

高热稳定性高精度光学法布里-珀罗腔系统

王兴昌, 李少康, 李 刚, 张天才

山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

摘要 设计了由超低膨胀玻璃材料制作的光学法布里-珀罗(F-P)腔及其真空控温系统,通过双重控温系统实现了 F-P 腔在环境温度为 10~40 °C 范围的精确控制,该系统在 24 h 内的温度波动约为 ± 0.004 °C。通过分析 F-P 腔的共振频率和铯原子饱和吸收谱,获得了 F-P 腔的共振频率和腔体材料膨胀系数随温度的变化。通过对测得的数据进行拟合,可以精确确定零膨胀温度为 29.286 ± 0.057 °C。所提出的温度控制系统有望获得热稳定性为 3.494×10^{-14} 的光学频率标准。

关键词 测量; 法布里-珀罗腔; 饱和吸收光谱; 热膨胀

中图分类号 O562 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0112004

Optical Fabry-Pérot Cavity System with High Thermal Stability and High Finesse

Wang Xingchang, Li Shaokang, Li Gang, Zhang Tiancai

Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006

Abstract An optical Fabry-Pérot cavity composed of ultra-low expansion glass material and a vacuum temperature control system are designed. The temperature of the Fabry-Pérot cavity can be precisely tuned from 10 °C to 40 °C when we use the double temperature control system, and the temperature fluctuation of the system is within ± 0.004 °C in 24 h. The variations in resonant frequency of the F-P cavity and expansion coefficient of the cavity material with temperature are measured when we analyze the F-P cavity resonant frequency and the saturated absorption spectrum of Cs atom. The zero expansion temperature (29.286 ± 0.057 °C) is determined accurately when we fit the measured data. An optical frequency standard with thermal stability of 3.494×10^{-14} is expected to be obtained by the proposed temperature control system.

Key words measurement; Fabry-Pérot cavity; saturated absorption spectrum; thermal expansion

OCIS codes 120.2230; 300.1030

1 引 言

高精度光学法布里-珀罗(F-P)腔可以提供高精度的频率标准和精细的频率分辨力,在超分辨光谱^[1]、量子精密测量、光原子钟^[2]和量子信息^[3]等领域具有重要的应用。光学腔的频率稳定性主要取决于其自身的机械稳定性和由环境温度变化引起的腔长变化。利用零膨胀材料[如微晶玻璃 Zerodur、超低膨胀(ULE)玻璃等]制作的高热稳定性 F-P 腔的腔体和镜片,可以在室温附近消除线性热膨胀,极大减小了温度起伏的影响。同时,经过腔体机械结构的设计优化^[4]并隔离环境噪声,可以获得小于 $(\Delta L/L)/a_{\text{vib}} = 2 \times 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (其中 $\Delta L/L$ 为腔体相对长度改变量, a_{vib} 为机械振动导致的加速度)的机械稳定性^[5],此时

收稿日期: 2016-08-01; **收到修改稿日期:** 2016-08-25

基金项目: 国家 973 计划(2012CB921601)、国家自然科学基金(61275210, 61227902, 91336107)

作者简介: 王兴昌(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光器和冷原子物理实验方面的研究。

E-mail: wangxingchang42@outlook.com

导师简介: 张天才(1966—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事量子光学和原子物理方面的研究。

E-mail: tczhang@sxu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: gangli@sxu.edu.cn

热力学布朗噪声^[6-8]成为必须考虑的因素。对于圆柱形状的腔,长度为 100 mm 时^[9]热噪声背景低于 10^{-15} ,长度为 400 mm 时^[10]热噪声背景低于 1×10^{-16} ,这些腔广泛应用于国内外原子光频钟的实验中^[11-12]。为了获得良好的振动隔离效果,F-P 腔系统通常放置于真空环境中以隔离振动噪声,如何在真空环境中实现温度的高精度控制则成为获得高热稳定性 F-P 腔系统的基本技术问题。为了测量高热稳定性 F-P 腔的零膨胀温度,实验中通常将两台激光器分别锁定在不同的高精细度光学 F-P 腔上,维持一套 F-P 腔的温度不变,扫描另外一套 F-P 腔的温度。利用两台激光器之间的拍频信号随温度的变化,可以测量出 F-P 腔的腔长随温度的变化,从而可以测量出零膨胀温度。该测量方式所使用的高热稳定性 F-P 腔系统结构复杂,实验所需费用较高,通常应用于光原子钟实验系统,不利于其在一般实验中的应用。

本文在实验上设计了高热稳定性 F-P 腔及其真空系统的控温系统,其在 24 h 内的温度波动 ΔT 在 ± 0.004 °C 以内。在此基础上,通过对比 F-P 腔的共振频率和铯原子饱和吸收谱^[13],获得高热稳定性 F-P 腔在不同温度下共振频率的精确数值,从而测得 F-P 腔系统的热膨胀特性,由此得到零膨胀温度为 29.286 ± 0.057 °C。结合控温系统的精度,推算所设计的系统可以获得小于 3.494×10^{-14} 的热致腔长起伏。该控温系统结构简单,控温精度高,测量腔体热膨胀的方法简单可靠,可以广泛应用于一般的光学和原子分子物理实验中,如中性原子里德堡态的激发激光器的锁定^[3]等。

2 基本原理

2.1 高热稳定性腔控温系统

利用长度为 100 mm 的 ULE 玻璃设计光学 F-P 腔,两边利用范德瓦尔斯力直接粘贴曲率半径为 500 mm 的镜片和平面镜片,镜片的材料也为 ULE 玻璃。光学高热稳定性腔体的直径为 50 mm,放置于内径为 63 mm 的真空腔体中,高热稳定性腔和真空腔之间垫有硅橡胶以隔离外界振动。整个真空系统用一个抽运速率为 10 L/s 的离子泵(型号:10ST Ion Pump, Gamma Vacuum)维持,真空度可达 10^{-7} Pa。真空腔体周围用铝块紧密包裹,铝块上下表面分别贴有尺寸为 80 mm \times 120 mm \times 5.4 mm 的大功率半导体制冷元件(型号:TEC 1-13936, EVERREDtronics Limited)控温。利用最大输出功率为 840 W 的温度控制器(型号:5400-30-28, Arroyo Instruments)驱动半导体制冷元件。为了获得良好的温度控制效果,使用绝热材料将整个真空腔体包括离子泵包裹,同时为了在高温或者低温下获得稳定的温度控制,半导体制冷元件利用水冷散热。整个系统的结构示意图如图 1 所示,该系统可以实现 10~40 °C 的温度控制,采用单点测温的方法实测 24 h 温度控制精度可达 ± 0.004 °C (图 2)。与光原子钟系统的高热稳定性腔控温系统相比^[14-15],该系统结构简单,且温度控制的精度较高。

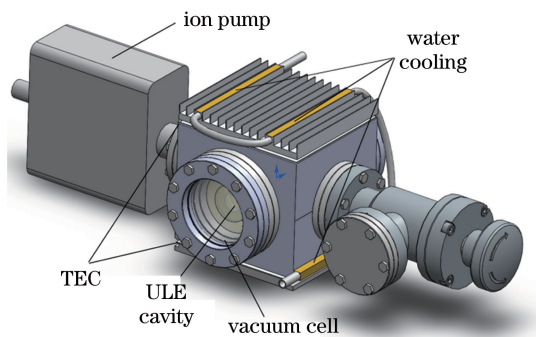


图 1 高热稳定性腔真空系统机械结构示意图

Fig. 1 Mechanical structure diagram of ultra-stable cavity vacuum system

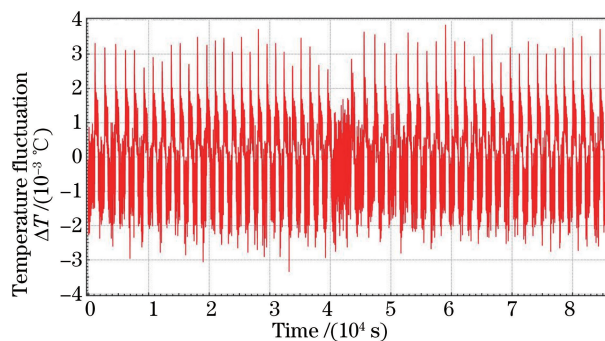


图 2 真空腔室的温度波动(采样时间为 1 s,时长为 24 h)

Fig. 2 Temperature fluctuation of vacuum cavity (sampling time is 1 s, time span is 24 h)

2.2 ULE 高热稳定性腔膨胀系数的测量

为了测量高热稳定性腔的热膨胀特性,采用如图 3 所示的实验装置。输出波长 $\lambda = 852$ nm 的外腔反馈半导体激光器的输出光经偏振分束棱镜分为两路,一路光注入到铯原子饱和吸收谱装置,另一路光经光纤相位调制器(型号:NIR-MPX800-LN-10, Photline)耦合进 F-P 腔。光纤相位调制器由频率发生器(型号:

SG382, Stanford Research Systems, Inc.)驱动,可以精确扫描进入高热稳定性腔激光的调制频率。当 F-P 腔的温度约为 25 °C 时,通过扫描激光器的频率可同时获得铯原子的饱和吸收谱和 F-P 腔的透射谱,如图 4 所示。此时,调节频率发生器加在光纤相位调制器上的频率,使得高热稳定性腔的透射光谱中相邻纵模的正负一阶边带重合,从而精确测量高热稳定性腔的自由光谱区(FSR),设 F_{FSR} 为测得 FSR 的值, $F_{FSR} = c/2nl = 1496.825 \pm 0.002$ MHz,其中 c 为真空中光速, n 为介质折射率, l 为 F-P 腔的腔长。当腔体处于高真空环境时,折射率为 1,腔长 $l = 100.143 \pm 0.001$ mm。利用腔衰荡方法^[16]测得 $\lambda = 852$ nm 处腔的精细度 $F \approx (3.27 \pm 0.35) \times 10^4$,对应的实际腔线宽 $\Delta\nu = 46.159 \pm 4.957$ kHz,远小于铯原子 D2 线的自然线宽 $\Gamma(\Gamma = 5.234$ MHz)。

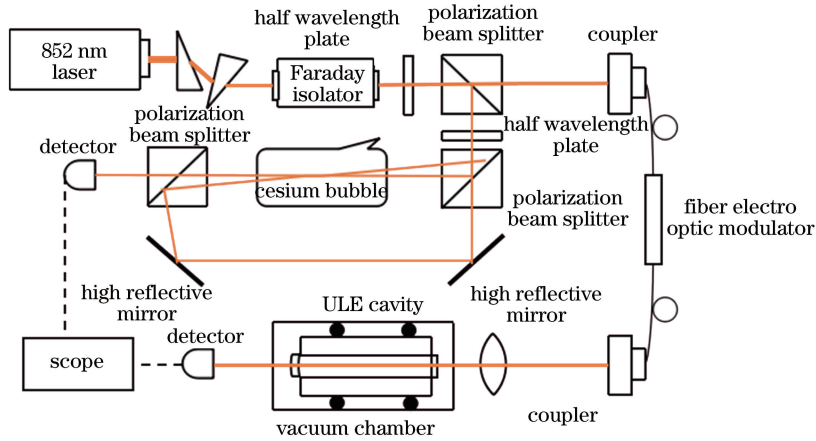


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Diagram of experimental setup

当 F-P 腔中沿轴线方向传播的光在腔内稳定振荡时,其频率满足

$$\nu_q = q \cdot F_{FSR}, \quad (1)$$

式中 q 为 F-P 腔纵模模式数。腔长一定时 F-P 腔的自由光谱区为定值,其共振频率由模式数 q 唯一确定。调节频率发生器的频率,可以使得某个 F-P 腔共振峰的调制边带和铯原子超精细跃迁线严格重合。基于铯原子超精细跃迁线的精确频率,可以确定此处光频率对应的 F-P 腔共振模式数。利用示波器得到的典型信号如图 4 所示,此处饱和吸收谱为铯原子 D2 线 $6S_{1/2}(F=3) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=2,3,4)$ 的情况,图中相位调制的 +1 级边带和 $6S_{1/2}(F=3) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=2,3)$ 交叉线(C3-2,3)重合,调制频率 $\Omega = 299.8$ MHz。图中红色线为原子饱和吸收谱线 $6S_{1/2}(F=3) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=2,3,4)$,蓝色线为模式数 $q = 2.34984 \times 10^5$ 时的 F-P 腔纵模及边带, $\Omega = 299.8$ MHz。根据文献[17],可以精确获得铯原子饱和吸收光谱的 $6S_{1/2}(F=3) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=2,3)$ 交叉线(C3-2,3)对应的频率 $\omega_{atom} = 351730625.255$ MHz,通过对比可以获得此处光频率对应的 F-P 腔的纵模模式数为

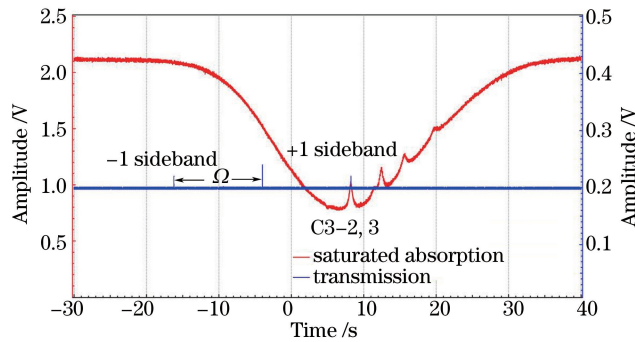


图 4 铯原子的饱和吸收谱和 F-P 腔的透射谱

Fig. 4 Saturated absorption spectrum of Cs atom and transmission spectrum of F-P cavity

$$q = \frac{\omega_{\text{atom}} - \Omega}{V_{\text{FSR}}} \approx 2.34984 \times 10^5. \quad (2)$$

标定了光频率对应的模式数 q 后,可以改变光学腔的温度。通过示波器采集信号,可观测到该模式数下频率的变化。利用光电调制边带作为标尺对比铯原子饱和吸收谱,测量其频率。利用(2)式可得到一定温度下自由光谱区的大小,从而得到腔长的变化。当温度改变的步长值为 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 时,经过 12 h 后系统处于热平衡状态,此时测得 ULE 高热稳定性腔的相对长度 $\Delta L/L$ 和边带射频频率 Ω 随温度的变化如图 5 所示。红色方块为高热稳定性腔的相对长度 $\Delta L/L$ 随温度变化的数据点(边带射频频率 Ω 随温度变化的数据点),蓝色实线为拟合曲线,图中参数为拟合常数。

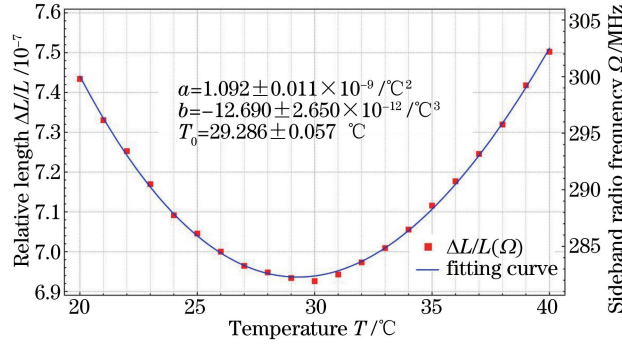


图 5 ULE 高热稳定性腔相对长度 $\Delta L/L$ 和边带射频频率 Ω 随温度的变化

Fig. 5 Variations in relative length $\Delta L/L$ and sideband ratio frequency of ULE ultra-stable cavity with temperature

3 分析与讨论

F-P 腔体长度为 L , 温度变化为 dT 时引起的长度变化 dL 可以表示为

$$dL = L\alpha \cdot dT, \quad (3)$$

式中 α 为腔体材料的热膨胀系数。ULE 玻璃在零膨胀温度附近的热膨胀系数可以近似表示为

$$\alpha_{\text{ULE}}(T) = a(T - T_0) + b(T - T_0)^2, \quad (4)$$

式中 a 为线性膨胀系数,量级约为 $10^{-9}/^\circ\text{C}^2$; b 为二项式系数,量级约为 $10^{-11}/^\circ\text{C}^3$ 。由(4)式可以看出,在零膨胀温度 T_0 时 ULE 材料的线性膨胀系数为零。因此,可以得出腔体相对长度改变量为^[18]

$$\Delta L/L = \frac{a}{2}(T - T_0)^2 + \frac{b}{3}(T - T_0)^3 + \gamma(t - t_0) + C_0, \quad (5)$$

式中 C_0 为积分常数,由初始条件决定; γ 为时间漂移常数,量级为 $10^{-15}/\text{s}$, 由于测量时间相对较短(约为 1000 s),此项可忽略。

实验中, F-P 腔的第 q ($q = 2.34984 \times 10^5$) 个纵模频率与原子吸收峰 C3-2,3 频率之间的关系为

$$\frac{qc}{2nL} + \Omega = \omega_{\text{atom}}. \quad (6)$$

腔体相对长度的变化量为

$$\Delta L/L = \frac{qc}{2nL(\omega_{\text{atom}} + \Omega)} - 1. \quad (7)$$

利用(7)式计算得到的腔体相对长度随温度的变化如图 5 所示,并利用(5)式拟合得到高热稳定性腔所采用的 ULE 材料的零膨胀温度 $T_0 = 29.286 \pm 0.057\text{ }^\circ\text{C}$, 对应 $a = (1.092 \pm 0.011) \times 10^{-9}/^\circ\text{C}^2$, $b = (-12.690 \pm 2.650) \times 10^{-12}/^\circ\text{C}^3$ 。

4 结 论

构建了高热稳定性光学 F-P 腔的控温系统,通过双重控温实现了对高精度光学腔温度的精确控制 ($\Delta T \approx \pm 0.004\text{ }^\circ\text{C}$)。在此基础上,通过对比 F-P 腔透射谱和铯原子吸收谱线,精确测量了 ULE 玻璃腔体相

对长度随环境温度的变化,从而获得了 ULE 材料的零膨胀温度($T_0 = 29.286 \pm 0.057$ °C)。结合控温精度和获得的 ULE 材料参数,得到所设计系统的热致长度波动小于 3.494×10^{-14} 。该系统可以提供激光器的频率标准,可应用于中性原子里德堡态的激发激光器的锁定。

参 考 文 献

- [1] Rafac R J, Young B C, Beall J A, *et al.* Sub-dekahertz ultraviolet spectroscopy of $199 \text{ Hg} +$ [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(12): 2462-2465.
- [2] Jiang Y Y, Ludlow A D, Lemke N D, *et al.* Making optical atomic clocks more stable with 10^{-16} level laser stabilization [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(3): 158-161.
- [3] Saffman M, Walker T G, Mølmer K. Quantum information with Rydberg atoms [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2010, 82(3): 2313-2363.
- [4] Ludlow A D, Huang X, Notcutt M, *et al.* Compact, thermal-noise-limited optical cavity for diode laser stabilization at 1×10^{-15} [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(6): 641-643.
- [5] Millo J, Magalhaes D V, Mandache C, *et al.* Ultrastable lasers based on vibration insensitive cavities [J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053829.
- [6] Numata K, Kemery A, Camp J. Thermal-noise limit in the frequency stabilization of lasers with rigid cavities [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(25): 250602.
- [7] Kimble H J, Lev B L, Ye J. Optical interferometers with reduced sensitivity to thermal noise [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(26): 260602.
- [8] Notcutt M, Ma L S, Ludlow A D, *et al.* Contribution of thermal noise to frequency stability of rigid optical cavity via Hertz-linewidth lasers [J]. *Physical Review A*, 2006, 73(3): 031804.
- [9] Webster S A, Oxborrow M, Pugla S, *et al.* Thermal-noise-limited optical cavity [J]. *Physical Review A*, 2008, 77(3): 033847.
- [10] Swallows M D, Martin M J, Bishof M, *et al.* Operating a 87 Sr optical lattice clock with high precision and at high density [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2012, 59(3): 416-425.
- [11] Ludlow A D, Boyd M M, Ye J, *et al.* Optical atomic clocks [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(2): 637-651.
- [12] Tian Xiao, Xu Qinfang, Yin Mojuan, *et al.* Experiment study on optical lattice clock of strontium at NTSC [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s1): s102001.
田 晓, 徐琴芳, 尹默娟, 等. 国家授时中心锶原子光钟的实验研制进展 [J]. *光学学报*, 2015, 35 (s1): s102001.
- [13] Cao Xuemin, Yang Xudong, Li Shujing, *et al.* A resonant frequency tunable and narrowband F-P interference filter controlled by the temperature [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2008, 14(1): 72-76.
曹学敏, 杨旭东, 李淑静, 等. 温控共振频率可调谐窄带 F-P 干涉滤波器 [J]. *量子光学学报*, 2008, 14(1): 72-76.
- [14] Dai X, Jiang Y, Hang C, *et al.* Thermal analysis of optical reference cavities for low sensitivity to environmental temperature fluctuations [J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 5134-5146.
- [15] Chen Long, Zhang Linbo, Xu Guanjun, *et al.* Research on temperature control of optical cavity for laser frequency stabilization [J]. *Journal of Time and Frequency*, 2015, 38(3): 139-146.
陈 龙, 张林波, 许冠军, 等. 激光稳频中光学参考腔温度控制研究 [J]. *时间频率学报*, 2015, 38(3): 139-146.
- [16] Rempe G, Lalezari R, Thompson R J, *et al.* Measurement of ultralow losses in an optical interferometer [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(5): 363-365.
- [17] Steck D A. Cesium D line data [J]. [2016-08-01]. <http://steck.us/alkalidata/cesiumnumbers.1.6.pdf>.
- [18] Legero T, Kessler T, Sterr U. Tuning the thermal expansion properties of optical reference cavities with fused silica mirrors [J]. *JOSA B*, 2010, 27(5): 914-919.