用于$^{171}Yb^{+}$ E2跃迁的窄线宽激光系统的研制与评估

Yani Zuo、Shiying Cao、Shaoyang Dai、Yige Lin、Tao Yang、Baike Lin、Fei Meng、Weiliang Chen、Kun Liu、Fasong Zheng、Tianchu Li 和 Fang Fang

摘要—我们报告了用于探测囚禁在端盖阱中的镱离子在436纳米处E2钟跃迁的窄线宽激光系统的构建与表征。基频处的871纳米种子激光器以一台长10厘米的带缺口超低膨胀腔为参考。激光系统的输出通过相位噪声抵消光纤链路传输至窄线宽飞秒光纤频率梳；该频率梳以一台超稳698纳米激光器为参考。激光器与频率梳之间的拍频线宽低于1赫兹，稳定度优于2E- 15@ **1~100** s。我们还验证了自主研制的窄线宽掺铒光纤频率梳在871纳米处的波长扩展端口性能，该频率梳采用单点倍频技术。

索引词—光学时钟、窄线宽激光器、光学频率测量、镱-171、光学频率梳

I. 引言

随着光学频率梳和超稳激光器技术的发展，基于光晶格囚禁原子或囚禁离子的光学时钟，其不确定度已优于现行SI秒定义的实现方式——铯喷泉钟[1][2],，是单位重新定义[3]等计量学进展最有希望的候选方案。此外，小型化光学时钟可用于对相距遥远的地点进行计时学水准测量，并开展许多其他基础物理测试[4]。

在各种光学时钟方案中，镱离子光学时钟具有广阔的应用前景[5][6][7][8]。镱-171同位素离子有两个钟跃迁（E2和E3），已被接受为秒的次级表示。镱-171同位素离子的E3跃迁不易受外场扰动影响，具有显著的相对论效应，因此其线宽可达nHz量级。镱离子的原子质量较大，且冷却激光器的波长接近暗态氢化物分子离子的解离波长，因此镱离子能够长时间储存。此外，用于操控镱离子的激光器易于获得且相对稳定。这些优势使建立超低不确定度光学时钟、开展更高精度的测量成为可能。

本工作部分得到国家重点研发计划、国家质量基础设施项目（资助编号：2021YFF0603800）的支持，部分得到中国计量科学研究院基础研究经费（资助编号：AKYCX2206）的支持。（通信作者：Fang Fang）

腔稳窄线宽激光器[9][10] 是光学钟的本地振荡器，其线宽和频率稳定性直接影响光学钟的性能。此外，它们还有多种应用，例如光子学低相位噪声微波生成、引力波探测和超相干光谱学。

我们首先构建了以四极跃迁（E2）作为钟跃迁的Yb^{+}光学时钟，以验证该系统的可行性。值得注意的是，较短的寿命（53 ms）将限制E2跃迁镱离子光钟的最终性能，从而导致系统设计上的折中。镱离子光学钟系统包括光学系统、物理系统和数据采集系统。系统示意图如图1所示。

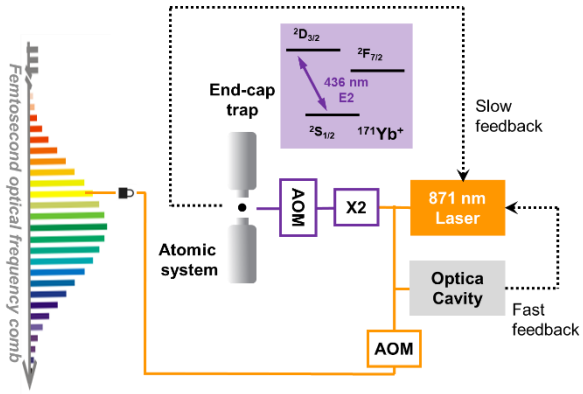


图1. $^{171}Yb^{+}$ E2光学时钟的方案示意图。

我们展示并表征了一套用于E2跃迁探询的871 nm激光系统，该工作遵循精密电磁测量会议（CPEM）会议论文[11]，其中我们主要展示了系统设计。二次谐波产生（SHG）之前，采用Pound-Drever-Hall（PDH）方法，将871 nm外腔二极管激光器（ECDL）的频率稳定至高精细度光学腔。本文在会议版本的基础上，进一步报告了该激光系统的表征结果。由于仅构建了一套871 nm激光系统，为了评估该激光系统的性能，我们对另一实验室的一套窄线宽光学频率梳进行了改造，以便

作者来自中国计量科学研究院（NIM）时间频率计量研究所，北京100029，中国（电子邮箱：zuoiyn@nim.ac.cn；fangf@nim.ac.cn）。

拍频测量。该频率梳以一套用于锶晶格钟的、由30厘米长光学腔稳频的698纳米激光器系统作为参考。

本研究还建立了两条相位噪声抵消光纤链路，用于将激光传输至参考腔和评估拍频模块，从而有效限制参考系统引入的额外频率噪声。采用单点倍频技术的窄线宽掺铒光纤频率梳的871纳米波长扩展端口已完成构建与验证。基于评估系统，本文展示了超稳激光系统的稳定性和线宽，满足当前E2 Yb^+ 光学时钟的要求。

II. 探测激光系统的搭建

随着探测激光器稳定性的提高，钟跃迁的最大激发概率和光学时钟的短期稳定度将显著改善。考虑到离子光钟的信噪比和E2跃迁的自然线宽，我们预计本地振荡器的短期稳定度将低于系统的量子投影噪声稳定度极限[13][14]。本文采用了10厘米腔方案，针对这一长度的腔频率稳定激光器已有许多研究[17]-[27]。

因此，采用了改进版的 10 cm 光学腔设计[11],，如图 2 所示。腔隔离块的直径为 5 cm，采用水平凹槽结构。光学腔由 4 个氟橡胶Viton垫直接支撑。通过有限元分析方法优化了光学腔的支撑位置。估计光学腔沿相关方向的加速度敏感度为 4E−10/g[15][16]。

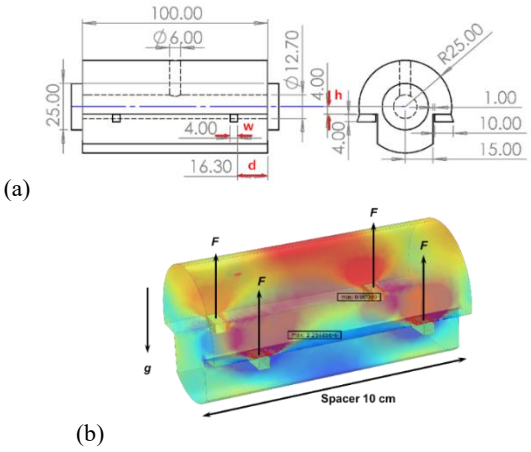


图 2. 光学腔示意图。(a) 显示光学腔由四个 Viton 垫支撑。尺寸单位为 mm。(b) 显示有限元分析（FEA）中加速度不敏感支撑位置处的腔隔离块位移。

如图3所示，带缺口的圆柱形光学腔置于真空腔中，可有效隔离环境干扰。腔隔离块由具有低膨胀系数的ULE玻璃制成。为控制真空腔的温度，设置了一层主动温度控制层并结合两层内部被动温度屏蔽层。一对高反射率平凹镜通过光学接触方式固定在ULE腔隔离块上。凹面镜的曲率半径为50 cm，腔镜采用熔融石英基底。据估计，该参考腔的热噪声极限约为5E-16[12]。真空腔采用20 l/s的离子泵，将压力维持在1E-5 Pa。为隔离环境振动的影响，真空腔置于主动隔振平台上。

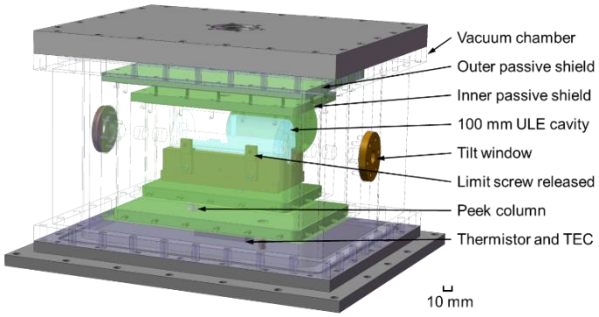


图 3. 安装在真空腔上的光学腔示意图。

光学腔稳频激光系统的光学布局图如图 4 所示。

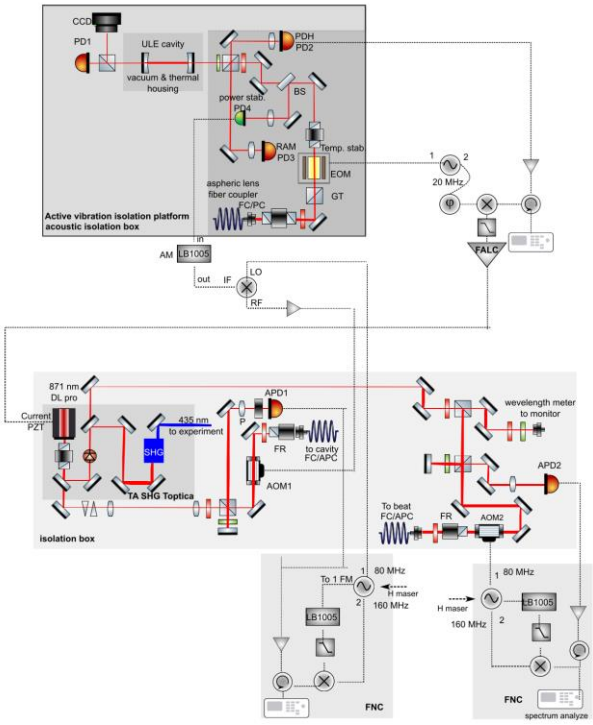


图 4. 腔稳定系统示意图。红线表示光信号，黑线表示电信号的传播路径。所有组件的高度均固定为 50 mm，以降低振动敏感性。深灰色模块表示放置在主动隔振平台上的光学平台。FR：法拉第旋转器；EOM：电光调制器；AOM：声光调制器；PD：光电探测器；APD：雪崩光电二极管；FNC：光纤噪声抵消；SMPM：单模保偏。

该激光器为商用外腔二极管激光器，871 nm 种子激光器发出的光经放大和倍频后得到 436纳米。激光通过一根 5 m 长的单模保偏（SMPM）光纤传输至自制声学隔离装置中的主动隔振平台（AVI-200）。这根光纤的输出端为平端面，因此有一小部分光会反射回来，用于光纤噪声抵消。此外，871 nm Toptica DL-Pro 外腔二极管激光器的激光头配有直流耦合（DC Mod.）电流调制端口，可用作高速反馈频率控制端口。

电光调制器的调制频率为 20 MHz。为进一步降低电光调制器中的残余幅度调制的影响，[28][29][30], 我们仔细调整了光的偏振和入射方向，并在电光调制器前后分别设置了 60 dB 和 35 dB 的隔离器。快速低噪声光电探测器检测误差信号，再对信号进行解调和低通滤波，得到频率鉴别信号。通过调节激光器电流和压电陶瓷来校正激光器频率。该系统的锁定带宽约为 1.5 MHz。为减少光束畸变并提高对准稳定性，我们将光学高度固定在光学平台表面上方 50 cm 处，并采用了多种自制支撑座，这些支撑座不含弹簧等柔性结构。通过光学腔衰荡法测得光学腔的精细度约为 200,000。

采用光纤噪声抵消（FNC）来抑制光纤传输光学平台至光学腔的光时引入的相位噪声。如图 5 所示，通过调节用于光纤噪声抵消的声光调制器（AOM）的驱动功率，稳定光学腔前偏振分束器（PBS）反射光的强度。

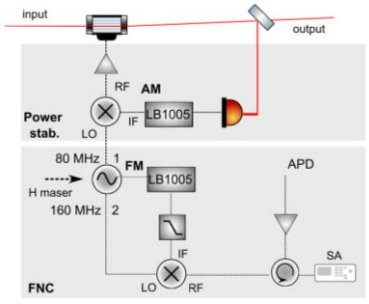


图5. 声光调制器多功能控制示意图。

光束在准直进入 SMPM 之前，由工作在 80 MHz 的 +1阶单程声光调制器进行移频。此后，声光调制器将在控制系统中发挥多功能作用，例如腔漂移补偿、光纤噪声抵消和功率稳定。

III. 激光系统的表征

由于仅搭建了一台 871 nm 激光器，为降低成本并快速评估，我们使用参考[32] 至30厘米长腔稳频698纳米激光系统的窄线宽光学频率梳进行拍频测量。由于698纳米激光器的稳定度处于 E-16[31], 拍频信号的稳定度反映了871 nm激光系统的稳定度。

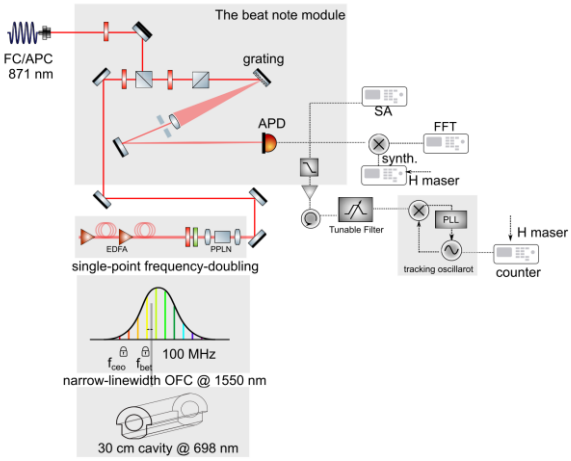


图6. 基于参考至30厘米长腔稳频698纳米激光系统的窄线宽光学频率梳（OFC）的拍频测量方案。

在这两个系统之间建立了一条长度约为 500 m 的光纤链路。通过单点倍频技术，光学频率梳可以将 698 nm 参考激光器的相干性忠实地传递到从可见光到红外光范围内的任意波长。871 nm 激光器经放大、单点倍频和滤波后，与频率梳的其中一个分支进行空间重合。外差拍频经下变频后由频率计数器测量。为抑制噪声并恢复信噪比（SNR），使用跟踪滤波器对拍频信号进行滤波。调节跟踪带宽以避免引入电子噪声。

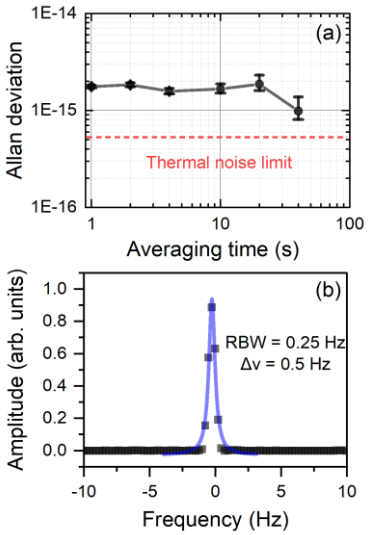


图7. 激光稳定性和线宽测量。（a）显示了腔稳定871 nm激光系统的阿伦偏差分数频率不稳定度及其计算得到的热噪声底。（b）显示了当分辨率带宽为0.25 Hz时，拍频信号的频谱达到亚赫兹水平。

拍频呈现约 2 Hz/s 的线性漂移。图 7 展示了去除该线性漂移后的 5 分钟拍频信号时间序列。计算并绘制了阿伦偏差，如图 7(a) 所示。外差拍频的频率不稳定度在约 1 s 时降至 1.4×10^{-15} 。目前，振动噪声和被动热腔的温度波动这两种噪声源限制了进一步降低激光器的不稳定度，使其无法达到 5×10^{-16} 的热噪声极限值。激光器与频率梳之间拍频信号的线宽为 0.5 Hz。

IV. 结论与讨论

我们研制了一台超稳 871 nm 激光器，其频率参考为在室温下运行的 10 cm 光学腔。腔稳 871 nm 激光器的频率不稳定度在约 1 s 时达到最低值 1.4E-15。测得腔稳激光器的线宽为 0.5 Hz。我们利用相位相干光纤链路实现了不同波长（698 nm、871 nm）之间的比较。这也验证了窄线宽光学频率梳在该波长下的测量能力。这些结果为正在进行的镱光离子钟项目奠定了基础。该评估系统可用于未来两项光学频率比测量结果的比较。该激光系统的性能足以作为 E2跃迁的探测激光器。未来将进一步改进腔温度控制，并优化抗振腔支撑结构。此外，不同频率之间更高精度的比较还应消除光学频率梳中涉及的分支间非共模噪声[33][34]。

参考文献

[1] Ludlow A D、Boyd M M、Ye J 等。光学原子钟[J]。《现代物理评论》，2015，87(2)：637。[2] Abdel-Hafiz M、Ablewski P、Al-Masoudi A 等。开发分数频率不确定度达10^{-18}的光学钟指南[J]。arXiv预印本 arXiv:1906.11495，2019。[3] Fang F、Zhang A、Lin Y 等。时间：基于常数重新定义秒——天文时与原子时[J]。《中国科学：物理学 力学 天文学》，2021，51(7)：074208。[4] Cao J、Zhang P、Shang J 等。一种紧凑、可运输的单离子光学钟，具有

7 8× 10− 17 [ ] 2017，系统不123 4 1 9

确定度 J。Applied Physics B，( )：-。[5] Tamm C、Weyers S、Lipphardt B 等。杂散场诱导的四极频移及688 THz的Y 171 b+ 单离子光学频率标准的绝对频率[J]。《物理评论A》，2009，80(4)：043403。[6] Khabarova K、Kryuchkov D、Borisenko A 等。迈向新一代紧凑型可运输 Yb+ 光学钟[J]。《Symmetry》，2022，14(10)：2213。[7] Stuhler J、Hafiz M A、Arar B 等。Opticlock：可运输且易于操作的单离子光学钟[J]。《Measurement: Sensors》，2021，18：100264。[8] Imai Y、Nishi T、Nishizaki M 等。171 Yb中2 S 1/2 (F= 0)–2 D 3/2 (F= 2)跃迁的单离子光谱系统+[J]。《Radio Science》，2016，51(8)：1385-1395。[9] Drever R W P、Hall J L、Kowalski F V 等。利用光学谐振腔稳定激光相位和频率[J]。Applied Physics B，1983，31(2)：97-105。[10] D. G. Matei、T. Legero、S. Häfner、C. Grebing、R. Weyrich、W. Zhang、L. Sonderhouse、J. M. Robinson、J. Ye、F. Riehle 和 U. Sterr，1。5 μ米激光器，线宽低于 10 mHz，Phys. Rev. Lett. 118，263202 (2017)

[11] Zuo Y、Dai S、Cao S 等。用于171Yb+ 光学钟的871纳米窄线宽激光器进展[C]//2022年精密电磁测量会议（CPEM）。IEEE，2022：1-3。[12] K. Numata、A. Kemery、J. Camp，Phys. Rev. Lett. 93，250602 (2004) [13] Peik E、Schneider T、Tamm C。单离子激光频率稳定[J]。《物理学杂志 B：原子、分子与光物理》，2005，39(1)：145。[14] Tamm C、Lipphardt B、Schnatz H 等。688 THz的171Yb+ 单离子光学频率标准[C]//2006年IEEE国际频率控制研讨会暨展览会。IEEE，2006：457-461。[15] Chen L、Hall J L、Ye J 等。法布里-珀罗腔的振动诱导弹性变形[J]。《物理评论A》，2006，74(5)：053801。[16] Tao Y、Wen-Bo L、Er-Jun Z 等。通过几何形状和结构支撑设计降低法布里-珀罗腔的振动敏感度[J]。《中国物理》，2007，16(5)：1374。[17] Millo J、Magalhães D V、Mandache C 等。基于振动不敏感腔的超稳激光器[J]。《物理评论A》，2009，79(5)：053829。[18] Amairi S、Legero T、Kessler T 等。降低热噪声对光学腔的影响[J]。Applied Physics B，2013，113(2)：233-242。[19] Tanja 10cmKeller J、Ignatovich S、Webster S A 等。用于1016水平激光稳定的简易振动不敏感腔[J]。Applied Physics B，2014，116(1)：203-210。[20] Häfner S、Herbers S、Vogt S 等。具有mod不稳定度的可运输探测激光系统σ y= 3× 10− 16[J]。《Optics Express》，2020，28(11)：16407-16416。[21] Wu L、Jiang Y、Ma C 等。1557 nm处线宽为0.26 Hz的超稳激光器[J]。《Scientific Reports》，2016，6(1)：1-5。[22] Yan C、Shi H、Yao Y 等。具有亚赫兹线宽和10 16频率不稳定度的自动化长时间频率稳定激光器[J]。《中国光学快报》，2022，20(7)：070201。[23]1Wang Z、Ye Y、Chang J 等。光学参考腔零热膨胀温度的单步测量[J]。《Optics Express》，2021，29(19)：30567-30578。[24]1Bian W、Huang Y、Guan H 等。用作40Ca+ 光学钟本地振荡器的1 Hz线宽Ti: sapphire激光器[J]。《Review of Scientific Instruments》，2016，87(6)：063121。[25] Shang J、Cao J、Cui K 等。用于小型化40Ca+ 光学钟的紧凑型亚赫兹线宽729 nm激光器[J]。《Optics Communications》，2017，382：410-414。[26] Tai Z Y、Yan L L、Zhang Y Y 等。线宽低于0.185 Hz的可运输1555 nm超稳激光器[J]。《中国物理快报》，2017，34(9)：090602。[27] Liu J、Liu T、Chen L 等。用于空间应用的紧凑型亚赫兹线宽法布里-珀罗腔频率稳定激光器[J]。《Optics & Laser Technology》，2021，136：106777。[28] Zhi Y、Chen L、Li L。利用块状电光晶体进行光学相位调制时残余振幅调制的非均匀空间分布[J]。《Optics Express》，2022，30(11)：17936-17945。[29] Lin Y、Wang Q、Meng F 等。一台

87 2 9× 10− Sr光晶17 [ ]

格钟，其不确定度为，并实现绝对频率测量 J。Metrologia，2021，58(3)：035010。[30] LI Ye、LIN Yige、WANG Qiang、YANG Tao、SUN Zhen、LU Bingkun、FANG Zhanjun。超稳激光技术及其在锶光晶格钟中的实现[J]。《计量科学与技术》，2021，65(5)：62-66。doi: 10.12338/j.issn.2096-9015.2020.9018[31] Lu B K、Sun Z、Yang T 等。NIM-Sr2黑体辐射和碰撞频移的改进评估，总不确定度为7.2×10-18[J]。《中国物理快报》，2022，39(8)：080601。[32] Cao S、Lin B、Han Y 等。基于掺铒光纤光频梳的698 nm至1542 nm窄线宽频率传递[J]。《Optics Communications》，2022，524：128792。[33] E. Benkler、B. Lipphardt、T. Puppe、R. Wilk、F. Rohde 和 U. Sterr，实现10-21水平光纤频梳光学频率传递的端到端拓扑，Opt. Express 27，36886 (2019)[34] Li P、Rolland A、Jiang J 等。利用带噪声抵消的多分支频梳实现稳定度达< 5 *10- 21的相干频率传递[J]。《Optics Express》，2022，30(13)：22957-22962。