

激光线性扫频法快速标定法布里-珀罗标准具参数

安盼龙^{1,2}, 赵瑞娟¹, 刘争光¹, 张旭峰¹, 李亦军^{1,2}

(1. 中北大学 理学院, 山西 太原 030051;

2. 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 法布里-珀罗标准具是一种精密的光学仪器, 其光谱窄、精细度高, 广泛应用于精细距离的测定、信号的检测分析等。标准具其自身参数的快速测量和准确标定成为诸多光学研究必不可少的步骤。针对法布里-珀罗标准具参数测量, 设计快速标定实验方案, 采用窄线宽(线宽<1 kHz)激光光源, 数字示波器采用泰克 DPO4104B(1 GHz, 5 GS/s)进行采样存储, 直接利用屏幕图像测试并计算标准具的主要参数指标。准确标定了所测法布里-珀罗标准具的自由谱宽、半高全宽、精细度、品质因数以及扫频常数, 比较分析了两种不同测试方案所得结果。为开展法布里-珀罗标准具参数的快速准确标定提供技术参考。

关键词: 线性扫频; 法布里-珀罗标准具; 参数标定; 数字示波器

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3418-06

Fast calibration parameters of Fabry-Perot etalon by laser linear frequency sweep

An Panlong^{1,2}, Zhao Ruijuan¹, Liu Zhengguang¹, Zhang Xufeng¹, Li Yijun^{1,2}

(1. School of Science, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Fabry-Perot etalon is a precision optical instrument. Due to its narrow spectrum and high fineness, it is widely used in measuring the fine distance, signal detection and analysis and so on. Therefore, the quick measurement and accurate calibration of parameters of Fabry-Perot etalon has become very important in numerous optical research and accurate calibration steps. To aim at the parameters measurement of the Fabry-Perot etalon, the experimental calibration scheme was designed and the narrow linewidth laser (linewidth<1 kHz) was used. Moreover, the high-performance digital oscilloscope DPO4104B (1 GHz, 5 GS/s) was applied to directly test and calculate the parameters of etalon. This paper accurately calibrated the free spectral range, the full width at half maximum, the fineness, quality factor and the sweeping constant of the etalon. At last, two results of different schemes were compared. This paper can provide relevant technical reference for the fast and accurate parameters calibration of Fabry-Perot etalon.

Key words: linear frequency sweep; Fabry-Perot etalon; parameters calibration; digital oscilloscope

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-03

基金项目: 国家自然科学基金科学仪器基础研究(61127008); 中北大学校自然科学基金

作者简介: 安盼龙(1978-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事光学传感与光电检测方面的研究。Email: Panlong_an@nuc.edu.cn

0 引言

法布里-珀罗干涉仪(F-P)是一种利用光的干涉原理进行相干干涉的精密光学仪器。由于其腔体隔温好,光谱稳定且谱线精细度高,广泛应用于激光器谐振腔、精细距离测定、信号的检测分析,也常被用来压窄激光器的输出频率并对窄线宽激光器实施锁频,标定激光光谱等^[1-3]。腔长可调的称为 F-P 干涉仪,腔长固定不变的称为 F-P 标准具。如何快速准确地标定所使用的 F-P 腔各项光学参数是诸多相关光学研究面临的重要问题,传统的测量采用观察干涉条纹的方法来确定其参数,不可避免存在条纹交叠,给观测带来较大的误差^[4-5]。文中避免直接观测光学干涉条纹,采用线性扫频压差快速测量,在室温条件下使用共焦球面 F-P 标准具进行测试研究,共焦 F-P 腔起到非常窄的带通滤光片的作用。通过压电换能器调节 F-P 腔的长度,可以调谐腔的透射波长,利用数字示波器实时采集图像直观准确地对其光学参数进行标定,其它相关光学实验可以以其测定值为基准,来实现光电研究的准确测试。

1 F-P 光学腔干涉透射原理

图 1 所示为 F-P 谐振腔结构,即两个高反射率的镜片构成的干涉仪^[6-7]。光束 E_0 通过 F-P 腔前端镜片入射到谐振腔内部, E_0 在前端镜片上在发生透射的同时,也产生了反射光 E_{R1} 。当 E_0 透射进入谐振腔后在谐振腔的后端镜片再次发生反射和透射,透射光记为 E_{T1} ,而反射光在 F-P 腔的前端镜片继续发生反射和透射,形成新的透射光 E_{R2} 。如此循环传播,就会在谐振腔的前端镜片形成一系列平行的反射光束 E_{R1} 、 E_{R2} 、 E_{R3} ...,而在谐振腔的后端镜片则形成同样的一系列透射光束 E_{T1} 、 E_{T2} 、 E_{T3} ...,这里只考虑谐振腔的透射光波。

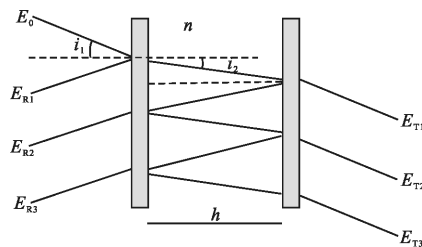


图 1 F-P 谐振腔多光束干涉原理示意图

Fig.1 Schematic of multi-beam interference in the F-P cavity

由于各束透射光互相平行,它们在穿过后端镜片后达到同一点时,彼此之间的光程差相同,表示为:

$$\delta=2nh\cos i_2 \quad (1)$$

相位差为:

$$\varphi=\frac{4\pi}{\lambda}nh\cos i_2 \quad (2)$$

设第一束透射光 E_{T1} 的初相位为 0,则各透射光束的相位可以写为: $0, 2\phi, 3\phi, 4\phi, 5\phi, 6\phi, \dots$

设 F-P 谐振腔的前端镜片与后端镜片的反射率均相同,记为 R 。则各透射光束的幅值可以表示为:

$$\begin{aligned} E_{T1} &= (1-R)E_0e^{i\omega t} \\ E_{T2} &= R(1-R)E_0e^{i(\omega t-\varphi)} \\ E_{T3} &= R^2(1-R)E_0e^{i(\omega t-2\varphi)} \end{aligned} \quad (3)$$

则透射光的合振幅可以表示为:

$$E_T = (1-R)E_0e^{i\omega t} [1 + Re^{-i\phi} + R^2e^{-i2\phi} + R^3e^{-i3\phi} + \dots] \quad (4)$$

由无穷等比数列求和公式:

$$S = \sum_{n=1}^{\infty} a_1q^{n-1} = a_1/(1-q) \quad (5)$$

则透射光可以表示为:

$$E_T = (1-R)E_0e^{i\omega t} [1/(1-Re^{-i\phi})] \quad (6)$$

根据光强的定义 $I=|E|^2$,则透射光的光强可以表示为:

$$I = E_0^2 \frac{1}{1+4R/(1-R)^2\sin^2(\phi/2)} \quad (7)$$

设入射光的光强 $I_0=|E_0|^2$,则 F-P 腔的透射光传递函数可以表示为:

$$I/I_0 = 1/[1+4R\sin^2(\phi/2)/(1-R)^2] \quad (8)$$

根据所得到的 F-P 腔透射光传递函数可以对其谐振特性进行仿真分析。对于一个特定结构的 F-P 谐振腔,其前后端面的反射率一定,此处假设两者的反射率相同。通过仿真得到如图 2 所示的谐振特性曲线。

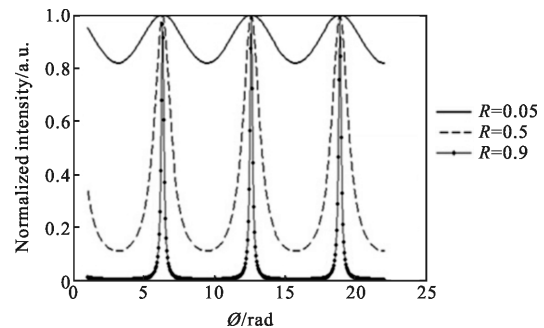


图 2 端面不同反射率对应的 F-P 谐振腔的输出特性仿真

Fig.2 Simulation of the F-P cavity output characteristics with different reflectivity

图 2 中得到了三种反射率下的谐振曲线, 对应的反射率 R 分别为 0.05、0.5 和 0.9。对于法珀标准具来说, 它的前后端镜片均为高反射率镜片, 反射率高达 0.98 以上。根据 F-P 腔的精细度公式:

$$F = \frac{4R}{(1-R)^2} \quad (9)$$

可知, 端面的反射率 R 越大, 精细度 F 就越大。因此, 对于法布里-珀罗标准具来说具有极高的精细度。而随着反射率 R 的减小, 精细度下降, 谐振谱线呈现出波纹状。

2 实验

2.1 F-P 腔参数测试

NKT Photonics 公司窄线宽(线宽 1 kHz)激光器输出中心波长为 1 550 nm, 扫频系数为 15 MHz/V。首先确定 F-P 腔高度作为高度基准, 由于实验所用 F-P 标准具的高度固定不可调, 其他光路的高度调节需要以其作为参考。调节激光打到第一个三维调节支架全反镜上, 经过反射到达第二个三维全反镜上, 两个镜面相互平行, 高度相同, 且与激光成 45°角。调节激光使激光输出高度与 F-P 腔一致, 并且与腔轴平行, 空间光从 F-P 腔经过多次反射干涉输出, 调节光电探测器 PD 接收至示波器屏幕上得到最大探测值, 光电探测器为 New Focus 公司可调光电探测器 Model 2053, 带宽为 10 MHz, 最大转换增益为 18.8×10^6 V/W, 示波器为 Tektronix 公司 DPO4104B Digital phosphor oscilloscope, 带宽为 1 GHz, 采样率为 5 GS/s。SG 为可调多波形输出信号发生器, 设定扫描波形为三角波, 此三角波作为后面计算所用的标准标定波, 电压参数设置 V_{p-p} 为 1 V, 频率设定为低频 10 Hz。使用高压放大器 HV 对 F-P 腔的 PZT 端口进行扫频。F-P 腔光参数测定实验, 方案如图 3 所示。

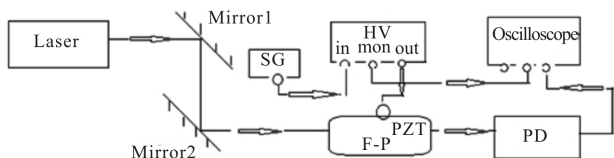


图 3 F-P 腔参数测定方案

Fig.3 Experimental schematic of F-P cavity

2.2 自由谱宽、半高全宽、精细度、品质因数的实验标定

自由谱宽(Free Spectral Range, FSR)指的是透射

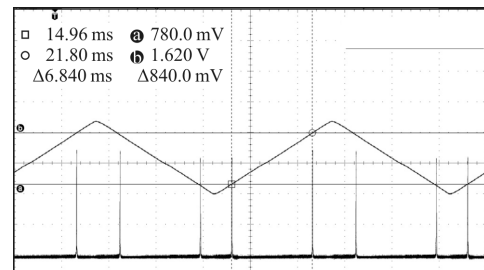
光谱线中相邻的两个谐振模式之间波长或者频率之间的间隔。测试时需要调整高压放大器 HV 的电压偏置 Bias。当调节 Bias 时, 发现屏幕中相邻的两个谱线之间的距离保持不变, 锁定任意其中两个, 如图 4(a)所示。调节 HV 电压偏置 Bias 和增益 Gain, 使 F-P 的两个透射谱峰位于三角波的同一个半个周期中, 这样就会有压差, 否则无压差, 此时测到的才是真正的 FSR。实验中使用的激光器的 PZT 扫频参数为 15 MHz/V, 表示对激光器的 PZT 施加 1 V 的扫频电压, 激光器的输出频率改变 15 MHz。使用的数字高压直流放大器 HV 监控输出 MON 衰减 100 倍。

经过测试, 图 4(a)中①、②两个光标所在处的电压值分别为 780 mV、1.62 V, 则压差为 $\Delta V = 1\ 620 - 780\ \text{mV} = 840\ \text{mV}$, F-P 腔的自由谱宽为:

$$FSR = 840\ \text{mV} \times 15\ \text{M/V} \times 100\ \text{Hz} = 1.26 \times 10^9\ \text{Hz} \quad (10)$$

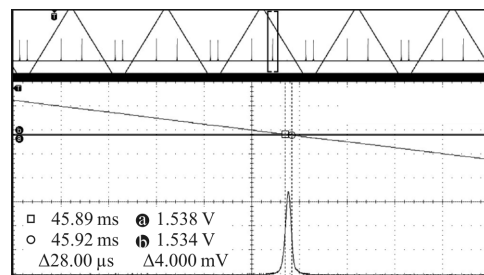
据自由谱宽公式 $FSR = c/(2nL)$, 折射率 $n=1$, 可推知 F-P 腔长 L 为 11.9 cm。

如图 4(b)所示, ③、④光标所在处的电压值分别为



(a) 采用三角波对激光器 PZT 扫频

(a) Laser PZT is scanned by using triangular wave



(b) F-P 腔半高全宽测试

(b) Test of the full width at half maximum

图 4 使用三角波对激光器 PZT 进行扫描以及 F-P 腔的半高全宽测试

Fig.4 PZT is scanned by using a triangle-wave and test of the FWHM of F-P cavity

1.538 V、1.534 V, 则同样根据激光器的扫频参数计算 F-P 透射腔谱线的半高全宽 (the Full Width at Half Maximum, FWHM) 为:

$$FWHM=4.0 \text{ mV} \times 15 \text{ M/V} \times 100 \text{ Hz}=6.0 \times 10^6 \text{ Hz} \quad (11)$$

精细度 F (Fineness) 定义为光学谐振腔的自由谱宽与谱线谐振线宽的比值:

$$F=FSR/FWHM=210 \quad (12)$$

精细度为一无量纲常数, 与光学谐振腔的品质因数和自由谱宽密切相关, 是光学谐振腔的一个非常重要的参数, 精细度决定了光学谐振腔的噪声^[8-10]。又因为精细度反映了腔的分辨率, 精细度 F 也可定义为, $F=\pi\sqrt{R}/(1-R)$, 代入 $F=210$, 可知腔镜的反射率 R 为 0.985, 反射率越大越好。

品质因数定义为:

$$Q=\omega U/P=-\omega U/(dU/dt)=\omega\tau$$

式中: ω 为光学谐振腔的谐振角频率 ($\omega=2\pi\nu_0$, ν_0 为谐振光波的频率); U 为光学谐振腔内储存的总光能; $P=-dU/dt$ 表示单位时间光能的损耗; τ 为光子在光学谐振腔中的寿命。品质因数 Q 也可用下式表示:

$$Q=\frac{\nu_0}{FWHM}=\frac{193 \times 10^{12}}{6.0 \times 10^6}=3.22 \times 10^7 \quad (13)$$

2.3 F-P 腔扫频参数的标定

2.3.1 利用扫频三角波测压差法

据图 5 测得 F-P 腔第二个透射谱线对应的正弦

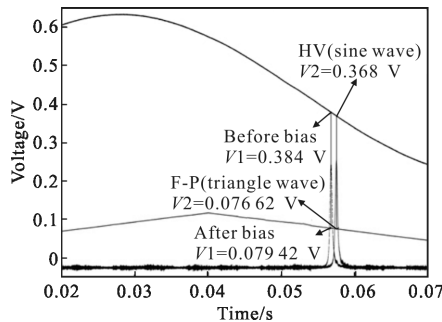


图 5 用三角波测试扫频参数曲线

Fig.5 Testing curves of the sweeping parameter with triangular wave

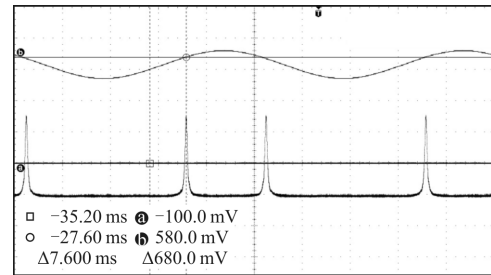
波电压为 368 mV, 对应的三角波电压为 0.076 62 V, 调节高压放大器偏压改变使 F-P 腔峰值左右偏移一个范围, 测得同样第二个峰值对应正弦波电压和三角波电压分别为 384 mV、0.079 42 V, 所以据激光器的扫频参数 15 MHz/H, 计算扫过的频率范围, 然后据 F-P 腔所扫过的电压差值计算 F-P 腔的扫频参数。

$$K=\frac{(384-368) \times 10^3 \times 15 \text{ MHz/V} \times 100}{(0.079 42-0.076 62) \times 100}=8.57 \text{ MHz/V} \quad (14)$$

扫频常数 K 定义为对 F-P 腔 PZT 加上 1 V 的扫描电压所对应的频率变化值。

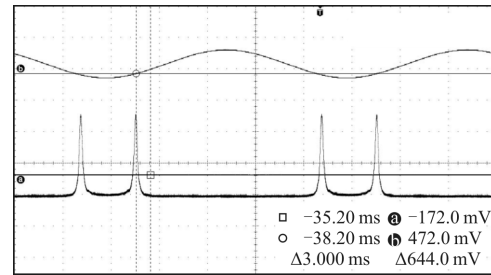
2.3.2 利用直线电平测试法

测试方法: 先由激光器的扫频曲线结合激光器的扫频参数得到两次不同位置透射谱的频率差值, 再测量透射谱两次不同位置所使用的对 F-P 扫描的高压放大器电压差值, 两者比值即为 F-P 的扫频常数, 原理与第一种方法相同。只不过不同的是精度从理论分析上有所提高, 因为这种方法扫频求 F-P 腔的压差为直线电平而不是三角波。图 6 为锁定光标 ① 来跟踪激光器的正弦波扫频曲线, 用来测试对应 F-P 标准具的同一透射峰两次不同电压。



(a) 光标 ① 跟踪同一透射峰第一次电压值

(a) Peak voltage of the same transmission is tracked with cursor ① for the first time



(b) 光标 ① 跟踪同一透射峰第二次电压值

(b) Peak voltage of the same transmission is tracked with cursor ① for the second time

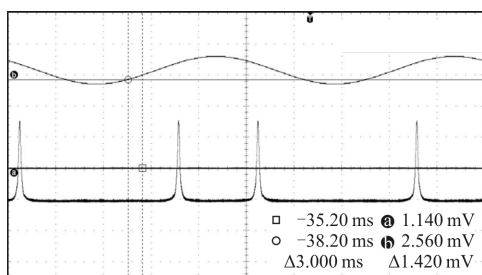
图 6 锁定光标 ① 跟踪激光器的正弦波扫频曲线对应 F-P 标准具同一透射峰两次不同电压值

Fig.6 Cursor ① tracks two different voltages of the same transmission peak using sine wave sweep

由图 6 可知, 从正弦波为激光器的扫描监控曲线得到:

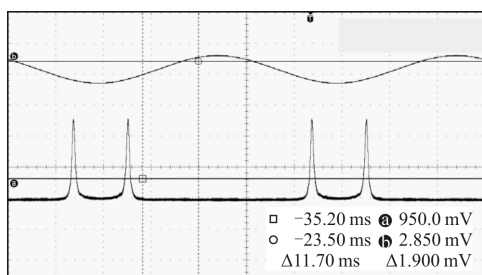
$$\Delta V_1=b_1-b_2=580 \text{ mV}-472 \text{ mV}=108 \text{ mV}$$

实验中先让 F-P 透射波形稳定, 测出某一个透射峰对应的正弦波电压值 1 和此时 F-P 所对应的监控电压值 1, 测量时一定要注意不同颜色的波形使用光标定位时一定要一致, 然后调节 F-P 的高压放大器偏置 Bias 使透射谱向左或者向右偏移, 再用同样的方法测出同一个透射谱对应的正弦波的新电压值 2 以及偏置后 F-P 的 MON 监控电压 2, 同样求压差。不使用任何信号电压(包括三角波、正弦波)扫描 F-P 腔, 直接测量 F-P 腔的高压放大器监控直线电平, 优点是克服第一种方法激光器的扫频 MON 输出监控电压与 F-P 腔扫频 MON 输出电压很难同时稳定, 即使稳定下来, F-P 腔也不再左右摆动, 无法测出两个不同时间的电压差。图 7 为利用示波器光标①来跟踪激光器的正弦波扫频图, 用来测试对应 F-P 标准具同一透射峰两次不同电压。



(a) 光标①第一次测试所在位置直线电压

(a) Test of the straight line voltage of cursor ① for the first time



(b) 光标①第二次测试所在位置直线电压

(b) Test of the straight line voltage of cursor ① for the second time

图 7 锁定光标①跟踪激光器的正弦波扫频曲线对应 F-P 标准具同一透射峰两次不同的直线电压值

Fig.7 Cursor ① tracks two different linear voltage values of the same transmission peak using sine wave sweep

由图 7 可知, 从 F-P 腔高压放大器监控曲线得到电压差:

$$\Delta V_2 = a_1 - a_2 = 1\,140\text{ mV} - 950\text{ mV} = 190\text{ mV}$$

故也可求得扫频常数:

$$K = \frac{\Delta V_2 \times 15\text{ MHz/V} \times 100}{\Delta V_1} = 8.53\text{ MHz/V} \quad (15)$$

3 结论

通过设计测试方案, 利用泰克 DPO40B 四通道, 1 GHz 带宽, 采样率 5 Gs/s 高性能数字存储示波器全面对法布里-珀罗标准具的相关参数进行了标定, 得到其自由谱宽为 1.26×10^9 Hz, 谱线宽度为 6×10^6 Hz, 精细度为 210, 品质因数为 3.22×10^7 , 扫频常数为 8.5 MHz/V 的结果。文中避免了难度较大的光学测试调节要求, 快速准确地完成了 F-P 腔的各项光学参数的标定。利用法布里-珀罗标准具独有的精细功能及扫频常数, 可作为其他光谱测量的参考标准。

参考文献:

- [1] Yang Haijing, Wang Yanhua, Zhang Tiancai, et al. Modulation-free frequency stabilization of a laser based on a confocal Fabry-Perot cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(3): 316-320. (in Chinese)
杨海菁, 王彦华, 张天才, 等. 基于共焦法布里-珀罗腔的无调制激光频率锁定[J]. *中国激光*, 2006, 33(3): 316-320.
- [2] Qu Ronghui, Cai Haiwen. Narrow linewidth lasers with high stability [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1033-1038. (in Chinese)
瞿荣辉, 蔡海文. 高稳定度窄线宽激光器的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(6): 1033-1038.
- [3] An Panlong, Zheng Yongqiu, Li Xiaofeng, et al. Accuracy test of output wavelength of narrow linewidth laser by using F-P cavity to squeeze its linewidth [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3257-3261. (in Chinese)
安盼龙, 郑永秋, 李小枫, 等. F-P 腔锁频压窄窄线宽激光器输出波长精度测试 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3257-3261.
- [4] Yang Mingzhen, Guan Wenxiang, Wang Yucheng. The manufacture and adjustment methods of F-P interferometer [J]. *Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition)*, 1980, 2: 16-21. (in Chinese)
杨铭珍, 关文祥, 王玉成. 法布里-珀罗干涉仪的制作和调节方法[J]. *辽宁师范大学学报(自然科学版)*, 1980, 2: 16-21.

- [5] Liu Shengju, Cao Junqing. Research on Fabry-Perot etalon [J]. *College Physics*, 2003, 22(6): 26-28. (in Chinese)
刘盛举, 曹俊卿. 关于法布里-珀罗标准具的研究[J]. 大学物理, 2003, 22(6): 26-28.
- [6] Lu Honggang, Jiang Yanyi, Bi Zhiyi. Measurement of reflectivity of optical mirrors using laser phase modulation and fineness of Fabry-Prot cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(12): 1675-1679. (in Chinese)
鲁红刚, 蒋燕义, 毕志毅. 激光相位调制法布里-珀罗腔精细度法测定反射率 [J]. 中国激光, 2006, 33 (12): 1675-1679.
- [7] Han Naiqian, Wu Deming, Xie Linzhen. A study on high quality F-P cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 17(12): 1735-1741. (in Chinese)
韩乃骞, 吴德明, 谢麟振. 高性能法布里-珀罗腔的研究 [J]. 光学学报, 1997, 17(12): 1735-174.
- [8] An Panlong, Zheng Yongqiu, Li Xiaofeng, et al. Locked frequency accuracy experiment of transmission spectrum of F-P cavity under different sweep frequencies [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(4): 713-719. (in Chinese)
安盼龙, 郑永秋, 李小枫, 等. F-P 腔不同扫频段透射谱锁频精度实验 [J]. 应用光学, 2014, 35(4): 713-719.
- [9] Zhang Jianhui, An Panlong, Xu Pengfei, et al. The ripple noise in the phase modulation and demodulation system of optical micro-cavities [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(1): 42-47. (in Chinese)
张建辉, 安盼龙, 徐鹏飞, 等. 光学微腔相位调制解调系统中的纹波噪声 [J]. 光电工程, 2014, 41(1): 42-47.
- [10] Sun Xutao, Liu Jiqiao, Zhou Jun, et al. Confocal Fabry-Perot interferometer for frequency stabilization of laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(7): 1005-1008. (in Chinese)
孙旭涛, 刘继桥, 周军, 等. 激光稳频的共焦法布里-珀罗干涉仪 [J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1005-1008.