

基于制冷法布里-珀罗腔的激光频率漂移控制

汪绍茂^{1,2,3}, 商俊娟^{1,2,3}, 崔凯枫^{1,2,3}, 张平^{1,2,3},
晁思嘉^{1,2,3}, 袁金波^{1,2,3}, 曹建^{1,2}, 舒华林^{1,2}, 黄学人^{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中国科学院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 将自由运转的激光器参考锁定在隔振、恒温、高细度的 Fabry-Pérot (F-P) 参考腔上, 获得了短期稳定性频率较好的窄线宽激光。为了降低温度对激光频率稳定性的影响, F-P 腔的腔体一般选用具有超低热膨胀 (ULE) 系数的玻璃材料。ULE 玻璃存在一个特定的温度点, 该温度点下其 ULE 系数接近 0, 称之为拐点温度。由于其拐点温度通常低于或者高于室温, 因此设计了一套主动温控装置, 该装置可在高真空环境中将 F-P 腔的温度控制在 $-5\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 并且一天内 F-P 腔的温度波动范围在 $\pm 0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。该温度控制装置可应用在工作波长为 729 nm 的 ULE F-P 腔系统中, 当该参考腔的温度控制在拐点温度 ($17.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) 附近时, 平均线性频率漂移控制在 100 mHz/s 以内。

关键词 激光光学; 频率稳定性; 窄线宽激光; 拐点温度; 频率漂移

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.031401

Laser Frequency Drift Control Based on Refrigeration Fabry-Pérot Cavity

Wang Shaomao^{1,2,3}, Shang Junjuan^{1,2,3}, Cui Kaifeng^{1,2,3}, Zhang Ping^{1,2,3},
Chao Sijia^{1,2,3}, Yuan Jinbo^{1,2,3}, Cao Jian^{1,2}, Shu Hualin^{1,2}, Huang Xueren^{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 In order to obtain a narrow linewidth laser with good short-term frequency stability, a free running laser is locked in a Fabry-Pérot (F-P) reference cavity which has the characteristics of vibration isolation, constant temperature and high fineness. To reduce the influence of temperature on laser frequency stability, the F-P cavity is generally made of glass material with ultralow-expansion (ULE) coefficient. There is a special temperature point called inflection point temperature for ULE glass, and the ULE coefficient of glass is almost zero under such special temperature. For the inflection point temperature is always higher or lower than the room temperature, we design an active temperature control equipment which can control the F-P cavity temperature in the range of $-5\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ in high vacuum environment, with a temperature fluctuation less than $\pm 0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$ in one day. The temperature control equipment is employed to ULE F-P cavity system with the working wavelength of 729 nm, and the average linear frequency drift is within 100 mHz/s when the reference cavity temperature is controlled near the inflection point temperature of $17.3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

收稿日期: 2016-10-24; **收到修改稿日期:** 2016-11-08

基金项目: 863 计划 (2012AA120701)、国家自然科学基金 (11674357)

作者简介: 汪绍茂 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光稳频方面的研究。E-mail: wangshaomao@wipm.ac.cn

导师简介: 黄学人 (1974—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事离子光频标方面的研究。

E-mail: hxueren@wipm.ac.cn (通信联系人)

Key words laser optics; frequency stability; narrow linewidth laser; inflection point temperature; frequency drift

OCIS codes 140.3425; 140.3410; 140.4780

1 引言

窄线宽激光器已成为精密光谱测量、光学频率标准、引力波测量、量子计算和物理基本常数测量等众多领域不可或缺的工具^[1-4]。近些年,通过对法布里-珀罗(F-P)腔的结构、安装方式和材料选择等多方面的研究,获得了线宽更窄、频率更稳定的激光。2006年,Stoehr等^[5]将一台半导体激光器的频率参考锁定到超低热膨胀(ULE)材料的F-P腔上,使激光线宽达到1 Hz;2007年,Ludlow等^[6]实现了线宽为0.3 Hz的激光;2012年,Kessler等^[7]在单晶硅F-P腔上获得了线宽为40 mHz的超窄激光;2015年,Häfner等^[8]利用长度为48 cm的ULE材料F-P腔,实现了 8×10^{-17} 的频率稳定性。

目前,获得超窄线宽激光输出的主要方法是利用PDH(Pound-Drever-Hall)稳频技术将自由运转的激光参考锁定至特殊设计的F-P腔上^[9]。采用PDH稳频技术,可将激光器的频率锁定在参考腔上,此时激光频率的稳定性受光的散粒噪声、剩余幅度噪声和参考腔腔长稳定性的影响。F-P腔的腔镜光胶黏合在间距为 l 的腔体两端,因此其频率稳定性与腔长稳定性紧密相关^[10-12],而腔长稳定性受振动、声音和温度的影响。为了减小频率稳定性对F-P腔温度的依赖,腔体材料一般选用热膨胀系数极低的玻璃材料,如ULE,该材料的热膨胀系数极低,且存在零膨胀系数的特殊点。理论上,若将F-P腔的温度稳定地控制在拐点温度处时,其频率漂移率最低可达3.2 mHz/s,一天内的频率漂移量约为1.5 kHz^[13]。ULE材料的拐点温度通常会高于或者低于室温。当拐点温度高于室温时,使用电阻丝加热,可以将腔体温度稳定地控制在拐点温度处。当拐点温度低于室温时,采取两种常见的方案来控制温度:1)在腔镜外侧增加一个特殊设计的补偿环,使拐点温度高于室温,如Legero等^[14]采用ULE F-P腔与熔融石英腔镜,并加入ULE材料的补偿环以实现F-P腔拐点温度的调节,从而使拐点温度高于室温(高达30 °C);2)采用可制冷的主动温度控制装置^[13]。

实验中,为了提高钙离子边带冷却的稳定性,需要对冷却激光进行稳频。实际操作中,使用F-P腔对冷却激光进行稳频,从而使冷却光的频率在一天内的漂移量小于5 kHz。利用飞秒光梳粗略测量现有F-P腔的拐点温度,发现其拐点温度低于室温,因此需要设计一套制冷装置将该F-P腔的温度稳定地控制在其拐点温度处。F-P腔安装在压强为 10^{-6} Pa的真空腔中,在真空腔体与F-P腔之间增加两层热屏蔽层以增大热容和减小环境温度波动的影响,并利用热电制冷器(TEC)进行主动温度调节。通过优化真空室内F-P腔的支撑结构,改善TEC导热面间的接触方式,有效提高了TEC的工作效率。使用一级制冷便可完成温度范围为 $-5 \sim 40$ °C的控制,主动温度控制装置得到简化。使用飞秒光梳测量得到该F-P腔的拐点温度为17.3 °C,并在这个温度点实现了对温度的稳定控制。将一台729 nm半导体激光器的频率稳定地参考锁定在该F-P腔上,此时729 nm激光器频率在35 h内的总漂移量为4.4 kHz,平均漂移率约为88 mHz/s。

2 实验装置

实验中使用的729 nm激光器为商用半导体激光器(型号DLC pro, Toptica, 德国),其线宽约为100 kHz。图1为制冷型F-P腔系统的结构示意图,F-P腔的腔长为77.5 mm,腔体呈橄榄球形,两个腔镜的曲率半径分别为 $R_1 = \infty$ 和 $R_2 = 500$ mm,腔体与腔镜的材料都为ULE。F-P腔采用竖直安装方式固定在压强为 10^{-6} Pa的高真空腔体中。由于F-P腔对振动非常敏感,所以将其安装在被动隔振平台上。为了降低声音与温度波动对F-P腔的影响,将整个F-P腔系统封闭在包裹有隔音保温材料的铝盒中。

实验中,采用主动温度控制方案控制真空腔的温度。F-P腔的安装方式如图1所示。在TEC上下两个导热面之间增加了一层薄的钢箔薄片,利用F-P腔自身重力使钢箔发生形变,两个导热面通过钢箔紧密接触。该方案有效改善了两个导热面间的热传导效率,从而提高了TEC的工作效率,避免了传统方案中采用导热胶等材料影响真空度以及污染F-P腔腔镜的问题。为了获得更好的热屏蔽效果和更大的热容,在F-P腔与真空系统之间增加两层抛光后的铝制热屏蔽层,从而提高F-P腔温度的稳定性,铝制热屏蔽层的总热容约为720 J/K。铝制热屏蔽层与F-P腔之间采用聚四氟乙烯连接杆来固定F-P腔,并减少F-P腔与热屏蔽层底座的热传导。真空腔与隔振平台间的铝制散热底座能够有效地驱散TEC产生的热量。实验中使用

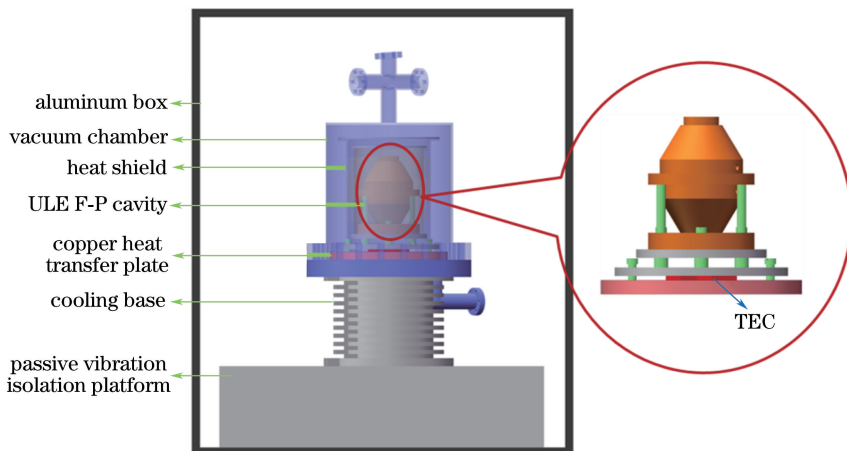


图 1 制冷型 F-P 腔系统的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of refrigeration F-P cavity system

比例-积分-微分(PID)温控电路对 F-P 腔的温度进行精密的控制,将阻值为 30 k Ω 的热敏电阻作为反馈电阻。为了增加热敏电阻对温度变化的响应速度,热敏电阻被固定在外层热屏蔽的底部且距离 TEC 最近的位置。

实验中的 PDH 稳频方案如图 2 所示。激光经光纤耦合头(FC)后进入电光调制器(EOM),EOM 对光进行调制。为了减小 EOM 温度对剩余幅度调制(RAM)的影响,对 EOM 进行了主动温度控制,将其温度稳定在最小剩余幅度处^[15]。为了进一步抑制 RAM,通过格兰泰勒棱镜(GT)将激光偏振与 EOM 光轴匹配。在偏振分光棱镜(PBS)前加入光隔离器(ISO)来减小标准具效应引入的 RAM 噪声。实验中用到了两个光电探测器(PD1、PD2),PD1 和声光调制器(AOM)用来稳定入射光的功率,将 PD2 探测到的信号与 EOM 的调制信号进行混频后便可得到 PDH 误差信号。实验中使用商用 FALC110 电路,对横电磁(TEM₀₀)模式进行锁定,使激光器的频率稳定地参考到该 F-P 腔的共振频率上。图中 $\lambda/2$ 和 $\lambda/4$ 分别为 1/2 波片和 1/4 波片,BS 为分光器。

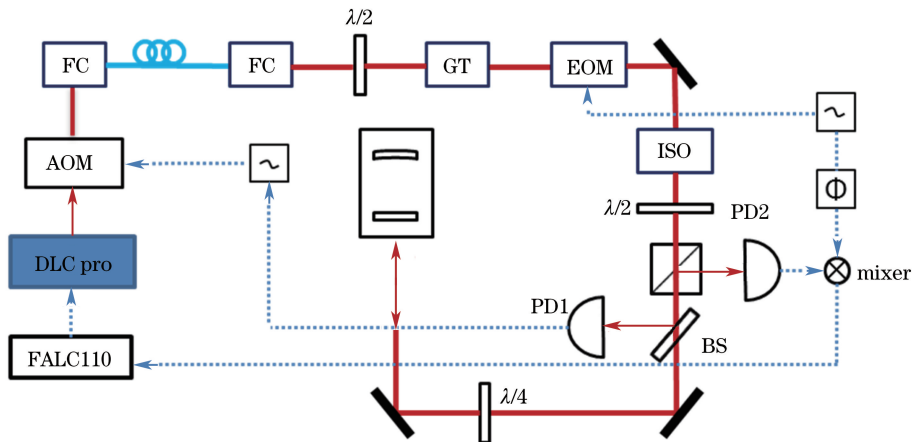


图 2 PDH 稳频装置示意图

Fig. 2 Diagram of PDH frequency stabilizer

3 实验结果

激光在 F-P 腔中的共振频率与 F-P 腔腔长的关系为 $\Delta\nu/\nu = -\Delta l/l$ ^[16],其中 ν 为共振频率, $\Delta\nu$ 为共振频率的变化量, l 为 F-P 腔腔长, Δl 为 F-P 腔腔长的变化量。通过改变 F-P 腔的温度和测量腔共振频率的变化量,可得到腔长的变化量,从而确定 F-P 腔的拐点温度。实验中利用飞秒光梳测量了多个温度点对应的 F-P 腔的共振频率。飞秒光梳的重复频率及载波频率通过参考 10 MHz 氢钟信号进行锁定,然后将飞秒激光与连续的探测光(参考在 F-P 腔共振频率的 729 nm 激光)合光拍频,从而实现对探测光绝对频率的测量。测量得到的数据如图 3 所示,红线为二阶多项式的拟合曲线,其中共振频率变化量为 0 的点是实验所需要的

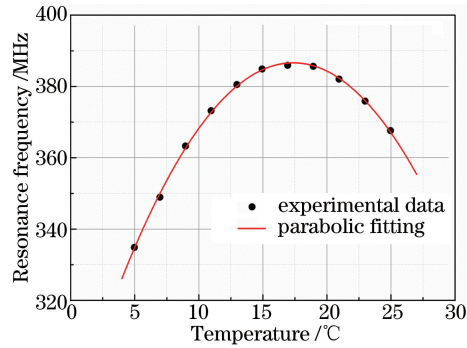


图3 利用飞秒光梳测量得到的 F-P 腔的温度

Fig. 3 Measured temperature of F-P cavity by femtosecond optical comb

拐点温度。从图中的拟合曲线可以看出,当 F-P 腔的温度约为 17.3 °C 时,F-P 腔的共振频率变化量最小,这个点即为所需的拐点温度。

由于 F-P 腔和屏蔽层的热容较大,温度变化缓慢,因此对 F-P 腔的温度变化量进行了实时监测。根据实时采集的温度数据,对温控的 PID 参数进行了精密优化,使其温度处于最稳定状态。实验室温度为 21 °C,温度波动范围在 ± 1.5 °C/d 以内。对 F-P 腔热屏蔽层连续 40 h 的采集结果如图 4 所示。图 4(a)为 F-P 腔热屏蔽层温度在 40 h 内的变化,图 4(b)为温度控制系统中 TEC 功率的变化。从图 4 中可以看出,温度拐点为 17.3 °C 时,F-P 腔的温度波动范围在 ± 0.005 °C/d 以内,TEC 的总功率小于 0.0400 W。当 F-P 腔温度需要达到更低值时,其总功率会相应升高。当 F-P 腔的温度稳定地维持在 5 °C 时,其温度波动范围约为 ± 0.005 °C/d,此时 TEC 的功率约为 0.8000 W;当温度降至 -5 °C 时,TEC 的总功率升高至约 1.5000 W。

为了更好地评估该 F-P 腔温度的稳定性,将实验中所用的 729 nm 窄线宽激光器与另一台 729 nm 的窄线宽激光器进行拍频,从而获得两台激光器的频率随时间的变化关系^[17]。其中,另一台 729 nm F-P 腔的温度被控制在拐点温度(其拐点温度为 27.3 °C,高于室温),温度波动范围约为 ± 0.001 °C/d,频率漂移范围约为 ± 50 mHz/s。由于这两台窄线宽激光器处于两个相隔较远的实验室,因此需要一根长度为 60 m 的光纤对光频信号进行传输。为了抑制环境对光纤随机相位噪声的影响,采用消除光纤相位噪声的方法对光纤进行主动控制,使激光经过光纤传输后的频率抖动小于 1 Hz。两台窄线宽 729 nm 激光器的拍频数据由 LabVIEW 程序控制的频率计数器(N53220A, Agilent technology)进行采集,选通时间为 1 s,并参考 10 MHz 氢钟信号。进行了 32 h 的连续采集,采集结果如图 5 所示。图中 5(a)、(b)分别为实验中所用的窄线宽 729 nm 激光器的拍频信号在 32 h 内的频率漂移和频率漂移率。从图 5(a)可以看出,激光频率漂移呈线性趋势,其 32 h 内的总漂移量约为 4.4 kHz,由此计算得到频率漂移率约为 38 mHz/s。由于另一台 729 nm 激光器的频率漂移率约为 ± 50 mHz/s,因此实验中所用激光器的实际频率漂移率小于 88 mHz/s。

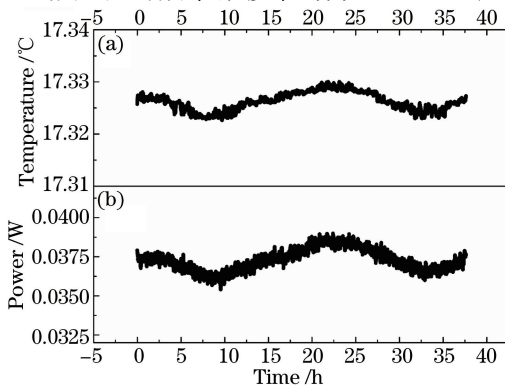


图4 (a) F-P 腔热屏蔽层温度的变化;(b)温度控制系统中 TEC 功率的变化

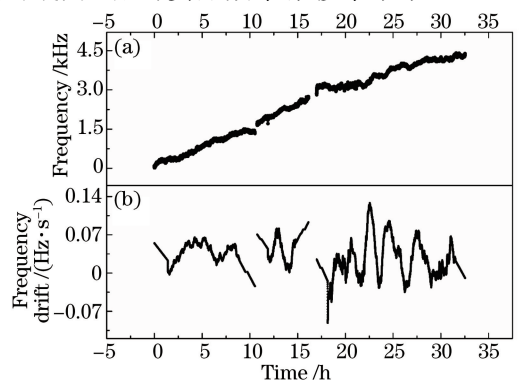
Fig. 4 (a) Temperature variation of F-P cavity heat shield;
(b) power variation of TEC in temperature control system

图5 窄线宽 729 nm 激光器拍频信号的(a)频率漂移和(b)频率漂移率

Fig. 5 (a) Frequency drift and (b) frequency drift rate of beat frequency signal of narrow linewidth 729 nm laser

如图 5(b)所示,在 32 h 的测量时间内,激光频率的漂移率都在 ± 0.13 Hz/s 以内,其中 90% 的测量时间内激光的频率漂移率小于 70 mHz/s。优化 F-P 腔的温度稳定性后,进行了隔声、隔振和剩余幅度的优化,可使激光器的线宽达到 20 Hz。

4 结 论

通过采用主动温度控制方案,改善了 F-P 腔的温度控制结构及传热方式,实现了对 F-P 腔在温度范围为 $-5\sim 40$ °C 内的温度控制,并使用飞秒光梳对该 F-P 腔的拐点温度进行测量。通过改善热屏蔽层,获得了更高的热容,提高了 F-P 腔温度控制的稳定性。结果表明,当 F-P 腔的拐点温度为 17.3 °C 时,一天内 F-P 腔的温度波动范围在 ± 0.005 °C 以内。将实验中所用的 729 nm 半导体激光器的频率参考到该 F-P 腔后,通过与另外一台超窄 729 nm 激光器拍频得到其频率漂移在 100 mHz/s 以内,但仍远大于 ULE 材料的 F-P 腔处于拐点温度时频率漂移的最低值(3.2 mHz/s)^[13]。然而,实验中当 F-P 腔的拐点温度控制在 17.3 °C 时,TEC 的总功率仅为 0.0400 W,因此可以通过进一步增大 F-P 腔系统的热容来提高温度的稳定性,从而抑制激光器的频率漂移率。通过进一步抑制该窄线宽激光器系统的振动噪声和剩余幅度,可将激光器的线宽减小到 1 Hz。

参 考 文 献

- [1] Ludlow A D, Boyd M M, Zelevinsky T, *et al.* Systematic study of the Sr-87 clock transition in an optical lattice[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(3): 033003.
- [2] Waldman S J. Status of LIGO at the start of the fifth science run[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2006, 23(19): S653-S660.
- [3] Leibfried D, Blatt R, Monroe C, *et al.* Quantum dynamics of single trapped ions[J]. *Review of Modern Physics*, 2003, 75(1): 281-324.
- [4] Bondu F, Fritschel P, Man C N, *et al.* Ultrahigh-spectral-purity laser for the VIRGO experiment[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(8): 582-584.
- [5] Stoehr H, Mensing F, Helmcke J, *et al.* Diode laser with 1 Hz linewidth[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(6): 736-738.
- [6] 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.
- [7] Kessler T, Hagemann C, Grebing C, *et al.* A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(10): 687-692.
- [8] Häfner S, Falke S, Grebing C, *et al.* 8×10^{-17} fractional laser frequency instability with a long room-temperature cavity [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 2112-2115.
- [9] Zheng Gongjue, Dai Dapeng, Fang Yinfei, *et al.* Locking of optical transfer cavity based on PDH technique[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 121401.
郑公爵, 戴大鹏, 方银飞, 等. 基于 PDH 技术的光学传递腔的锁定[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 121401.
- [10] 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.
- [11] Notcutt M, Ma L-S, Ye J, *et al.* Simple and compact 1-Hz laser system via an improved mounting configuration of a reference cavity[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(14): 1815-1817.
- [12] Chen L, Hall J L, Ye J, *et al.* Vibration-induced elastic deformation of Fabry-Pérot cavities[J]. *Physical Review A*, 2006, 74(5): 053801.
- [13] Alnis J, Matveev A, Kolachevsky N, *et al.* Subhertz linewidth diode lasers by stabilization to vibrationally and thermally compensated ultralow-expansion glass Fabry-Pérot cavities[J]. *Physical Review A*, 2008, 77(5): 053809.
- [14] Legero T, Kessler T, Sterr U. Tuning the thermal expansion properties of optical reference cavities with fused silica mirrors[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(5): 914-919.
- [15] Fan Xialei, Jin Shangzhong, Zhang Shu, *et al.* Active suppression of residual amplitude modulation in laser frequency

stabilization by multi-frequency mixing[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0402001.

范夏雷, 金尚忠, 张 枢, 等. 多频率合成主动抑制激光稳频的剩余幅度调制[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0402001.

[16] Berthold J W, Jacobs S F. Ultraprecise thermal expansion measurements of seven low expansion materials[J]. Applied Optics, 1976, 15(10): 2344-2347.

[17] Xie Donghong, Deng Dapeng, Guo Li, *et al.* Line-width measurement method of narrow line width laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010006.

解东宏, 邓大鹏, 郭 丽, 等. 窄线宽激光器线宽测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010006.