

受散粒噪声限制的激光频率稳定技术使用高分辨率波长计

Mengde Gan,^{1,5} Haoyi Zhang,^{1,5} Xiaodong Tan,^{1,5} Jiaming Li,^{1,2,3,4,*} Le Luo^{1,2,3,4,*}

¹ School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai, Guangdong, China 519082

² Guangdong Provincial Key Laboratory of Quantum Metrology and Sensing & School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai, China 519082

³ Center of Quantum Information Technology, Shenzhen Research Institute of Sun Yat-sen University, Shenzhen, Guangdong, China 518087

⁴ State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou, China 510275

⁵ These authors contributed equally

*lijiam29@mail.sysu.edu.cn, luole5@mail.sysu.edu.cn

Abstract: 我们提出了一种紧凑的激光频率稳定方法，通过将 556 纳米激光锁定到高精度波长计来实现。与依赖光学腔或原子参考的传统方案不同，我们通过闭环环路反馈系统参照波长计来稳定激光频率。这种配置有效抑制了长期频率漂移，实现了达到波长计散粒噪声限制分辨率的频率稳定性。该系统能够在没有复杂光学组件的情况下实现亚百千赫兹的稳定性，使其适合紧凑或现场部署的应用。我们的结果显示，通过适当的反馈设计，基于波长计的锁定可以为需要长期频率稳定性的精密光实验提供一种实用且可扩展的解决方案。

© 2025 Optica Publishing Group

1. 介绍

激光频率稳定对于广泛的应用至关重要，包括高分辨率光谱学 [1–3]、冷原子和分子物理 [4,5]、量子信息和计算 [6,7]、光学干涉测量 [8–10] 和光学频率标准 [11–13]。随着实验要求的不断提高——特别是在超冷原子物理和量子计量学领域——对结合亚兆赫兹精度、长期可靠性和操作简易性的稳定系统的需求日益增加。

在众多可用的稳定技术中，基于波长计 (WM) 的频率稳定因其独特的灵活性、紧凑性以及集成简便 [14,15] 而越来越受到关注。与依赖高精度光学腔或原子/分子参考的其他典型方法不同，基于 WM 的稳定性提供了绝对、宽带频率读取，并且硬件复杂度极低 [16,17]。这使得它特别适合多激光设置、可现场部署系统以及需要灵活重新配置或紧凑结构的实验。

值得注意的是，在现代光纤和固态激光器出现后，基于 WM 稳定性的优势变得更加明显。这些激光器通常直接显示出亚 100 千赫兹线宽。在这种情况下，额外的高频线宽变窄往往不再必要，技术重点转向了稳定和准确的频率参考。这一趋势强

化了基于 WM 稳定的关联性和实用性作为成本效益和可扩展解决方案用于当代精密应用。

然而，尽管它具有吸引力，基于 WM 的稳定性在频率稳定性方面存在固有限制，特别是在短时间尺度和严格的精度要求下 [18,19]。商用系统通常在几秒到几分钟的时间尺度上实现约 10^{-10} 的分数频率稳定性 [20–22]。这种性能对于激光冷却窄间隔线组合或超稳定格点钟的操作等应用是不够的，在这些应用中，通常需要绝对频率波动在几千赫兹水平以内 [23,24]。

限制基于 WM 频率稳定性能的主要因素是光子散粒噪声和缓慢的热漂移。基于 Fizeau 或 Michelson 干涉仪的系统，波长从 CCD 或 CMOS 传感器记录的干扰条纹的空间位置和对比度确定 [25]。散粒噪声在检测信号中引入统计波动，导致一个内在的测量不确定性，该不确定性按 $\delta f \propto \sqrt{N}$ [26] 的方式缩放，其中 N 是检测到的光子数量。这设定了短期频率精度的一个极限，即使在没有其他技术噪声的情况下也是如此。此外，由于光学元件热膨胀引起的干涉仪结构中的热漂移导致测量波长缓慢波动，这是实际实施中长期不稳定性和准确性的主要来源之一。在这项工作中，我们演示了使用商用高分辨率 WM 和窄线宽 556 nm 光纤激光器实现次 100mKHz 级的激光频率稳定化。我们首先对我们的设置中的噪声景观进行详细表征，确定 WM 中的 CCD 散粒噪声是性能的主要限制因素。然后，我们实施了一系列系统级优化——调整干涉仪读出参数、主动抑制温度波动和电子噪声，包括 50 Hz 的电源线干扰。在最佳条件下，系统实现了最低分数频率不稳定性 1.6×10^{-12} ，平均时间为 10,000 秒。这比之前使用类似 WM 基础技术报告的最佳结果提高了超过一个数量级。[27]。此外，稳定激光的频率噪声谱在大多数频段内保持在 WM 理论散粒噪声下限的 5 倍以内。这些结果表明，通过仔细地减少噪声和控制回路设计，基于 WM 的频率稳定化可以接近其基本噪声极限。我们的结果确立了基于 WM 的稳定化的性能基准，并突显了它作为量子光学、原子物理和计量学中高精度应用的一种紧凑、稳健且成本效益高的解决方案的潜力。

2. 实验设置

基于 WM 的激光频率稳定方案如图 1(a) 所示。一个 556 纳米光纤激光器（型号 FL-SF-556-0.3-CW, Preciselaser）用作光源。这种掺镱光纤激光器结合单程倍频，在保持约 31 千赫兹窄线宽的同时提供高输出功率。如图 1(b) 所示，该线宽通过在 1 秒窗口内积分频率噪声功率谱密度（PSD）来估算。由于激光内置的反馈回路，高频噪声成分被有效抑制，低频波动成为频率噪声的主要贡献者。这种噪声特性使得该激光器特别适合基于 WM 的激光频率稳定。

一款商用 WM（型号 WS8-2, HighFinesse GmbH 公司）被用作激光频率参考。它采用多个固体法布里-珀罗干涉仪（FZIs）进行精确波长测量。由此产生的干涉条

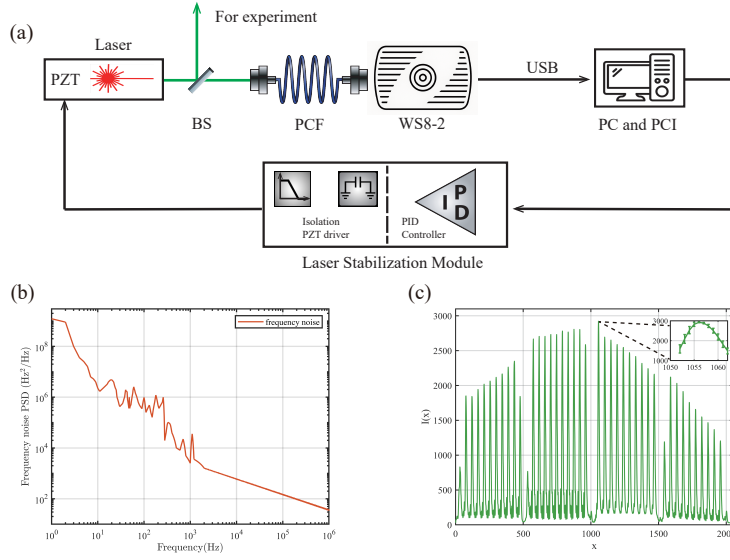


图 1. (a) 基于 WM 的激光频率稳定设置示意图。使用 WM、PC 控制的数模转换器（DAC）和带有隔离低噪声 PZT 驱动器的 PID 控制器来稳定 556 nm 激光。WM 提供实时频率读数，通过 DAC 将其转换为模拟信号以进行 PID 反馈。隔离驱动器确保电气隔离、噪声过滤以及与 PZT 的电压匹配。(b) 自由运行的 556 nm 光纤激光器的频率噪声 PSD。对于傅里叶频率超过 3 Hz 的情况，激光的固有噪声显著低于 WM 限定的散粒噪声基底。(c) WM 记录的典型干涉条纹。插图：单个条纹峰的局部放大图。误差棒显示了 10,000 次读数中的强度波动。

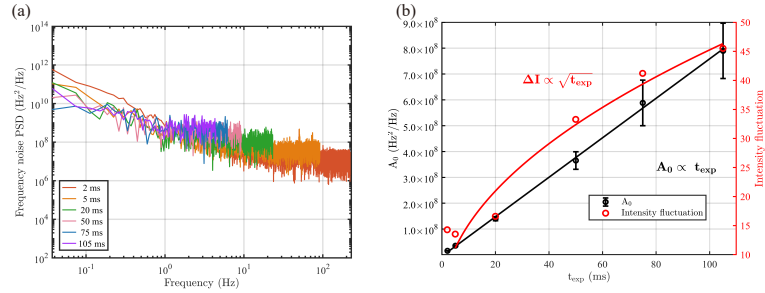


图 2. (a) 使用 556 纳米光纤激光器在不同的 CCD 曝光时间 t_{exp} 下测量的 WM 频率噪声 PSD。(b) 提取的噪声基底 A_0 （黑色）和测量到的条纹强度波动（红色）随曝光时间 t_{exp} 的变化。 A_0 与 t_{exp} 呈线性增加，且强度波动遵循 $\sqrt{t_{\text{exp}}}$ 依赖关系（实线），这与受散粒噪声限制的行为一致。误差棒表示 10,000 帧的标准偏差（红色）和拟合不确定性（黑色）。

纹通过 CCD 阵列记录下来，生成特征条纹图案 [图 1(c)]。沿横向轴 x 的条纹强度由

$$I(x) = I_0(x) \left[1 + \cos \left(2\pi x \frac{2\alpha}{\lambda} + \frac{2e}{\lambda} \right) \right]. \quad (1)$$

给出。这里， α 表示 FZI 反射面之间的楔角，而 e 代表参考位置 $x = 0$ [28] 处的分离厚度。 α 和 e 是固定的几何参数，它们可能会表现出热漂移。波长 λ 由条纹图案确定。光通过单模光子晶体光纤耦合到波长计中，这确保了强度稳定且空间模式定义明确。在我们的设置中， $I_0(x)$ 的幅度波动在连续 10,000 次测量中仍然可以忽略不计，如图 1(c) 所示。从方程 1 可以看出，检测到的条纹强度 $I(x)$ 的波动会影响提取波长的精度。两个主要噪声源主导这一过程：(i) CCD 检测的干涉条纹中由散粒噪声引起的强度波动，以及 (ii) 由于光学元件热膨胀而产生的干涉仪中的低频漂移。这些因素共同定义了基于 WM 的激光频率稳定性的分辨率极限。

为了减轻 $I(x)$ 中散粒噪声的影响，增加入射光功率是一种简单有效的策略。更高的光功率增强了 CCD 采集中的信噪比 (SNR)，特别是在检测器接近其饱和水平时尤为明显。在我们的系统中，大约 $50\mu\text{W}$ 的入射功率将 CCD 信号提升到其饱和强度的大约 90%——远低于制造商损坏阈值的一个多因子 20——因此代表了一个最佳的操作点。即使在这样的优化照明条件下，光子散粒噪声也会增加作为 $\sqrt{I(x)}$ 并对波长测量造成噪音底限，进而影响可实现的频率分辨率。为了量化这一限制，我们使用窄线宽 556 nm 光纤激光器来表征 WM 受到散粒噪声限制的表现性能。如图 2(a) 所示，所测得的频率噪声 PSD 证实了增加光学输入功率可以缩短 CCD 曝光时间 t_{exp} ，从而抑制测量噪音并扩展有效测量带宽。我们通过拟合频谱来建模频率噪声功率谱密度

$$S_v(f) = A_0 + \frac{B_0}{f^2}, \quad (2)$$

其中， A_0 代表白噪声底限， B_0 捕捉随机漂移 ($1/f^2$) 的噪声贡献。如图 2(b) 所示，拟合后的噪声底限 A_0 对 t_{exp} 表现出线性依赖关系，这与预期的散粒噪声限制行为一致。

此外，我们通过统计分析作为 t_{exp} 函数的条纹强度波动来确认了 CCD 散粒噪声与波长测量噪声之间的联系，如图 2(b) 所示。结果表明，由 CCD 散粒噪声驱动的干涉条纹幅度波动导致了波长不确定性，支持了散粒噪声限制性能模型。

为了确保热稳定环境并尽量减少测量漂移，WM 被安置在一个自制的、具有隔热功能的外壳中，如图 3(a) 所示。该外壳包含由挤出聚苯乙烯制成的外板以实现有效的热绝缘 [29]，以及内部的有机玻璃板用于机械支撑。通过使用热电冷却器 (TEC) 来实施主动温度调节，并在 WM 表面直接安装了温度传感器。PID 反馈回路连续调整 TEC 输出以保持热平衡。

图 3(b) 展示了 14 小时内测量的温度稳定性。绿色曲线表明，WM 表面温度 T_{surf} 在最大波动 0.15°C 范围内保持稳定，尽管环境温度波动 T_{amb} (蓝色曲线) 超过 1°C 。值得注意的是，由于内部热隔离，WM 内部温度 T_{WM} (红色曲线) 表现出更大的稳定性，波动低于 0.05°C 。这种温度稳定性对应于最大波长测量漂移约为 6 kHz。此水平的热稳定性代表了通过被动隔热可实现的最大限度。由内部电子元件——尤其是靠近 FZI 附近——产生的剩余热量对进一步改进构成了限制。尽管如此，当前配置提

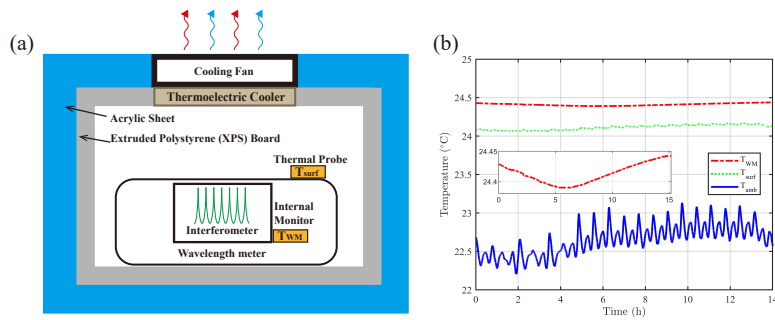


图 3. (a) 自制温控装置的示意图，用于 WM。它由一层内侧有机玻璃（灰色）、外层挤出聚苯乙烯壳体（蓝色）和一个主动稳定热电冷却器组成。表面安装的温度传感器提供反馈以实现主动控制。另外的内部传感器监测 WM 内部 FZI 附近的温度。(b) 时间上的温度测量结果。蓝色曲线显示环境温度 T_{amb} ，绿色曲线显示 WM 表面温度 T_{surf} ，红色曲线显示 WM 内部温度 T_{WM} 。插图放大了 T_{WM} 的温度。

供了足够的热稳定性以满足本研究的精度要求。

此外，在基于 WM 的激光稳定设置中，特别具有挑战性的噪声源是来自 PC、模拟控制硬件和反馈电路的 50Hz 电源线干扰。这种线路频率噪声表现为频谱中的一个显著峰值，高达 $\sim 10^8 \text{Hz}^2/\text{Hz}$ ，并且必须有效抑制以确保稳定的反馈性能。为此，我们实现了一个带有 10Hz 截止频率低通滤波器的电气隔离模拟控制模块，如图 1 (a) 所示。此设计有效地将反馈路径与外部电子噪声隔离开来并衰减 50Hz 分量。

3. 结果

图 4 展示了基于 WM 的激光频率稳定系统的性能。如图 4(a) 所示，稳定后的激光频率在连续六小时内保持在一个 $\pm 200 \text{kHz}$ 的窗口内，表现出极佳的长期稳定性。所测频率的标准偏差为 96.8kHz 。图 4(b) 展示了激活反馈回路前后频率噪声 PSD 的情况。稳定系统显著抑制了低频噪声，特别是在以热漂移和机械波动为主的亚赫兹范围内。值得注意的是，在稳定后对整个频率噪声 PSD 进行平均得到的总噪声功率为 $3.4 \times 10^7 \text{Hz}^2/\text{Hz}$ (绿色线)，这仅比 WM 限定的散粒噪声地板 $1.2 \times 10^7 \text{Hz}^2/\text{Hz}$ (黑色线，超过 25 Hz 拐点频率后的平均值) 高出 2.8 倍。这种轻微超出主要归因于反馈控制回路内的残留电子噪声。根据稳定的 PSD 计算得出激光谱线宽度约为 96.7kHz ，这与图 4(a) 中的统计结果非常吻合。这种一致性确认了该系统工作在 WM 所限定的分辨率极限附近，而且谱线加宽——相对于自由运转情况大约增加了三倍——主要是由 WM 固有的测量噪声限制。

图 4(c) 比较了激光频率在自由运行 (红圈) 和稳定状态 (蓝方块) 下的 Allan 偏差 $\sigma(\tau)$ 。这些数据与图 4(b) 中的噪声 PSD 结果一致。在自由运行的情况下， $\sigma(\tau)$ 在 $\tau > 10$ 毫秒内单调增加，反映了 WM 和激光的热和机械漂移的累积。相比之下，

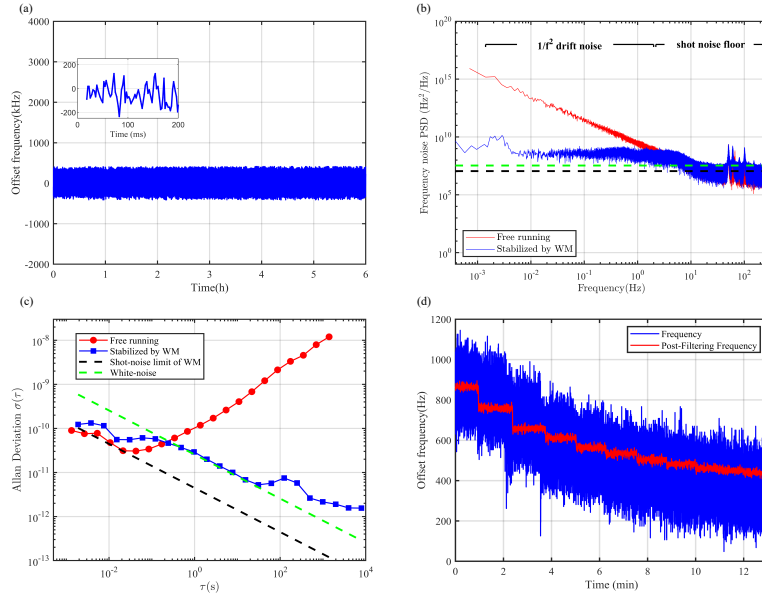


图 4. (a) 六小时内稳定激光频率的时间轨迹，展示了长期漂移限制在 ± 200 kHz 内。(b) 稳定前（红色）和稳定后（蓝色）的频率噪声谱。(c) 自由运行状态（红色）和稳定后的阿伦偏差（蓝色）。虚线黑色线条表示白噪声缩放以供参考。(d) 稳定激光频率的微调性能。蓝色轨迹显示原始频率数据，而红色轨迹则展示了应用 1 Hz 低通滤波器后的结果，揭示了分辨率提高到 60 kHz。

稳定系统在 $\sigma(\tau)$ 中表现出下降趋势，持续到一万秒，达到最小值 1.6×10^{-12} ，在 $\tau = 10,000$ 秒时。这代表了至今基于 WM 的激光频率稳定化所实现的最低 Allan 偏差之一。从图 4(c) 可以得到进一步的理解。黑色虚线表示 WM 的理论散粒噪声极限，遵循预期的白色频率噪声缩放规律 $\sigma(\tau) = 4.4 \times 10^{-12}/\sqrt{\tau}$ 。这种行为特征在短时间平均时表现为光子散粒噪声。对于 $\tau \geq 10^{-2}$ 秒，Allan 偏差偏离了这个理想限制，因为随机行走和漂移噪声开始占主导地位。绿色虚线表示稳定后的白噪声增强区域，由 $\sigma(\tau) = 2.6 \times 10^{-11}/\sqrt{\tau}$ 描述。这种额外的噪声略微提高了有效噪声基底，相比理论极限。

尽管 WM 的本征噪声限制了稳定系统的最终性能，但通过低通滤波或信号平均来减少测量噪声仍可以增强稳定激光的频率调谐分辨率。图 4(d) 显示了应用 1Hz 截止频率的低通滤波器后的稳定激光频率。过滤后的数据显示出显著减小的波动，表明分辨率得到了改善。视觉检查显示，由于测量带宽的减少，频率调谐分辨率增强到了大约 60 kHz。通过使用更低截止频率的滤波器或更先进的平均算法可以进一步提高性能。

4. 结论与讨论

在本工作中，我们展示了一个基于高分辨率 WM 的紧凑且稳健的激光频率稳定系统。通过将窄线宽光纤激光器主动锁定到 WM 的反馈信号上，并结合优秀的热屏蔽、电子噪声抑制以及针对 50Hz 线路噪声的针对性排斥，我们在十千赫兹级别的分辨率下实现了长期频率稳定性。对频率噪声 PSD 和 Allan 偏差的测量证实了低频漂移和技术噪声源得到了显著抑制。值得注意的是，该系统在 10,000 秒时达到 1.6×10^{-12} 的 Allan 偏差最小值，这比之前报道的基于 WM 的稳定结果大约提高了十倍。这一性能接近 WM 本身的固有散粒噪声限制灵敏度。

从实际角度来看，基于 WM 的方法提供了关键优势：它紧凑、硬件效率高、易于集成、支持多通道锁定，并且在波长上具有广泛的可调性。稳定波长可以通过简单地更换 WM 来灵活调整，无需进行主要的光学重新配置。展望未来，仍有许多性能提升的途径。升级到饱和功率更高和读出速度更快的 WM 可以进一步降低散粒噪声限制并增强锁定带宽。此外，改进 WM 设备本身的内部热管理和机械布局可以帮助抑制残留的慢漂移。鉴于其灵活性、简单性和高精度的结合，这里展示的基于 WM 的稳定方案非常适合广泛的应用——包括激光冷却和捕获、光学镊子阵列、原子干涉仪以及可扩展量子信息系统——这些应用中可靠且高分辨率的激光频率控制至关重要。

5. 致谢

作者感谢肖嘉裕和刘斌的讨论。本工作得到国家自然科学基金（NSFC）项目编号 12174458 的支持。李军得到了中山大学基本科研业务费 2023lgbj0 和 24xkjc015 的支持。

6. 披露

作者声明没有利益冲突。

参考文献

1. F. Giorgetta, I. Coddington, E. Baumann, *et al.*, “Fast high-resolution spectroscopy of dynamic continuous-wave laser sources,” *Nat. Photonics* **4**, 853–857 (2010).
2. A. Ozawa, J. Rauschenberger, C. Gohle, *et al.*, “High harmonic frequency combs for high resolution spectroscopy,” *Phys. Rev. Lett.* **100**, 253901 (2008).
3. K. Yoshii, H. Sakagami, H. Yamamoto, *et al.*, “High-resolution spectroscopy and laser frequency stabilization using a narrow-linewidth planar-waveguide external cavity diode laser at 1063 nm,” *Opt. Lett.* **45**, 129–132 (2020).
4. S. Peng, H. Liu, J. Li, and L. Luo, “Collisional cooling of a fermi gas with three-body recombination,” *Commun. Phys.* **7**, 101 (2024).
5. T. Langen, G. Valtolina, D. Wang, and J. Ye, “Quantum state manipulation and cooling of ultracold molecules,” *Nat. Phys.* **20**, 702–712 (2024).
6. Q. Peng, B. Jiao, H. Yu, *et al.*, “Observation of quantum-classical transition behavior of $^{1}\text{g}_{1/2}$ in a dissipative quantum gas,” *Phys. Rev. Res.* **7**, 023045 (2025).
7. H. Gong, H. Liu, B. Jiao, *et al.*, “Controllable production of degenerate fermi gases of ^{6}Li atoms in the crossover from two dimensions to three dimensions,” *Phys. Rev. A* **107**, 053321 (2023).

8. E. Benkler, F. Rohde, and H. R. Telle, "Robust interferometric frequency lock between cw lasers and optical frequency combs," *Opt. Lett.* **38**, 555–557 (2013).
9. M. V. Chekhova and Z. Y. Ou, "Nonlinear interferometers in quantum optics," *Adv. Opt. Photon.* **8**, 104–155 (2016).
10. E. T. Khabiboulline, J. Borregaard, K. De Greve, and M. D. Lukin, "Optical interferometry with quantum networks," *Phys. Rev. Lett.* **123**, 070504 (2019).
11. Y. Jiang, A. Ludlow, N. D. Lemke, *et al.*, "Making optical atomic clocks more stable with 10- 16-level laser stabilization," *Nat. Photonics* **5**, 158–161 (2011).
12. D. Meiser, J. Ye, D. R. Carlson, and M. J. Holland, "Prospects for a millihertz-linewidth laser," *Phys. Rev. Lett.* **102**, 163601 (2009).
13. N. Huntemann, M. Okhapkin, B. Lipphardt, *et al.*, "High-accuracy optical clock based on the octupole transition in $\text{yb}^{+}171$," *Phys. Rev. Lett.* **108**, 090801 (2012).
14. Y.-y. Xu, J.-f. Cui, K. Qi, *et al.*, "On-site calibration of the raman laser absolute frequency for atom gravimeters," *Phys. Rev. A* **97**, 063626 (2018).
15. H. Wu, P. Lu, Y. Liu, *et al.*, "Frequency stabilization of a 739 nm laser to an $\text{i}2$ spectrum for trapped ytterbium ions," *J. Opt. Soc. Am. B* **39**, 1457–1461 (2022).
16. J. I. Thorpe, K. Numata, and J. Livas, "Laser frequency stabilization and control through offset sideband locking to optical cavities," *Opt. express* **16**, 15980–15990 (2008).
17. J. Li, J. Liu, L. de Melo, *et al.*, "Sub-megahertz frequency stabilization of a diode laser by digital laser current modulation," *Appl. Opt.* **54**, 3913–3917 (2015).
18. K. Saleh, J. Millo, A. Didier, *et al.*, "Frequency stability of a wavelength meter and applications to laser frequency stabilization," *Appl. Opt.* **54**, 9446–9449 (2015).
19. L. Couturier, I. Nosske, F. Hu, *et al.*, "Laser frequency stabilization using a commercial wavelength meter," *Rev. Sci. Instruments* **89** (2018).
20. J. Kim, K. Kim, D. Lee, *et al.*, "Locking multi-laser frequencies to a precision wavelength meter: Application to cold atoms," *Sensors* **21** (2021).
21. M. Ghadimi, E. M. Bridge, J. Scarabel, *et al.*, "Multichannel optomechanical switch and locking system for wavemeters," *Appl. Opt.* **59**, 5136–5141 (2020).
22. S. Utreja, H. Rathore, M. Das, and S. Panja, "Frequency stabilization of multiple lasers to a reference atomic transition of rb ," *Sci. Reports* **12**, 20624 (2022).
23. A. Yamaguchi, N. Shiga, S. Nagano, *et al.*, "Stability transfer between two clock lasers operating at different wavelengths for absolute frequency measurement of clock transition in 87sr ," *Appl. Phys. Express* **5**, 022701 (2012).
24. H. Kim, M.-S. Heo, C. Y. Park, *et al.*, "Absolute frequency measurement of the 171yb optical lattice clock at kriss using tai for over a year," *Metrologia* **58**, 055007 (2021).
25. E. A. Alipieva, E. V. Stoykova, and V. Nikolova, "Wavemeter with fizeau interferometer for cw lasers," in *11th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications*, vol. 4397 (SPIE, 2001), pp. 129–133.
26. B. Büttgen, T. Oggier, M. Lehmann, *et al.*, "Ccd/cmos lock-in pixel for range imaging: Challenges, limitations and state-of-the-art," *Proc. 1st range imaging research day* pp. 21–32 (2005).
27. W.-L. Bai, W.-C. Peng, Q.-Y. Zhang, *et al.*, "Frequency stabilization of multiple continuous-wave lasers via a precision wavelength meter," *Opt. & Laser Technol.* **189**, 113076 (2025).
28. M. B. Morris, T. J. McIlrath, and J. J. Snyder, "Fizeau wavemeter for pulsed laser wavelength measurement," *Appl. Opt.* **23**, 3862–3868 (1984).
29. J. Zhang, W. Yuan, K. Deng, *et al.*, "A long-term frequency stabilized deep ultraviolet laser for mg^{+} ions trapping experiments," *Rev. Sci. Instruments* **84** (2013).