

文章编号: 0253-2239(2008)07-1296-05

# 可调波长半导体激光法布里-珀罗干涉仪

马骥驰<sup>1</sup> 李岩<sup>1</sup> 孙文科<sup>1</sup> 许婕<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 清华大学 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084; <sup>2</sup> 中国计量科学研究院, 北京 100013)

**摘要** 为了对激光干涉仪、高精度位移传感器等测量系统进行纳米级精度的非线性误差校准,需进一步提高中国计量科学研究院与清华大学合作研制的差拍 F-P 干涉仪的线性度、稳定性及测量范围。在合理分析空气折射率变化及 He-Ne 激光器纵模调谐范围等因素对测量的影响基础上,设计并制作了密封干涉光路的真空系统,并用调谐范围较大的半导体激光器作为工作激光器。实验结果表明,系统在大于 1/4 波长的行程范围内的线性度有明显的提高,最大非线性误差由 8.93 nm 减小至 1.19 nm。

**关键词** 纳米测量; 法布里-珀罗(F-P)干涉仪; 非线性误差校准; 可调谐半导体激光

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082807.1296

## Fabry-Pérot Interferometer Using Tunable Diode Laser

Ma Jichi<sup>1</sup> Li Yan<sup>1</sup> Sun Wenke<sup>1</sup> Xu Jie<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China  
<sup>2</sup> National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

**Abstract** In order to calibrate the nonlinear error of laser interferometers and high-precision displacement sensors with an accuracy of nanometer order, the linearity, stability and measurement range of the beat frequency Fabry-Pérot interferometer developed by National Institute of Metrology and Tsinghua University should be improved. Based on analysis of the influences of factors, such as the change of air refractive index and the tunable range of He-Ne laser, a vacuum system that airproofs the interference light path is designed and built, and a diode laser with a large tunable range is used to take place of the He-Ne laser. The experimental results show that the nonlinear error of the system in the range of longer than a quarter of the wavelength is reduced from 8.93 nm to 1.19 nm.

**Key words** nanometer measurement; Fabry-Pérot (F-P) interferometer; nonlinear error calibration; tunable diode laser

## 1 引言

目前,微位移的光学方法测量技术主要有外差干涉仪、偏振干涉仪、光栅干涉仪、法布里-珀罗(F-P)干涉仪和半导体激光调频干涉仪等。随着测量装置的改进和加工装配技术的发展,干涉仪的测量精度和抗干扰能力也在不断提高,如将正弦相位调制技术引入自混合干涉仪中,可在普通实验室噪声环境中达到纳米级的位移测量精度<sup>[1]</sup>;左芬等<sup>[2]</sup>提出了一种基于二维光栅衍射分光的同步移相干涉测

量系统,避免了在普通干涉测量系统的数据采集过程中振动的影响;禹延光等<sup>[3]</sup>报道的光反馈自混合干涉技术可实现大量程高分辨力振动位移测量。

随着纳米测量技术的发展,纳米量级非线性误差的校准成为必须面对的问题。发生在半个波长位移内的非线性误差广泛存在于单频、双频激光干涉仪中,在 10 nm 量级甚至更大,对纳米溯源的影响十分严重。中国计量科学研究院研制的差拍 F-P 干涉仪<sup>[4]</sup>利用拍频锁定方法,理论上可以得到极高

收稿日期: 2007-09-29; 收到修改稿日期: 2008-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(50410479,50575116)资助课题。

作者简介: 马骥驰(1984-),男,硕士研究生,主要从事激光与计量等方面的研究。E-mail: majichi@gmail.com

导师简介: 李岩(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事激光与计量等方面的研究。

E-mail: liyan@mail.tsinghua.edu.cn

的分辨力,但该差拍 F-P 干涉仪的测量不确定度和测量结果的稳定性均低于预期值。因此,本文在结构设计中采用了真空波纹管结构封闭 F-P 腔,并用调谐范围较大的半导体激光器代替原系统中的 He-Ne 激光器,取消了测量过程中的换模锁定环节,保证了测量的精度,扩大了系统的量程。

## 2 改进后的实验系统

### 2.1 非线性误差校准系统的构成

图 1 为差拍 F-P 非线性误差校准系统结构,图中实线框为真空密封腔,虚线框内为 DL100 可调谐半导体激光器控制箱前面板上的几个模块。

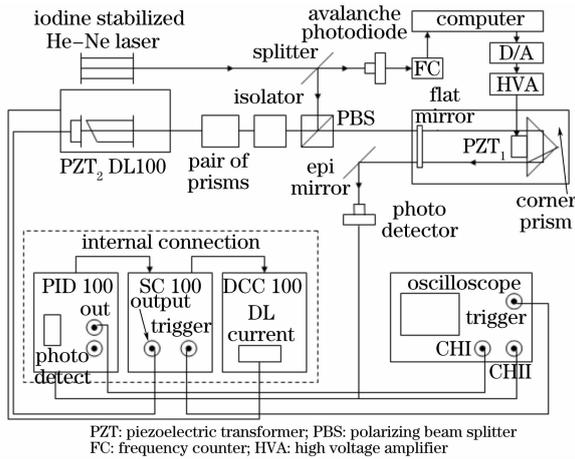


图 1 差拍 F-P 非线性误差校准系统结构

Fig. 1 Structure of beat frequency Fabry-Pérot nonlinear error calibration system

原系统使用的 He-Ne 激光器的调谐范围有限<sup>[4]</sup>,纵模间隔约 750 MHz,当进行连续测量时,激光器的跳模引起拍频值紊乱,使 F-P 干涉仪不能正常工作,限制了量程。本文使用德国 Toptica 公司生产的 DL100 可调谐半导体激光器,中心波长为 630 nm,可通过调节温度、电流、光栅角度在 ±7 nm 范围内获得任意波长值。该激光器是光栅外腔 Littrow 自准直结构<sup>[5]</sup>,通过转动光栅可改变馈入激光二极管(LD)的光波长,从而实现调谐。

若用波长计测量该激光器的调谐范围,可发现在 632.9989~633.9929 nm 内未发生跳模,对应的光频变化量  $\Delta\nu=2.25$  GHz,足以在大于  $\lambda/2$  的位移范围内连续拍频,完全适用于对差拍 F-P 干涉仪进行量程扩展。

### 2.2 F-P 干涉仪输出锁定原理

原系统用锁定放大器将 F-P 干涉仪的输出锁定在极大值上,得到的测量公式(即 F-P 腔长度变

化  $\Delta L$  与光频变化量  $\Delta\nu$  的关系)如下<sup>[6]</sup>:

$$\Delta L = \frac{\lambda}{4} \Delta N - \frac{\lambda}{4} \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_F}, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为激光光波长,  $\Delta N$  为整数干涉级次,  $c$  为光速,  $\Delta\nu_F = c/4L$  为折叠式 F-P 腔的自由光谱区,  $L$  为 F-P 腔的长度。

由于 DL100 激光器内控制光栅角度的压电陶瓷所需的驱动电压无法与原系统中锁定放大器与高压放大器的输出匹配,故采用 PID 控制器将 F-P 干涉仪的输出锁定在某一固定光强值上,因而测量公式将发生相应的变化。

设 F-P 干涉仪的最大输出光强为  $I_0$ , 锁定点处的光强为  $I_0/\beta$  ( $\beta > 1$ ), 由 F-P 腔输出功率曲线的数学描述  $I(\nu) = \frac{I_0}{1 + F \sin^2[\pi\nu/(\Delta\nu_F)]}$  ( $F$  为 F-P 干涉仪的精细度), 推导可得

$$\Delta L = \frac{\lambda}{4} \Delta N - \frac{\lambda}{4} \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_F} + \frac{\arcsin \sqrt{(\beta-1)/F}}{4\pi} \Delta\lambda. \quad (2)$$

实验过程中  $\Delta\nu$  不超过 1 GHz,  $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c} (\Delta\nu)^2 < 1.34 \times 10^{-12}$  m, 而  $\left| \frac{\arcsin \sqrt{(\beta-1)/F}}{4\pi} \right| < \frac{1}{8}$ , 故(2)式中最后一项不超过 0.001 nm, 对测量精度的影响可忽略。

### 2.3 环境因素影响的减弱

#### 2.3.1 空气折射率变化对位移测量的影响

利用 F-P 干涉仪拍频锁定方法进行位移测量时,激光波长锁定于空气 F-P 干涉仪的透过极大值上,此时有<sup>[4]</sup>

$$2nL_0 = K\lambda_0, \quad (3)$$

式中  $n$  为空气折射率,  $L_0$  为 F-P 干涉仪的几何腔长,  $K$  为干涉级次,  $\lambda_0$  为测量时激光的真空波长值。

由(3)式可得,由于空气折射率变化量  $\Delta n$  对位移测量结果  $\Delta L$  的影响为

$$\Delta L = \frac{K\lambda_0}{2n^2} \Delta n, \quad (4)$$

设  $n=1.00027$ ,  $\lambda_0=632.8$  nm,  $L=100$  mm, 那么当  $\Delta n \approx 1 \times 10^{-8}$  时,  $\Delta L \approx 1$  nm。可见,折射率在这个数量级上的变动,对纳米精度的测量已难以接受。

在真空度较高的环境中,环境温度变化量和空气折射率变化量之间的函数关系由 Lorentz-Lorenz 公式<sup>[7]</sup>:

$$\alpha = \frac{3}{4\pi N} \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}, \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为平均极化率,  $N$  为系统包含分子数。将(5)

式适当变形,并令摩尔折射率  $A = \frac{4\pi}{3}N_m\alpha$  ( $N_m$  为阿佛加德罗常量),得

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{Ap}{RT}, \quad (6)$$

式中  $p$  为空气压强,  $T$  为绝对温度,  $R$  为普适气体恒量。

实验数据表明,对于空气,当气体压强改变时,摩尔折射率  $A$  的值变化不大,约为  $(4.6 \sim 4.8) \times 10^{-6} \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{Pa})$ 。由  $n \approx 1$  得  $n^2 + 2 \approx 3$ ,代入(6)式并取微分,得

$$\Delta n = \frac{1.5Ap}{RT^2} \Delta T, \quad (7)$$

式中  $\Delta T$  为绝对温度变化量。

根据(7)式,设  $\Delta T = 1 \text{ K}$ ,若要求空气折射率  $n$  的变化量小于  $10^{-9}$ ,那么对密封系统真空度的要求

为  $p = 1.03447 \times 10^2 \text{ Pa}$ 。可见,在温度变化不大的实验室环境下,空气折射率达到足够高的稳定度时,所需的真空度依然容易实现。所以将 F-P 腔封闭在真空环境中来控制空气折射率的变化是可行的。

### 2.3.2 真空光路密封系统结构设计

系统的真空光路密封系统结构如图 2 所示<sup>[9]</sup>。腔镜和密封窗口、波纹管、真空法兰及其接管,共同构成了一个真空密封腔,其中腔镜和折叠 F-P 干涉仪的角隅棱镜构成折叠式 F-P 腔(图 1 实线框内部分);密封窗口镜与被测干涉仪的角隅棱镜也构成一个折叠结构,但密封窗口两侧均为增透膜,不能形成高反,因而并不构成 F-P 腔。密封窗口镜与被测干涉仪的角隅棱镜组合在一起,作为被测干涉仪的位移输出部分。

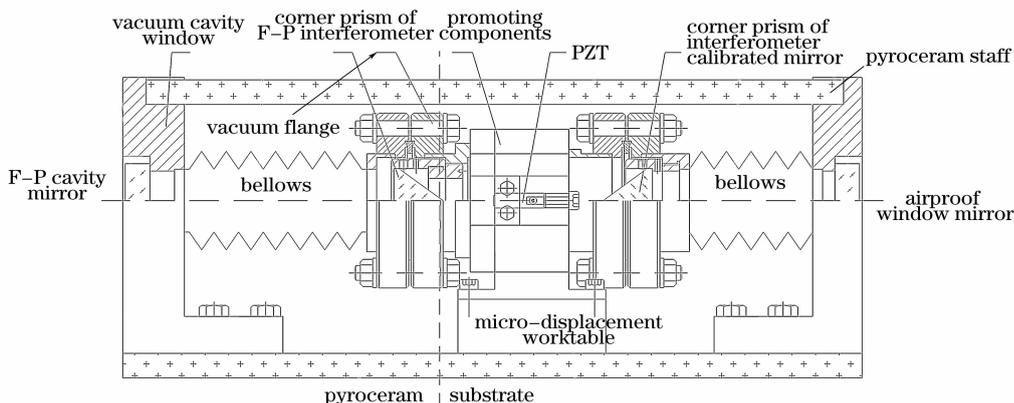


图 2 用于差拍 F-P 干涉仪系统的真空光路密封及传动系统

Fig. 2 Airproof light path and the transmission system for beat frequency F-P interferometer system

### 2.3.3 系统设计中的关键技术

系统运动时带动处于真空状态的 F-P 腔伸长和缩短,采用对称布置真空腔端窗的方式卸载大气压力,真空腔的端窗通过螺纹连接,固定在微晶玻璃基底上,推动部件带动角锥棱镜运动时,所需克服的作用力只有两方向波纹管互相抵消作用后的残余作用力,大气压力则由微晶玻璃基底承担。经过这样的设计,系统整体刚度约为  $1.6 \text{ N}/\text{mm}$ 。

系统的运动机构要求具有大的行程和纳米量级分辨力。为了解决行程和分辨力之间的矛盾,采用了微位移工作台和压电陶瓷结合的两级传动的方式,如图 2,推动部件、压电陶瓷、微位移工作台构成了两级传动系统,大行程由微位移工作台提供,高分辨力由压电陶瓷保证。

### 2.3.4 系统参量的选择

影响 F-P 干涉仪测量精度的参量主要是自由光

谱区(FSR)和精细度  $F$ <sup>[9]</sup>,图 2 中 F-P 腔腔镜外表面镀  $632.8 \text{ nm}$  增透膜,残余反射率  $1\%$  以内,而内表面镀  $632.8 \text{ nm}$  高反膜,反射率  $88.7\%$ ,内外表面夹角  $10'$ 。折叠 F-P 干涉仪的角隅棱镜底面镀  $632.8 \text{ nm}$  增透膜,残余反射率  $0.5\%$  以内,三个直角面镀铝后覆氧化硅膜保护,三个直角面夹角允差  $\pm 1''$ 。反射光在折叠 F-P 干涉仪的角隅棱镜底面上的入射点不同,镜体内光程也相应不同,F-P 腔腔长  $L$  不能直接测量,安装前预设计为  $L = 100 \text{ mm}$ 。由上述数据可得:满量程范围为  $750 \text{ MHz}$ ,  $F = 26.2$ ,从而系统的线宽  $\Delta\nu_c = 28.6 \text{ MHz}$ ,灵敏度  $S = 4.74 \text{ MHz}/\text{nm}$ 。实测数值与此相近。

## 3 实验结果与分析

本系统的目标拟达到非线性优于  $1 \text{ nm}$ ,而目前

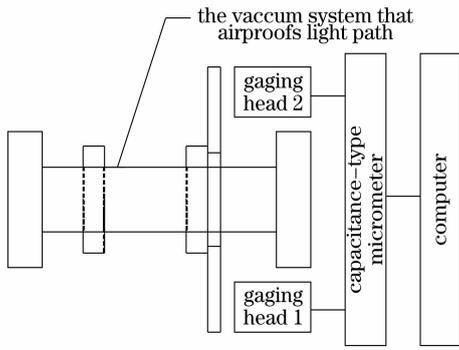


图 3 非线性误差校准系统与电容测微仪比对示意图

Fig.3 Sketch of the comparison experiments of the nonlinear calibration system and capacitance-type micrometer

没有仪器的精度足以对本系统直接检测。通过与电容式测微移的大量比对实验,可得到系统性能的可参照结果。实验装置示意如图 3。

实验所用的电容式测微仪的量程约为 20 μm, 刻度值为 10 nm。测微仪的主放大器输出端连接示波器,电容测微仪测头通过专用夹具与 F-P 腔动镜构成传感器两极板。将电容测微仪的模拟量输出端连接数字电压表,可获得更精确的读数,计算机同时读取系统位移及电容式测微仪模拟电压输出。实验结果如图 4 所示。

对实验数据进行线性拟合  $y=a+bx$ ,并计算各测量点  $Y_i$  与最小二乘估计值  $y_i$  的差值  $v_i$ ,求出最大非线性误差  $\Delta y_{max}$ 。结果如表 1。

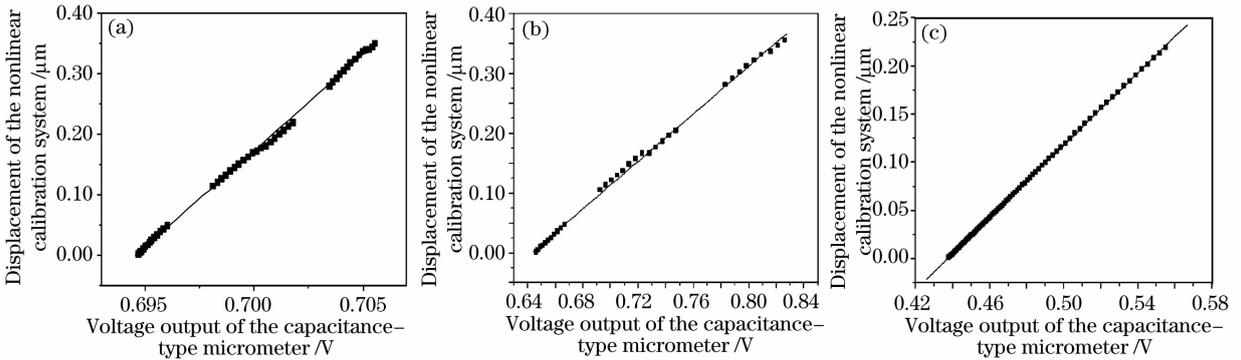


图 4 实验结果。(a)使用 He-Ne 激光器,未抽真空,(b)使用 He-Ne 激光器,抽真空后,(c)使用半导体激光器,抽真空后  
Fig.4 Experimental results. (a) He-Ne laser is used,F-P cavity is not vacuumized, (b) He-Ne laser is used,F-P cavity is vacuumized, (c) tunable diode laser is used, F-P cavity is vacuumized

表 1 比对实验数据线性拟合结果

Table 1 Linear fitting of the comparison experimental results

Number	Coefficient		Correlation coefficient $r$	Fitting standard deviation $s$	Overall displacement / μm	$\Delta y_{max}/nm$
	$a$	$b$				
1	-21.67339	31.20749	0.996	$9.81 \times 10^{-3}$	0.3504	8.93
2	-1.27818	1.9878	0.99919	$4.89 \times 10^{-3}$	0.3558	3.86
3	-0.82058	1.87623	0.99996	$5.41477 \times 10^{-4}$	0.20694	1.19

对比图 4(a),图 4(b)的结果可见,F-P 腔抽真空对系统的线性度影响很大。图 4(b)中实测曲线在  $Y=0.16 \mu m, Y=0.32 \mu m$  附近,即  $\lambda/4$  整数倍处出现“拐点”,原因是 He-Ne 激光器调谐范围有限(约 750 MHz)。图 4(c)中曲线中未出现拐点,可见在取消了换模锁定的步骤后,系统在大于  $\lambda/4$  的测量范围内线性度明显提高,并且由于解决了频率计自动换档的问题,测量点间的跳跃被消除。系统行程未能达到  $\lambda/2$  的原因是频谱仪与频率计的量程限制(约 500 MHz),若能更换量程超过 1.5 GHz 的光电探测器与频谱仪,系统的行程完全可以突破半波长。

为了使系统能够应用于更多的校准场合,用步

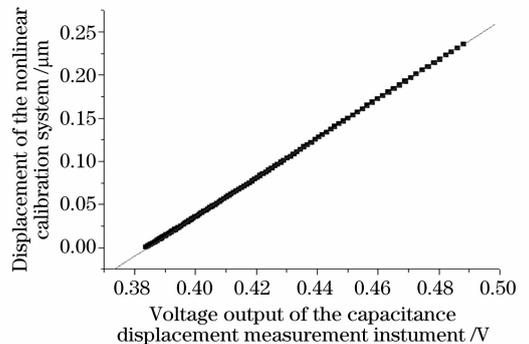


图 5 大范围改变 F-P 干涉仪腔长后的比对实验结果  
Fig.5 Comparison experimental results after the length of the F-P cavity is changed by 5 mm

进电机大范围改变 F-P 干涉仪的腔长,在  $\Delta L \approx 5 \text{ mm}$  处停止,再用 PZT<sub>1</sub> 实现微位移,并与电容测微仪比对,结果如图 5。

对图 5 的数据进行线性拟合,结果为  $y = -0.87108 + 2.26712x$ ,相关系数  $r = 0.99995$ ,计算各测量点  $Y_i$  与最小二乘估计值  $y_i$  的差值  $v_i$ ,求得  $\Delta y_{\max} = 0.00107 \mu\text{m}$ 。本次测量的系统行程为  $0.2309 \mu\text{m}$ 。

由此可见,本系统在间隔较远的两位置分别测量均可获得很高的线性度。因此,如果与大范围激光干涉仪配合,本系统可以在  $5 \text{ mm}$  的大行程内对被检仪器进行纳米精度的非线性误差校准。

## 4 结 论

在中国计量科学研究院与清华大学合作研制的差拍 F-P 干涉仪的基础上,设计了采用光路真空密封的真空系统,并以调谐范围较大的 DL100 半导体激光器代替 He-Ne 激光器,通过与电容式测微仪的比对,验证了系统在大于四分之一波长的测量范围内,非线性误差由  $8.93 \text{ nm}$  减小至  $1.19 \text{ nm}$ 。通过步进电机大范围改变腔长,扩展了系统的应用范围。

目前系统使用的拍频光电信号探测器的截止频率为  $1 \text{ GHz}$ ,频谱仪的可观测的拍频范围约为  $500 \text{ MHz}$ ,限制了系统的行程。从半导体激光器调谐范围的实测数据可见,若能更换量程约  $2 \text{ GHz}$  的光电探测器与频谱仪,系统的行程完全可以突破半波长,甚至达到  $0.6 \mu\text{m}$ 。此外,增大 F-P 腔的精细度可提高频率锁定精度,从而进一步降低系统的非线性误差。

## 参 考 文 献

- 1 Guo Dongmei, Tan Suqing, Wang Ming. Analysis of micro-displacement measurement accuracy in self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 845~850  
郭冬梅,谈苏庆,王 鸣. 正弦相位调制自混合干涉微位移测量精度分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 845~850
- 2 Zuo Fen, Chen Lei, Xu Chunsheng. Simultaneous phase-shifting interferometry based on two-dimension grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 663~667  
左 芬,陈 磊,徐春生. 基于二维光栅分光的同步移相干涉测量技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 663~667
- 3 Yu Yanguang, Guo Changying, Ye Huiying. Vibration measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1430~1434  
禹延光,郭常盈,叶会英. 基于适度光反馈自混合干涉技术的振动测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1430~1434
- 4 Chao Zhixia, Xu Jie, Xu Yi. Fabry-Perot interferometer used for large range nanometer measurement [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1999, **20**(4): 241~245  
晁志霞,许 婕,徐 毅. 用于大范围纳米测量的法布里-珀罗干涉仪[J]. *计量学报*, 1999, **20**(4): 241~245
- 5 Guan Ye, Huang Guilong, Huang Xueren *et al.*. Construction of the tunable diode laser based on Littrow configuration[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 31~34  
管 桦,黄贵龙,黄学人 等. 基于 Littrow 结构的可调谐半导体激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 31~34
- 6 Yu Zaiquan, Xu Yuxian, Xu Yi *et al.*. Fabry-Pérot interferometer with large range and high resolution[J]. *Optical Technology*, 2000, **26**(3): 199~201  
余载全,徐毓娴,徐 毅 等. 大范围高分辨力法-珀干涉仪[J]. *光学技术*, 2000, **26**(3): 199~201
- 7 Max Born, Emil Wolf. *Principles of Optics, Electromagnetic Theory for Propagation, Interference and Diffraction of Light* [M]. 7th ed., Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 92~95
- 8 Xu Yi, Ye Xiaoyou, Li Chengyang *et al.*. A Fabry-Perot interferometer for measuring micro-displacement [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1993, **14**(2): 94~98  
徐 毅,叶孝佑,李成阳 等. 测量微位移的法-珀干涉仪[J]. *计量学报*, 1993, **14**(2): 94~98
- 9 Sun Wenke, Xu Jie, Yin Chunyong *et al.*. The study of improving on measured precision of heterodyne Fabry-Perot interferometer [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(4): 288~291  
孙文科,许 婕,殷纯永 等. 提高差拍法布里-珀罗干涉仪测量精度的研究[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(4): 288~291