

基于波长计实现多路激光的长稳锁定

钱源^{1,2,3}, 梁世勇^{1,2,3}, 黄垚^{1,2}, 管桦^{1,2}, 高克林^{1,2*}

¹中国科学院武汉物理与数学研究所波谱与原子分子物理国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

²中国科学院武汉物理与数学研究所原子频标重点实验室, 湖北 武汉 430071;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 介绍了一种简单的激光器频率锁定方法,该方法直接将多路激光器频率锁定到波长计。为了测量激光频率的锁定效果,当频率锁定时,利用参考于氢钟的飞秒光梳测量其频率。研究表明:锁定到波长计的 548 nm 光纤激光器的频率抖动在 1 MHz 以内,阿仑方差在 20 s 时可达到 5×10^{-11} ;397 nm 和 866 nm 可调谐半导体激光器的频率抖动在 ± 5 MHz 以内,长期漂移速度小于 2 MHz/h。

关键词 原子与分子物理学;激光稳频;光频标;囚禁离子;波长计

中图分类号 O562.3+1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0211004

Long-Term Frequency Stabilization of Multi-Lasers Based on Wavemeter

Qian Yuan^{1,2,3}, Liang Shiyong^{1,2,3}, Huang Yao^{1,2}, Guan Hua^{1,2}, Gao Kelin^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

²Key Laboratory of Atomic Frequency Standards, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A concise scheme of laser frequency stabilization method is presented, multi-laser frequency are stabilized to wavemeter directly by this method. In order to check the laser frequency stabilization results, we measure the laser frequency by a femtosecond optical comb referenced to a hydrogen clock when the frequency is locked. The results show that the frequency jitter of 548 nm fiber laser frequency which locked to wavemeter is smaller than 1 MHz, and the Allan deviation at 20 s reaches 5×10^{-11} . The frequency stability of tunable diode lasers with wavelength of 397 nm and 866 nm are evaluated with frequency jitter of ± 5 MHz and long-term drift rate of smaller than 2 MHz/h.

Key words atomic and molecular physics; laser frequency stabilization; optical frequency standard; ion trapping; wavemeter

OCIS codes 020.3320; 020.1335; 300.6210; 300.6520

1 引 言

在光频标和量子信息研究中,利用激光冷却降低原子或离子温度是非常重要的前提,将冷却激光的频率稳定地置于原子或离子跃迁频率的近红失谐,使运动的原子或离子借助与激光相互作用的多

普勒效应实现原子或离子的激光冷却。若要获得较好的冷却效果,冷却光的频率就需要保持稳定,因此,获得频率稳定的激光非常重要。同时,在光频标研究中,需要对原子或离子进行长时间稳定的探测,探测过程中不仅要求原子或离子的状态不变,还要求冷却光具有良好的频率稳定性^[1-8]。

收稿日期: 2018-10-15; 修回日期: 2018-10-24; 录用日期: 2018-11-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0304401,2018YFA0307500,2017YFA0304404)、国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2012-2)、国家自然科学基金(91736310,11774388,11634013,11622434)、中国科学院先导专项(XDB21030100)、湖北省杰出青年基金(2017CFA040)、中国科学院青年创新促进会(2015274,2018364)

* E-mail: klqao@wipm.ac.cn

在研究组所从事的 Ca^+ 囚禁和冷却的实验中, 所需要的 397 nm 冷却光和 866 nm 回泵光均源于外腔可调谐半导体激光器, 其线宽本身约为 10 MHz, 漂移率严格依赖于所处环境的温度。对应 Ca^+ 的能级 $4\text{P}_{1/2}$ 到 $4\text{S}_{1/2}$ (397 nm) 跃迁的自然线宽为 $2\pi \times 22.3$ MHz, $4\text{P}_{1/2}$ 到 $3\text{D}_{3/2}$ (866 nm) 的跃迁自然线宽为 $2\pi \times 2$ MHz, 之前采用传输腔稳频的方法实现了 Ca^+ 激光冷却所需的 397 nm 和 866 nm 激光器的稳频^[9-11], 但方法严格依赖于参考光, 若参考光失锁, 则待锁的激光也会失锁。另外, 参考腔处于扫描状态, 参考腔的扫描通过扫描压电陶瓷 (PZT) 实现, 加之 PZT 的非线性效应, 因此, 在不同的 PZT 拉伸范围内, 腔长的变化并不是线性的, 这会导致激光的长漂并不能被完全抑制。

基于现有的实验条件, 本文介绍了一种利用波长计实现多路激光频率同时锁定的方案。该方案将激光频率直接锁定到波长计, 不需要额外利用法布里-珀罗腔作参考^[9,12-14]。同时, 所有的信号分析与处理均由计算机完成, 不需要外部电路, 因此结构简单。此外, 利用该方法可以同时实现多路激光稳频。

2 实验原理与装置

实验原理如图 1 所示, 实验中用于锁定的激光器有 3 台: 两台波长分别为 397 nm 和 866 nm 的半导体激光器, 用于钙离子光频标研究; 一台波长为 548 nm 的光纤倍频激光器, 用于锂离子精密光谱实验研究。实验中采用的波长计为德国 Highfinesse 公司的 WS-7, 该波长计配有一个多通道切换开关, 可以通过 8 个通道之间的切换实现最多 8 路激光的“同时”测量, 通过 LabVIEW 读取波长计对应通道的激光频率(波长)。WS-7 控制软件安装目录中提供了一个名为 ‘wlmData.dll’ 的动态链接库文件, 该链接库提供了控制波长计的各项函数, 如读取和

设置波长计参数的函数, 使用 LabVIEW 的调用库函数节点调用该动态链接库中的 GetFrequency 函数可以获取波长计实际测量的频率值 F_m , 然后设置一个待锁定频率 F_{set} , 可以得到第 k 次反馈周期误差信号 $e_k = F_{\text{set}} - F_m$, 因此可以计算出第 k 次的反馈电压 u_k 为

$$u_k = K_p e_k + K_i \sum_{j=1}^k e_j + K_d (e_k - e_{k-1}), \quad (1)$$

式中: K_p 为比例增益; K_i 为积分增益; K_d 为微分增益; $\sum_{j=1}^k e_j$ 表示前 k 项误差信号求和; j 为误差项索引。根据不同的应用需求, 传统的比例-积分-微分 (PID) 算法可以进行相应的调整, 比如加入激光器跳模检测、反馈幅度限制等功能防止过度反馈, 避免激光器模式不稳。

在该方案中, 首先将 K_p 、 K_i 和 K_d 设为 0, 然后逐步增大 K_p 直至激光频率出现震荡, 此时逐渐减小 K_p , 同时更改设定频率值, 观察激光频率震荡的情况, 直到激光频率在设定频率附近存在但能较快稳定下来的震荡。此时激光频率若存在稳态误差(激光频率锁定不到设定频率), 逐步增加 K_i 使激光频率向锁定频率方向靠拢, 最终使激光频率锁定到设定频率。由于从波长计获得的频率值为离散值, 误差信号的微分值抖动幅度较大, 所以一般情况下将 K_d 设为 0。若激光频率震荡时间较长, 可以尝试调节 K_d , 缩短震荡时间。在调试各增益系数的过程中, 若发现反馈的方向不对, 则应改变增益系数的正负号。

不同的激光器会对应不同的反馈电压输出设备, 例如: 397 nm 和 866 nm 外腔式半导体激光器使用 NI PXI 6733 板卡输出反馈信号; 548 nm 激光器使用 Thorlabs MDT693B PZT 驱动输出反馈。反馈周期根据锁定的激光器数量、波长计曝光时间和输出设备的响应速度等设置为 10~50 ms。

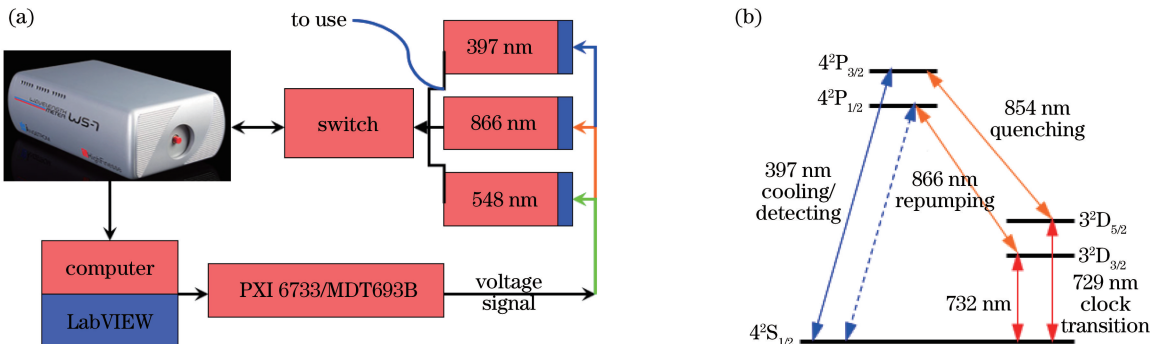


图 1 (a) 波长计稳频原理; (b) $^{40}\text{Ca}^+$ 能级图

Fig. 1 (a) Principle of wavemeter frequency stabilization; (b) energy level scheme of $^{40}\text{Ca}^+$

3 实验结果

548,397,866 nm 激光频率锁到波长计后,需要一个相对准确的频率对锁频效果进行评估,用飞秒光梳测量锁定到波长计的 548 nm 激光器的绝对频率,以此来评估波长计的稳定性,然后通过误差信号 e_k 来评估 PID 反馈的效果。在图 1 中,548 nm 激光的性能采用一台参考于氢钟(俄罗斯, KVARZ, CH1-75)的飞秒光梳(德国, MenloSystems, FC8004)进行频率测量,FC8004 的载波包络偏移频率 F_{ceo} 锁定到 20 MHz,重复频率 F_{rep} 锁定到约 200 MHz。微调 F_{rep} 使拍频信号 F_b 约为 55 MHz,使用计数器(美国, Agilent, 53132A)测量拍频信号 F_b 的频率,计数周期为 1 s。548 nm 激光的绝对频率为 $F = F_{ceo} + nF_{rep} + F_b$,其中的 n 是较大的正整数,约为 2.7×10^6 。氢钟标称稳定度为:秒稳 2×10^{-13} ,千秒稳 2.5×10^{-15} ,参考氢钟后的飞秒光梳($F_{ceo} + nF_{rep}$)的秒稳与氢钟的稳定度相当。 F_b 的稳定度用来表征 548 nm 激光的频率稳定度。在拍频的同时,将热敏电阻(PT100)贴在波长计机壳上,用美国 Agilent 34410A 测量其阻值,然后换算成温度。548 nm 激光与光梳拍频得到的拍频信号 F_b 如图 2 所示,图 2 中的红色曲线代表实时温度,黑色曲线代表对应时刻的拍频频率。由图 2 可知:548 nm 激光周围温度的波动小于 $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,其对应频率的抖动小于 1.5 MHz,20 s 时阿伦方差达到 5×10^{-11} ,如图 3 所示,与 Couturier 等^[15]的结果在同一量级上,甚至在百秒稳定度上略优于其结果。用波长计锁定频率的结果见图 4,图 4 中给出了各路激光器稳频误差信号随时间的变化曲线,其中右边的直方图是对本次误差信号的统计结果,其宽度可以直接通过对应左侧坐标轴上的示数读取,例如最

关注的 397 nm 激光器误差信号的抖动约为 $\pm 3 \text{ MHz}$,此抖动统计结果的半峰全宽不到 4 MHz。可见:几个波长的激光频率波动均小于 $\pm 5 \text{ MHz}$,而 548 nm 激光的抖动小于 $\pm 1 \text{ MHz}$ 。该稳频装置的效果取决于波长计的稳定性和测频精度,WS-7 波长计的绝对精度为 60 MHz,漂移灵敏度为 2 MHz,但从图 2 中锁定后 548 nm 激光器绝对频率随时间的变化来看,采用 WS-7 可以将激光器在 1 h 内的漂移控制 $\pm 1 \text{ MHz}$ 以内。

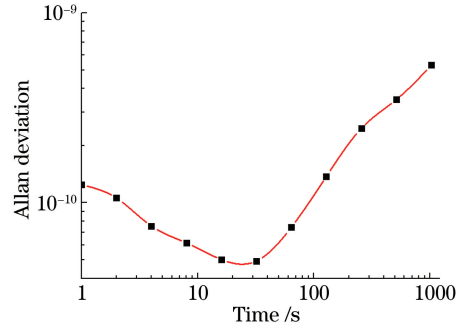


图 3 548 nm 激光的频率稳定度

Fig. 3 Frequency stabilization of 548 nm laser

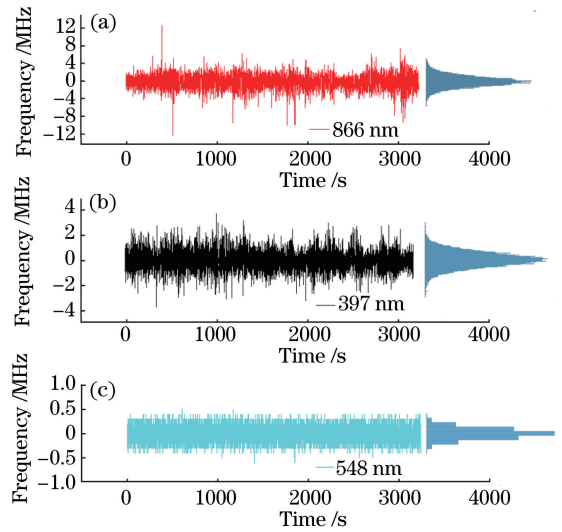


图 4 三路激光器频率稳定的误差信号。(a) 866 nm 激光器;(b) 397 nm 激光器;(c) 548 nm 激光器

Fig. 4 Error signals of frequency stabilization of three lasers. (a) Laser with wavelength of 866 nm; (b) laser with wavelength of 397 nm; (c) laser with wavelength of 548 nm

4 结 论

介绍了一种用波长计实现多路激光稳频的方案。其中的一路激光(波长为 548 nm)用于监测波长计的漂移,另外两路激光(397 nm 和 866 nm 激

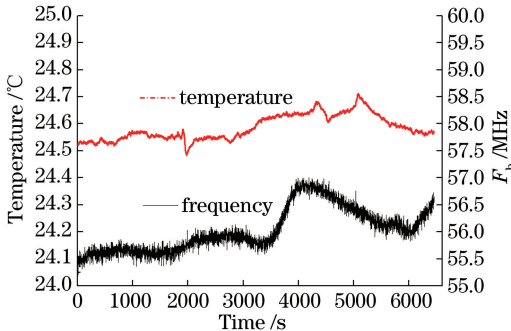


图 2 548 nm 激光与飞秒光梳的拍频信号

Fig. 2 Beat frequency signal between 548 nm laser and femtosecond optical comb

光)用于 Ca^+ 光钟实验。相对于传输腔稳频,该方法不需要额外搭建光路用于稳频,在测量频率的同时进行了锁频,不需要处理大量的光电信号,因此延迟比传输腔稳频小。该方法的稳频效果为:线宽优于 5 MHz,飘移小于 2 MHz/h。结果与传输腔类似,但不受传输腔稳频中参考光失锁的影响。该方法有望在光频标、量子信息和精密光谱实验中获得广泛应用。

参 考 文 献

- [1] Ejtemaei S, Haljan P C. 3D Sisyphus cooling of trapped ions[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(4): 043001.
- [2] Guan H, Huang Y, Li C B, *et al.* $^{40}\text{Ca}^+$ optical frequency standards with high accuracy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(16): 164202.
管桦, 黄垚, 李承斌, 等. 高准确度的钙离子光频标 [J]. *物理学报*, 2018, 67(16): 164202.
- [3] Harty T P, Allcock D T, Ballance C J, *et al.* High-fidelity preparation, gates, memory, and readout of a trapped-ion quantum bit [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(22): 220501.
- [4] Huang Y, Guan H, Liu P, *et al.* Frequency comparison of two $^{40}\text{Ca}^+$ optical clocks with an uncertainty at the 10^{-17} level [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(1): 013001.
- [5] Huntemann N, Okhapkin M, Lipphardt B, *et al.* High-accuracy optical clock based on the octupole transition in $^{171}\text{Yb}^+$ [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(9): 090801.
- [6] Madej A A, Dubé P, Zhou Z C, *et al.* $^{88}\text{Sr}^+$ 445-THz single-ion reference at the 10^{-17} level via control and cancellation of systematic uncertainties and its measurement against the SI second [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(20): 203002.
- [7] Ratcliffe A K, Taylor R L, Hope J J, *et al.* Scaling trapped ion quantum computers using fast gates and microtraps[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(22): 220501.
- [8] Wineland D J, Itano W M. Laser cooling of atoms [J]. *Physical Review A*, 1979, 20(4): 1521-1540.
- [9] Wang D Y, Bu W H, Xie D Z, *et al.* Compact frequency-stabilization scheme for laser cooling of polar molecules[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(7): 1658-1661.
- [10] Guan H. Experimental research on laser cooling a single trapped $^{40}\text{Ca}^+$ ion [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, 2007.
管桦. 激光冷却单个 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子的实验研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉物理与数学研究所, 2007.
- [11] Qu W C, Huang Y, Guan H, *et al.* 397 nm semiconductor laser stabilized with scanning transfer cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(8): 0802008.
屈万成, 黄垚, 管桦, 等. 传输腔稳频的 397 nm 半导体激光器 [J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0802008.
- [12] Karapuzikov A A, Karapuzikov A I, Kashtanov D A, *et al.* A compact frequency-stabilized pulse-periodic waveguide CO_2 laser for calibration of wavelength meters [J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2014, 57(2): 209-213.
- [13] Li M, Zhang Y, Peng W C, *et al.* Long-term frequency stabilization system of external cavity semiconductor laser based on precision wavelength meter[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2017, 34: 432-435.
李敏, 张勇, 彭文翠, 等. 基于精密波长计的外腔半导体激光长期稳频系统 [J]. *量子电子学报*, 2017, 34(4): 432-435.
- [14] Zhang J, Yuan W H, Deng K, *et al.* A long-term frequency stabilized deep ultraviolet laser for Mg^+ ions trapping experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(12): 123109.
- [15] Couturier L, Nosske I, Hu F C, *et al.* Laser frequency stabilization using a commercial wavelength meter [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(4): 043103.