探测器输出信号返回 LSOL 单元进行解调,生成 PDH 误差信号,进而对激光二极管的注入电流和压电陶瓷(Lead Zirconate Titanate, PZT)施加双重 PID 控制。

然而,由于参考腔的自由光谱区(Free Spectral Range, FSR)为 1.5 GHz,采用常规 PDH 方法(载波直接锁定)限制了激光频率连续调谐能力。为此,实验中通常需引入多个声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM)进行频率偏置,以使激光频率匹配原子钟跃迁线。这会显著增加系统的光学复杂性和热负载。此外,AOM 典型工作带宽仅 ±20 MHz,难以补偿参考腔长期线性漂移导致的频率偏移量(极易超出此带宽),因此一般需重新调节锁定状态。

为克服上述限制并实现激光频率连续调谐,实验采用了基于宽带光纤波导电光相位调制器(工作带宽大于 GHz)的偏频 PDH 锁定技术(简称偏频锁定)^[27]。实验中利用功率合束器将大频率偏射信号 ν_{offset} 与小频率 PDH 调制信号 ν_{PDH} 叠加后驱动光纤 EOM, ν_{offset} 和 ν_{PDH} 的频率与幅度均可独立控制。图 2 对比了传统 PDH 与偏频锁定的误差信号。与传统方法(仅载波 ν_c 处有误差信号)不同,偏频锁定在载波 ν_c 和边带 ν_{\pm} 处均产生误差信号。因此,实验可灵活选择将载波或目标边带锁定于腔模上。选择边带锁定时,通过调节 ν_{offset} 即可连续改变钟激光输出频率,实现钟跃迁谱线的快速探测。此外,光纤 EOM 的工作范围(可达 10 GHz 以上)足以长时间补偿参考腔的线性漂移。

偏频锁定能够满足不同频率锁定需求。若所需激光载波频率 J_0 低于腔模频率,则选择正边带(一阶 J_{+1} 或者二阶 J_{+2})进行锁定。若所需激光载波频率 J_0 高于腔模频率,则选择负边带

(一阶 J_{-1} 或者二阶 J_{-2}) 进行锁定。

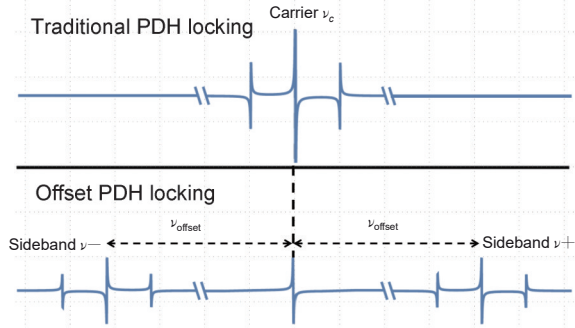


图2 传统的PDH锁频和偏频锁定的误差信号示意图
Fig. 2 The error signals for traditional PDH locking and offset PDH locking

系统 LSOL 输出的最大偏频信号频率为 400 MHz, 限制了锁定于边带时载波的连续调谐范围。锁定于 $J_{\pm 1}$ 时, 载波连续调谐范围限制为 30 MHz~350 MHz。设置 0 MHz~30 MHz 死区是为了避免偏频信号 ν_{offset} 与 PDH 调制信号 ν_{PDH} 频率过近导致误差信号提取失败。锁定于 $J_{\pm 2}$ 时, 载波调谐范围扩大至 350 MHz~800 MHz。引入一个 AOM 可消除上述死区限制, 同时该 AOM 兼具光学开关功能, 用于控制原子钟跃迁探测的光束通断。通过协同选择参考腔不同纵模、 ν_{offset} 频率以及不同阶次边带 (J_{+1} 、 J_{+2} 、 J_{-1} 、 J_{-2}), 可实现钟激光频率的大范围连续调谐。其最终调谐范围仅受限于激光器自身连续无跳模扫描范围(典型值约 20 GHz)。

为确保实现并稳定维持精确的频率锁定, 实验上依赖于 LSOL 的自动锁定功能。通过调节 PZT 偏置电压扫描激光频率, 同步监测参考腔透射信号; 当相机实时观测到稳定明亮、轮廓清晰的 TEM₀₀ 基模光斑且示波器同步显示显著透射峰时(判定激光频率已扫描至腔基模谐振点且模式匹配良好), 在 LSOL 界面设定比例-积分-微分(PID)控制参数并触发自动锁定; LSOL 随即基于 PDH 误差信号, 通过电流反馈与 PZT 反馈的双重闭环控制, 将激光频率精确稳定地锁定于参考腔目标共振模, 同时实时补偿环境扰动导致的频率漂移。

3 钟激光的测试及应用

完成 698 nm 钟激光向超稳腔的锁定后, 实

验上对输出激光的关键性能进行了详细评估。

为了评估锁定后的激光线宽和稳定性, 将该激光器的输出光与本地的另外一台独立的 698 nm 参考窄线宽稳频钟激光输出光进行拍频。这台本地参考激光锁定在一个腔长为 10 cm、精细度高达 4×10^5 的 ULE 参考腔上, 其锁定后的激光线宽经测量约为 1 Hz^[28]。两束激光的拍频信号由一台高响应速度探测器 (Menlo Systems FPD310-FV, 带宽 1 GHz) 接收, 随后输入至频谱分析仪 (Keysight N9030 A)。将频谱分析仪的分辨率带宽设置为非常精细的 1 Hz, 以获取高分辨率的拍频谱^[29]。图 3 展示了拍频信号的典型频谱图样, 对数据进行洛伦兹线型拟合后, 得到的线宽(半高全宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM)) 约为 1.2 Hz。参考激光器与钟激光器完全独立, 无共同噪声源, 其频率噪声为非相干噪声。根据噪声功率叠加原理, 拍频信号的线宽满足以下关系 $\Delta f_{\text{beat}}^2 = \Delta f_1^2 + \Delta f_2^2$, 已知参考激光线宽 $\Delta f_1 = 1$ Hz, 拍频信号的实测半高全宽 $\Delta f_{\text{beat}} = 1.2$ Hz, 根据公式可以计算出 $\Delta f_2 < 1$ Hz, 即被测锁定于超稳腔的钟激光线宽优于 1 Hz 水平。

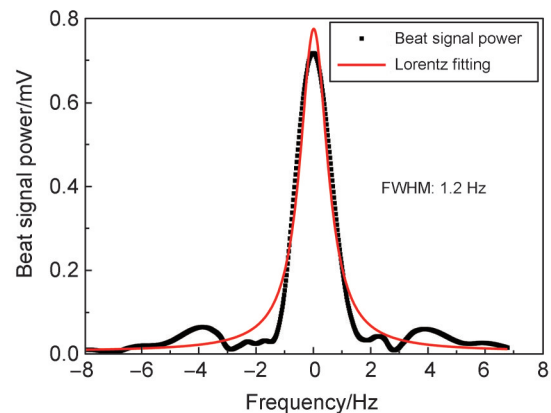


图3 激光线宽的测量结果

Fig. 3 Measurement results of laser linewidth

进一步使用频率计数器长时间记录两台激光拍频信号的瞬时频率变化, 以此评估窄线宽激光源的频率稳定性。在分析数据时, 预先去除了系统中存在的线性频率漂移成分。频率稳定度的评估结果以阿伦方差的形式呈现于图 4 中。数据显示, 该激光在 1 秒积分时间尺度上的频率稳定度为 1.3×10^{-15} 。

此外, 实验中还观测了参考腔温度控制的

动态过程及其对锁定激光频率长期漂移的影响。当首次将参考腔的控制温度设定在 35 °C 时,腔体的实际温度需要经过较长的弛豫时间才能达到最终的平衡态。观测发现,在此热稳定化过程中,激光频率(相对于某个固定参考)的漂移速率呈现出明显的指数衰减特性。

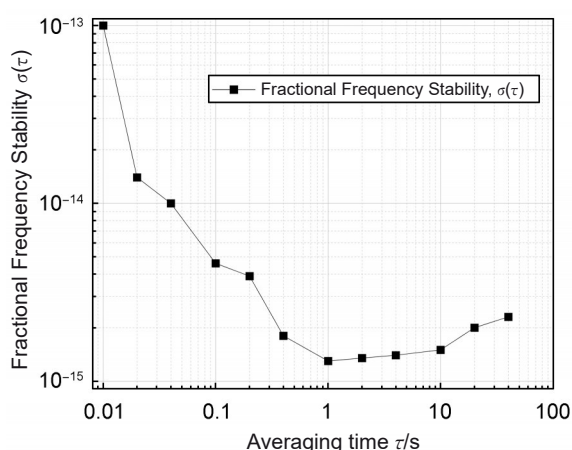


图4 激光频率稳定度的测量结果

Fig. 4 Measurement results of laser frequency stability

当经过充分长时间控温后,重新将钟激光锁定到原子钟跃迁谱线上,并对此时的激光频率进行了长时间监测。测量数据如图5黑点所示,可以看出频率漂移整体呈线性趋势,线性拟合得出频率漂移率约为 -0.3 Hz/s (红色拟合线),即日漂移量约为 -25.9 kHz/day 。频率的线性漂移主要来源于材料的缓慢应力释放。对于铯光钟的闭环锁定而言,这一漂移量远小于 GHz 量级的宽带偏频锁定范围,能够通过原子信号反馈闭环予以有效补偿,因此不会限制光钟的正常运行。另一方面,漂移的可预测性有利于在长期实验中采用软件或外部频率偏置方式进行补偿。

实验上首先将此可搬运 698 nm 钟激光系统用于可搬运铯原子 (^{87}Sr) 光钟跃迁线的谱线探测,探测时间 230 ms 时,洛伦兹拟合的自旋极化谱谱线宽带约为 4.8 Hz,接近傅立叶极限 3.9 Hz^[30]。然后将其搬运至空间铯光钟原理样机所在实验室,利用锁定后激光对原理样机中所俘获的铯原子进行探测,探测时间 180 ms 时简并谱的测试结果如图6所示。实验测得光谱信号经洛伦兹函数拟合后,线宽为 6.1 Hz。当前线宽特性满足光钟闭环稳定运行的要求^[31],为

开展超窄线宽原子钟跃迁光谱探测及光钟闭环关键实验提供了高稳定光学频率基准。

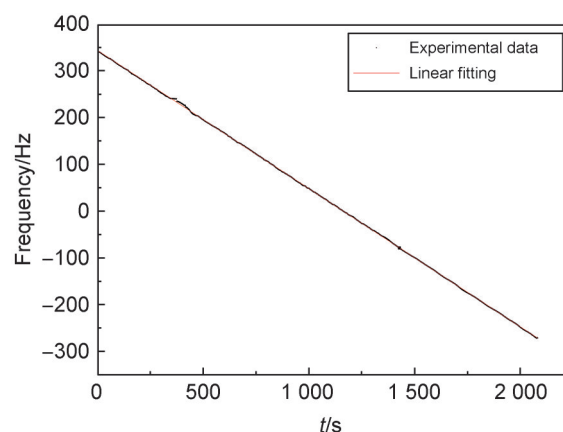


图5 超稳腔温度稳定后的频率漂移

Fig. 5 Long term frequency drift of the cavity after temperature stabilization

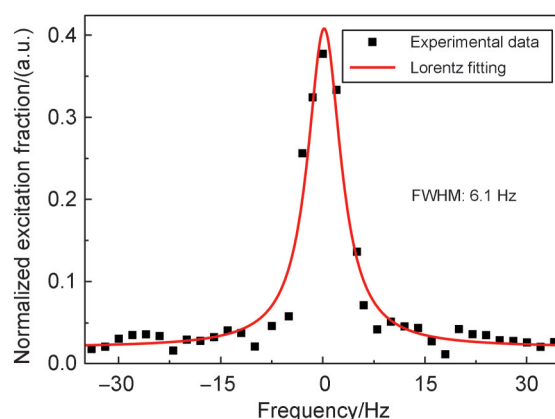


图6 铯光钟简并谱的测量结果

Fig. 6 The measured degenerate spectrum of the strontium optical clock

4 结论

本文研制了适用于可搬运铯光钟的 698 nm 钟激光光源。采用腔长 10 cm 的橄榄球型竖直 ULE 参考腔,结合偏频锁频技术,实现了激光线宽优于 1 Hz、秒稳定度为 1.3×10^{-15} ,温度稳定后频率漂移率约 -0.3 Hz/s ,输出激光 GHz 级宽带调谐。系统集成于 $61 \text{ cm} \times 43 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 面板,通过光纤与光钟系统链接,具备可搬运性。将其应用于铯光钟简并谱探测,获得线宽约 6.1 Hz 的跃迁谱线,满足闭环锁定要求。可搬运宽带调谐亚赫兹超稳钟激光系统的研制,为可搬运光钟及其空间光钟的工程化奠定了重要技术基础。

参考文献:

- [1] HINKLEY N, SHERMAN J A, PHILLIPS N B, *et al.* An Atomic Clock with 10^{-18} Instability[J]. *Science*, 2013, **341**(6151): 1215–1218. DOI: 10.1126/science.1240420.
- [2] 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]. *Nat Photonics*, 2019, **13**(10): 714–719. DOI:10.1038/s41566-019-0493-4.
- [3] AEPPLI A, KIM K, WARFIELD W, *et al.* Clock with 8×10^{-19} Systematic Uncertainty [J]. *Phys Rev Lett*, 2024, **133**(2): 023401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.133.023401.
- [4] TAKAMOTO M, USHIJIMA I, OHMAE N, *et al.* Test of General Relativity by a Pair of Transportable Optical Lattice Clocks[J]. *Nat Photonics*, 2020, **14**(7): 411–415. DOI: 10.1038/s41566-020-0619-8.
- [5] 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]. *Phys Rev A*, 2018, **98**(5): 053443. DOI: 10.1103/physreva.98.053443.
- [6] DENKER H, TIMMEN L, VOIGT C, *et al.* Geodetic Methods to Determine the Relativistic Redshift at the Level of 10^{-18} in the Context of International Timescales: A Review and Practical Results[J]. *J Geod*, 2018, **92**(5): 487–516. DOI: 10.1007/s00190-017-1075-1.
- [7] 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. DOI: 10.1038/s41586-018-0738-2.
- [8] KOLKOWITZ S, PIKOVSKI I, LANGELLIER N, *et al.* Gravitational Wave Detection with Optical Lattice Atomic Clocks[J]. *Phys Rev D*, 2016, **94**(12): 124043. DOI: 10.1103/physrevd.94.124043.
- [9] LUDLOW A D, BOYD M M, Ye J, *et al.* Optical Atomic Clocks[J]. *Rev Mod Phys*, 2015, **87**(2): 637–701. DOI: 10.1103/RevModPhys.87.637.
- [10] KHABAROVA K, KRYUCHKOV D, BORISENKO A, *et al.* Toward a New Generation of Compact Transportable Yb⁺ Optical Clocks[J]. *Symmetry*, 2022, **14**(10): 2213. DOI: 10.3390/sym14102213.
- [11] MUNIZ J A, YOUNG D J, CLINE J R K, *et al.* Cavity-QED Measurements of the ⁸⁷Sr Millihertz Optical Clock Transition and Determination of Its Natural Linewidth [J]. *Phys Rev Research*, 2021, **3**(2): 023152. DOI: 10.1103/physrevresearch.3.023152.
- [12] NICHOLSON T L, CAMPBELL S L, HUTSON R B, *et al.* Systematic Evaluation of an Atomic Clock at 2×10^{-18} Total Uncertainty[J]. *Nat Commun*, 2015, **6**: 6896. DOI: 10.1038/ncomms7896.
- [13] 林弋戈, 方占军. 镱原子光晶格钟[J]. 物理学报, 2018, **67**(16): 124–144. DOI:10.7498/aps.67.20181097.
- LIN Y G, FANG Z J. Strontium Optical Lattice Clock [J]. *Acta Phys Sin*, 2018, **67**(16): 124–144. DOI: 10.7498/aps.67.20181097.
- [14] 蒋燕义. 超窄线宽激光及其在光钟中的应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
- JIANG Y Y. Narrow Linewidth Lasers: Application to Optical Clocks[D]. Shanghai: East China Normal University, 2012.
- [15] HÄFNER S, FALKE S, GREBING C, *et al.* 8×10^{-17} Fractional Laser Frequency Instability with a Long Room-temperature Cavity[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(9): 2112–2115. DOI: 10.1364/OL.40.002112.
- [16] LUDLOW A D, HUANG X, NOTCUTT M, *et al.* Compact, Thermal-noise-limited Optical Cavity for Diode Laser Stabilization at 1×10^{-15} [J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(6): 641–643. DOI: 10.1364/ol.32.000641.
- [17] KESSLER T, HAGEMANN C, GREBING C, *et al.* A Sub-40-mHz-linewidth Laser Based on a Silicon Single-crystal Optical Cavity[J]. *Nat Photonics*, 2012, **6**(10): 687–692. DOI: 10.1038/nphoton.2012.217.
- [18] ŚWIERAD D, HÄFNER S, VOGT S, *et al.* Ultra-stable Clock Laser System Development Towards Space Applications[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 33973. DOI: 10.1038/srep33973.
- [19] 柴渊, 李焯, 王强, 等. 用于¹⁷¹Yb⁺钟跃迁探测的 10^{-16} 量级频率稳定度超稳激光系统[J]. 宇航计测技术, 2025, **45**(3): 6–11. DOI:10.12060/j.issn.1000-7202.2025.03.02.
- CHAI Y, LI Y, WANG Q, *et al.* An Ultra-stable Laser System with 10^{-16} Frequency Instability for ¹⁷¹Yb⁺ Clock Transition Detection[J]. *J Astronaut Metrol Meas*, 2025, **45**(3): 6–11. DOI:10.12060/j.issn.1000-7202.2025.03.02.
- [20] KOLLER S B, GROTTI J, VOGT S, *et al.* Transportable Optical Lattice Clock with 7×10^{-17} Uncertainty[J]. *Phys Rev Lett*, 2017, **118**(7): 073601. DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.073601.
- [21] MILLO J, MAGALHÃES D V, MANDACHE C, *et al.* Ultrastable Lasers Based on Vibration Insensitive Cavities[J]. *Phys Rev A*, 2009, **79**(5): 053829. DOI: 10.1103/physreva.79.053829.
- [22] NAZAROVA T, RIEHLE F, STERR U. Vibration-insensitive Reference Cavity for an Ultra-narrow-linewidth Laser[J]. *Appl Phys B*, 2006, **83**(4): 531–536. DOI: 10.1007/s00340-006-2225-y.
- [23] WEBSTER S, GILL P. Force-insensitive Optical Cavity [J]. *Opt Lett*, 2011, **36**(18): 3572–3574. DOI: 10.1364/

- ol.36.003572.
- [24] LEIBRANDT D R, BERGQUIST J C, ROSENBAND T. Cavity-stabilized Laser with Acceleration Sensitivity Below 10^{-12} g^{-1} [J]. *Phy. Rev.*, 2013, **87**(2): 023829. DOI:10.1103/PhysRevA.87.023829.
- [25] CHEN X T, JIANG Y Y, LI B, *et al.* Laser Frequency Instability of 6×10^{-16} Using 10-cm-long Cavities on a Cubic Spacer[J]. *Chin Opt Lett*, 2020, **18**(3): 030201. DOI: 10.3788/col202018.030201.
- [26] BLACK E D. An Introduction to Pound-Drever-Hall Laser Frequency Stabilization[J]. *Am J Phys*, 2001, **69**(1): 79–87. DOI: 10.1119/1.1286663.
- [27] THORPE J I, NUMATA K, LIVAS J. Laser Frequency Stabilization and Control through Offset Sideband Locking to Optical Cavities[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(20): 15980–15990. DOI: 10.1364/oe.16.015980.
- [28] WANG Y B, YIN M J, REN J, *et al.* Strontium Optical Lattice Clock at the National Time Service Center[J]. *Chin Phys B*, 2018, **27**(2): 023701. DOI: 10.1088/1674-1056/27/2/023701.
- [29] BERDASOV O I, YU GRIBOVA A, BELOTELOV G S, *et al.* Ultrastable Laser System for Spectroscopy of the $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_0$ Clock Transition in Sr Atoms[J]. *Quantum Electron*, 2017, **47**(5): 400–405. DOI: 10.1070/qel16346.
- [30] KONG D H, WANG Z H, GUO F, *et al.* A Transportable Optical Lattice Clock at the National Time Service Center[J]. *Chin Phys B*, 2020, **29**(7): 070602. DOI: 10.1088/1674-1056/ab9290.
- [31] POLI N, SCHIOPPO M, VOGT S, *et al.* A Transportable Strontium Optical Lattice Clock[J]. *Appl Phys B*, 2014, **117**(4): 1107–1116. DOI: 10.1007/s00340-014-5932-9.