

基于直接相位解调的双光纤法布里-珀罗位移传感器

郭晶晶 黎敏 童斌

(武汉理工大学物理系, 湖北 武汉 430070)

摘要 条纹计数法解调精度受限, 而常用的高精度外差调频解调法(如相位生成载波法、线性调频法), 在光源调频过程中伴有幅度调制并且调制解调系统复杂。提出了一种基于双光纤光路相位解调的法布里-珀罗(F-P)位移传感器, 原理上省去了光源调频过程, 在提高检测精度的同时, 成本与条纹计数法相当。与已有报道的双光路结构不同的是, 该传感器对两干涉光路之间相位差无严格要求, 安装调节简单, 降低了传感器的工艺难度。位移测量实验结果表明, 该传感器在 $0\sim 500\ \mu\text{m}$ 的测量范围内, 线性度为 1.1% , 误差限值为 $\pm 3\ \mu\text{m}$ 。

关键词 传感器; 光纤位移传感器; 双光纤法布里-珀罗干涉仪; 直接相位解调; 条纹计数法

中图分类号 TP212.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0805005

Dual-Fiber Fabry-Perot Displacement Sensor Based on Direct Phase Demodulation

Guo Jingjing Li Min Tong Bin

(Department of Physics, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract To overcome the accuracy limits of fringe counting method for a Fabry-Perot (F-P) interferometer and the complexity of a higher resolution demodulation system such as phase generated carrier (PGC), linear frequency modulation (LFM) and heterodyne frequency modulation, where residual amplitude modulation always exists in frequency modulation, a dual-fiber F-P displacement sensor based on double-fiber phase demodulation is presented. The proposed demodulation scheme eliminates the modulation on light source, improves the accuracy, and keeps the system cost as low as that of the fringe counting method. Compared with the reported dual-fiber F-P structure, this design has no strict requirement for a specific phase difference between the two interference paths, which makes it more feasible for manufacturing. Experimental results demonstrate a good linearity of 1.1% and a resolution of $\pm 3\ \mu\text{m}$ within a measuring range of $0\sim 500\ \mu\text{m}$ for the sensor system.

Key words sensors; optical fiber displacement sensor; double-fiber Fabry-Perot interferometer; direct phase demodulation; fringe counting

OCIS codes 060.2300; 060.2370; 060.2310

1 引言

光纤法布里-珀罗(F-P)传感器因其灵敏度高、可单端检测和便于解调等优点, 被广泛应用于大坝、桥梁和大型机械的安全监测以及石油和军事等领域。光纤 F-P 传感器可以采用光强度解调和相位解调两种方法来实现测量。光强度解调法存在的主要问题是光源波动和环境噪声的影响较大、测量精度较低^[1]。相比之下, 相位解调法具有受光源波动影响小、精度高和动态范围大的优点, 成为目前被普

遍采用的方法。

目前, 光纤 F-P 传感器常用的相位解调方法有傅里叶变换法、条纹计数法、相位生成载波法(PGC)和线性调频(锯齿波或三角波调制)外差法等, 这些方法都很成熟, 但仍有其各自的局限性。例如, 基于傅里叶变换的相位解调方案^[2]假设光源是光谱各波长辐射强度相同的理想宽带光源, 与通常光源辐射光谱近似呈高斯分布不符; 同时, 该方法在解调过程中容易出现频谱混叠现象, 造成严重误差。而条纹

收稿日期: 2012-04-03; 收到修改稿日期: 2012-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(61177076)和中央高校基本科研业务费专项资金(121114002)资助课题。

作者简介: 郭晶晶(1991—), 男, 本科生, 主要从事光信息科学与技术等方面的研究。E-mail: 1278630522@qq.com

计数法一直以低成本占优,但是存在条纹判向难的问题。为解决该问题,文献[3,4]提出双光路干涉条纹计数法,根据两路具有 $\pi/2$ 固定相位差的干涉信号与条纹走向唯一的对应关系,解决了判向问题,并克服了光强漂移及外界干扰对输出的影响。但是,要求两光纤光路具有 $\pi/2$ 的固定相位差(对应约 400 nm 的光纤端面位置差),从工艺角度而言几乎无法实现;PGC 方案^[5~7]和线性调频外差法^[8]的共同缺点是光源在调频过程中伴有幅度调制^[9],既降低了解调精度,又增加了调制及解调系统的复杂性,增加了成本。Tong 等^[10]提出基于随机相位差的双 F-P 干涉仪结构,解决了双光路判向法要求 $\pi/2$ 固定相位差的问题,但是系统精度偏低,液位/位移分辨率为毫米量级,不能满足更高精度应用的要求。本文设计了一种基于双光纤 F-P 干涉仪的直接相位解调型位移传感器,利用双光纤光路和直接相位解调方案,从原理上省去了光源调频过程,简化解调方法。该传感器沿用了随机相位差的双光纤光路结构,由于对两干涉光路之间相位差亦无严格要求,降低了传感单元的加工难度,简化了安装和调试操作。

2 双光路 F-P 位移传感单元设计与直接相位解调原理

2.1 双光路 F-P 位移传感单元设计

两根光纤端面和被测物体表面构成双光纤 F-P 腔^[11],两路输出光信号具有固定的相位差(由两光纤端面的相对位置差确定)。图 1 是传感单元结构示意图,传感单元 F-P 腔由 A, B 两根同类型光纤与对应的被测件表面构成。为保证光纤端面距离固定并具有良好的抗扰动能力,实验采用 4 芯封装的光纤插芯结构(实际使用其中两根)。图 2 是放大的传感单元所用插芯端面照片。

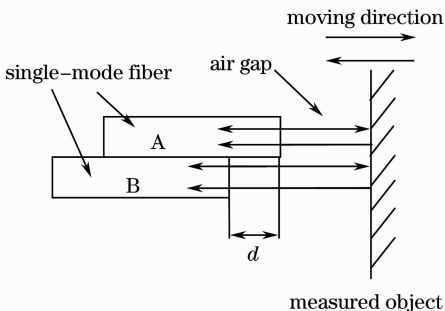


图 1 传感单元结构图

Fig. 1 Structure of the sensor unit

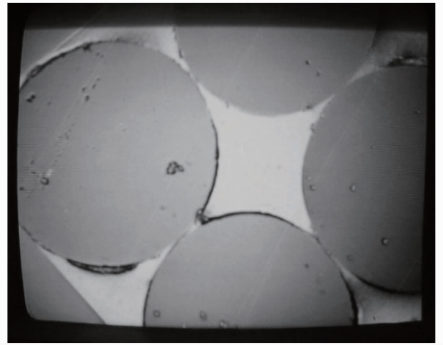


图 2 传感头插芯端面图

Fig. 2 End of ferrule in sensor head

端面的抛磨工艺误差决定了两光纤端面间的位置差 d ,即两个 F-P 腔之间的光程差为 $2d$,相位差 $x=4d\pi/\lambda$,又因为 d 是随机产生的,所以 x 是一随机差,是传感系统需要标定的参数。

2.2 双光路解调原理

滤掉直流项之后 A, B 两根光纤中的干涉信号光强分别为

$$I_A = \phi_A \cos \varphi(t), \quad (1)$$

$$I_B = \phi_B \cos[\varphi(t) + x], \quad (2)$$

式中 ϕ_A 和 ϕ_B 分别是两路信号的光强幅值, $\varphi(t)$ 是腔长变化引起的相位变化, x 是由光纤端面磨抛工艺产生的随机位置差,对于特定的传感单元为常数。分别对(1)式和(2)式求导得

$$I'_A = -\varphi(t)' \phi_A \sin \varphi(t), \quad (3)$$

$$I'_B = -\phi_B \varphi(t)' \sin[\varphi(t) + x]. \quad (4)$$

由(1)~(4)式计算得

$$I_B I'_A - I_A I'_B = \phi_A \phi_B \varphi(t)' \sin x. \quad (5)$$

将(5)式对时间 t 积分得

$$\int (I_B I'_A - I_A I'_B) dt = \phi_A \phi_B \varphi(t) \sin x. \quad (6)$$

由(1)~(6)式可以看出,经过以上变换后,腔长引起的相位变化 $\varphi(t)$ 可以从光强信号中直接提取出来。该方案借鉴了 PGC 解调方案的思想,而运算处理上相比 PGC 方法要简单许多。该方法降低了处理电路的复杂性及对处理芯片运算速度的要求,由于光源部分无需高频信号调制,解决了光源调频过程中伴有幅度调制的问题。此外,对两干涉光路之间相位差 x 无特定要求,安装调节简单,降低了生产传感单元的工艺难度。

2.3 消除光强衰减影响

在上述双光路直接解调方案的分析过程中,均忽略了实际干涉仪输出光强振幅随 F-P 腔长的变化而变化的现象。理论分析表明,干涉信号的振幅

与腔长的平方成反比,是一个随腔长增加而不断衰减的余弦函数。因而(1)式和(2)式中 ϕ_A 、 ϕ_B 均为时间的函数,对时间求导后,式中含 $d\phi_A/dt$ 、 $d\phi_B/dt$ 项,影响解调结果。

进一步的分析表明,上述问题实际上是一个判断干涉光强幅值的问题。根据(1)~(6)式可以看出,只要在进行微分前利用微处理器检测出光强幅值,并将其做归一化处理,问题就迎刃而解。本设计采用了一种基于施密特电路原理的幅值检测方法。图3是干涉光强信号幅值检测的原理图,其中C点到D点刚好是一个周期,即对应方波的两个上升沿。由于在一个周期内,峰值和谷值幅值基本相等,所以只要在此区间找出采样光强值中的最大值即幅值,然后将其传递给解调程序处理即可。

由于光强幅值是动态变化的,因此解调程序中对对应的光强幅值也需要动态更新,更新周期即为条纹变化周期。

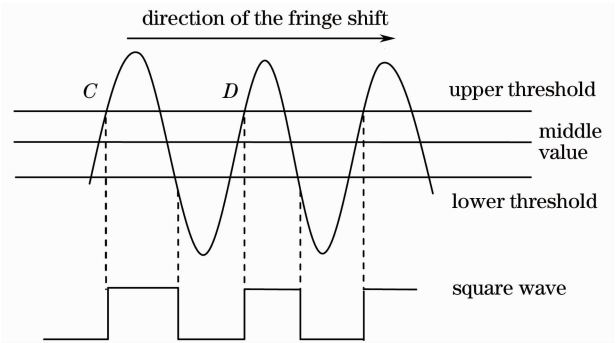


图3 信号幅值检测原理图

Fig. 3 Schematic diagram of amplitude detection

2.4 直接相位解调法的软件实现

运用微软基础类库(MFC)对实验方案进行了仿真验证。仿真程序包括5个主体模块,即可调信噪比 R_{SN} 的随机信号发生模块、模拟数字转换器(ADC)采样模块、被测件移动速度及方向产生模块、相位解调模块和显示模块,程序运行最后得到双光路直接相位解调方法对模拟位移量的检测结果。图4是所设计的仿真程序的流程图。

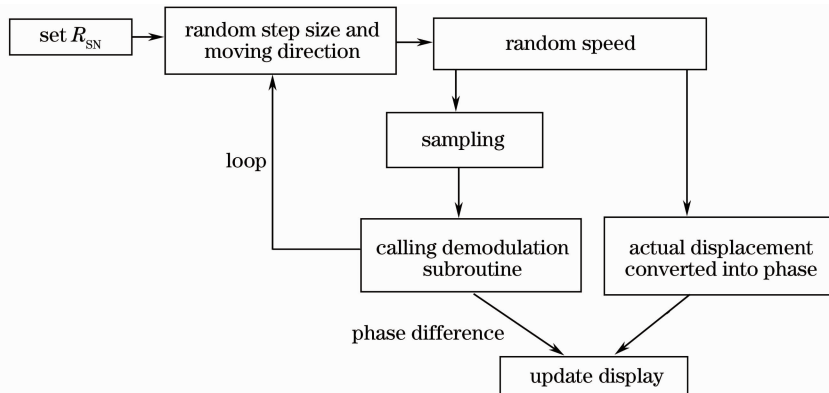


图4 仿真流程图

Fig. 4 Flow chart of simulation

在仿真程序中,被测件的随机步长为 $0 \sim 10 \mu\text{m}$,设置随机移动速度为 $1 \sim 20$ 倍,每一随机步长对应某一随机方向。通过比较仿真值与理论值的相对大小来验证方案的正确性。图5是系统分别无噪声和信噪比为 20 dB 时,F-P腔输出光强信号的仿真波形。图中波形大体趋势符合余弦函数,其中拐点如M、N对应于被测件移动转向点,而波形的疏密则对应不同的移动速度。

实验中设置采样周期为 $0.1 \mu\text{s}$, R_{SN} 设置为 20 dB ,循环 250000 次,随机产生约 15195.45 line条纹,仿真结果为 15196.14 line,即相差 0.69 line,相位差为 4.34 rad ,误差为 0.045% ,在允许误差范围内,验证了方案在逻辑上的正确性。

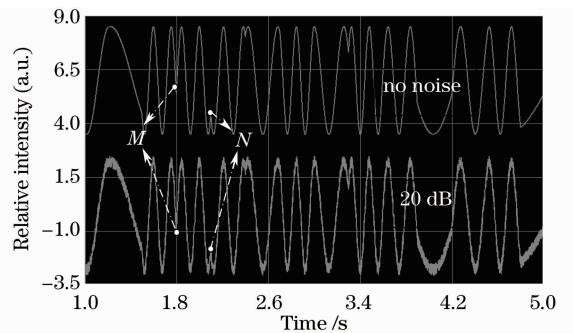


图5 仿真输出波形

Fig. 5 Waveform of the output signal

3 F-P腔位移传感器实验及结果分析

实验搭建双光路F-P腔位移传感器如图6所示。

系统包括中心波长为 1550 nm 的窄线宽 10 mW 的分布反馈(DFB)半导体激光器(LD)、3 dB 耦合器、传感单元、固定于微位移调节架上的被测件和信号采集板,采集板上的微处理器采用高速单片机 C8051F206 芯片,速度可达 25 MIPS(MIPS 即每秒百万条指令);模拟/数字(A/D)转换采用 TI 公司的 ADS8557 芯片,可以无延时采集多路模拟信号。

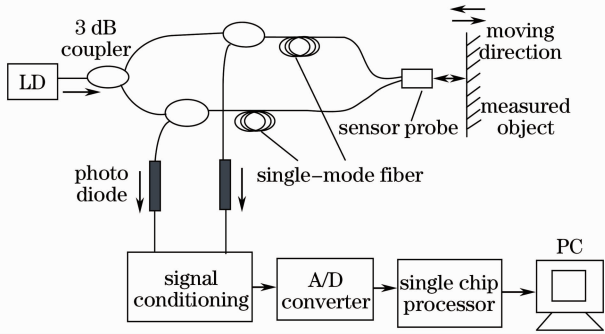


图 6 传感系统配置

Fig. 6 Configuration of sensor system

LD 发出的 1550 nm 激光经 3 dB 耦合器平均分成两束,分别耦合进入两个光纤 F-P 腔,并经 F-P 腔调制后,形成两路余弦变化的干涉光强输出。两输出光路再次经 3 dB 耦合器后,由两个同型的 PIN 光电探测器接收,转换成电压信号,经过放大滤波后,通过 A/D 转换器送至单片机处理,处理结果由串口发至计算机(PC)显示。

在位移测量实验中,微位移调节的精度是 10 μm。因为实验旨在验证传感系统对测量精度的提高,所以实验采用的步长为 20 μm,位移测量范围为 0~500 μm,并进行了正反向测量。图 7 为实际位移与测量结果的关系曲线。从图中可以看出,当被测件的位移由 0 变化到 500 μm 时,被测件的测量位移和实际位移呈良好的线性关系。图中, y_1 和 y_2 分别对应位移变化为正向和反向时测得的拟合

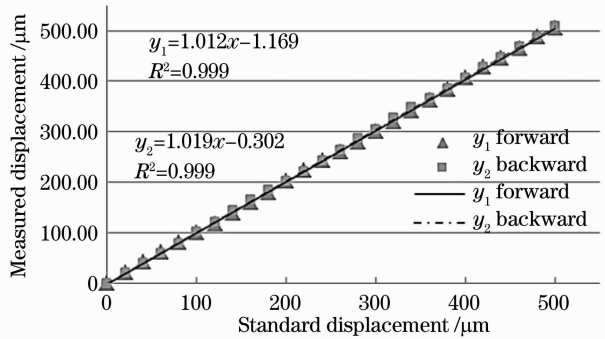


图 7 实际位移与测量位移关系

Fig. 7 Relation between standard displacement and measured displacement

关系曲线。实验结果显示,两条曲线基本重合,表明传感系统的重复性和实时性好。其中,对于正向移动过程的拟合方程为

$$y_1 = 1.012x - 1.169, \quad (7)$$

其相关系数 $R^2 = 0.999$;对于反向移动过程的拟合方程为

$$y_2 = 1.019x - 0.302, \quad (8)$$

其相关系数 $R^2 = 0.999$ 。对于理想曲线方程,可表示为

$$y_3 = x. \quad (9)$$

由(7)~(9)式可知,无论是正向还是反向移动,其相关系数和拟合方程与理想曲线的差值仅为 0.1%,线性度优于 1.1%。而从曲线斜率可以看出,当被测件正向移动时,平均 1 μm 对应测量误差为 12 nm,而反向运动时的测量误差为 19 nm,平均相对误差为 1.55%,在允许误差范围内。在现有实验条件下,误差主要由随机误差和仪器系统误差构成,计算得系统在 0~500 μm 内误差限值为 ±3 μm。

4 误差讨论

4.1 被测件表面倾斜度对结果的影响

如图 8 所示,当腔体两端面完全平行时,两光路的光程分别为 $2L$ 和 $2(L+b)$,光程差为 $2b$;但当镜面偏离垂直面角度 β 时,两光路的光程分别为 $L + L/\cos \beta$ 和 $(L+b - a \tan \beta)(1 + 1/\cos \beta)$ 。

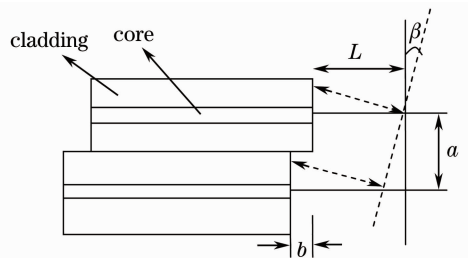


图 8 被测件表面倾斜度

Fig. 8 Inclination of the measured surface

则光程差为

$$\Delta L = (b - a \tan \beta)(1 + 1/\cos \beta). \quad (10)$$

由(10)式可知,光程差与 L 无关,所以被测件表面微小倾斜对两光路相位差几乎没有影响。

4.2 幅值检测法对结果的影响

由于被测件表面存在一定的倾斜度,即当平行于纤芯轴的光线入射到被测面时,光线会以一定的角度反射,光束的发散将降低光纤接收的反射光功率。随着腔长的增加,光强衰减将更明显,当位移由 0 变化到 500 μm 时,测得的最大振幅大约是最小振

幅的2倍。分析检测原理可知,本设计中所采用的基于施密特电路的幅值检测法,存在一个周期的时间延迟,光强衰弱越明显,该延时对计算结果造成的影响将越严重,当相邻周期条纹峰值相差1倍时,对应的相位解调误差达 $\pi/2$ 。

4.3 系统误差和随机误差

实验采用的微位移调节架的精度为 $10\ \mu\text{m}$,分辨率为 $5\ \mu\text{m}$ 。根据实验原理可知,腔长每改变 $10\ \mu\text{m}$,对应相位改变为 $81.07\ \text{rad}$ 。此外,由于相位型传感器的灵敏度高,因此对外界振动干扰很敏感。实验中采用分段测量的方式,测量相位的相对变化,尽可能避免在测量过程中因为传感器抖动产生附加相位、造成输出误差。

5 结 论

提出了一种基于双光纤光路相位解调的F-P位移传感器,利用F-P腔干涉理论,将位移量的测量转换为对F-P腔长变化的测量。采用该新型解调方案,系统具有可连续测量位移、精度高、结构简单和成本低等优点。位移检测实验表明,该传感器在 $0\sim 500\ \mu\text{m}$ 范围内误差限值为 $\pm 3\ \mu\text{m}$,线性度优于 1.1% ,重复性好,验证了新型解调方案的正确性。

由于具有干涉型传感器的优点,采用本方案可非接触地以较高精度测量位置、位移、厚度、振动幅度、距离和直径等物理量。另外,本套测量系统的测量精度在解决以下几个问题后,可以进一步提高:1)减小光强衰减对测量系统的影响,采取光补偿方案或改善幅值检测法的时间延迟;2)减小系统误差,采用算法补偿振动对位移的影响,进一步提高系统的位移分辨率;3)补偿温度影响,建立温度-测量结果关系表,为高精度测量制订修正方案。

参 考 文 献

- 1 Sun Baochen, Dai Jingyun, Zhang Wentao. Design of demodulation system for fiber optic Fabry-Perot sensors[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2007, **44**(7): 222~224
孙宝臣,戴静云,张文涛. 光纤法珀传感器解调系统的设计[J]. *微纳电子技术*, 2007, **44**(7): 222~224
- 2 Ge Yixian, Wang Ming, Yan Haitao *et al.*. A MEMS pressure

- sensor based on a phase demodulation method[J]. *J. Functional Materials and Devices*, 2008, **14**(2): 472~474
葛益娴,王鸣,闫海涛等. 基于相位解调的光纤MEMS压力传感器[J]. *功能材料与器件学报*, 2008, **14**(2): 472~474
- 3 Zhao Zhonghua, Gao Yingjun, Luo Yufeng *et al.*. An optical fiber Fabry-Perot cavity liquid level sensor using interference fringe counting technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1369~1372
赵中华,高应俊,骆宇锋等. 干涉条纹计数法光纤Fabry-Perot腔液位传感器[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7): 1369~1372
- 4 Zhang Zhilü, Gao Yingjun. The application study on fiber Fabry-Perot liquid level sensor by using interference fringe counting technique[J]. *Chinese J. Sensor and Actuators*, 2008, **21**(5): 781~784
张志律,高应俊. 干涉条纹计数法光纤液位传感器应用研究[J]. *传感技术学报*, 2008, **21**(5): 781~784
- 5 Wang Yan, He Jun, Li Fang *et al.*. Research on phase consistency of fiber laser sensor array system based on phase generated carrier demodulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1542~1546
王延,何俊,李芳等. 基于相位载波解调法的多通道光纤激光传感系统相位一致性研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1542~1546
- 6 Wang Lin, He Jun, Li Fang *et al.*. Ultra low frequency phase generated carrier demodulation technique for fiber sensors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405001
王林,何俊,李芳等. 用于探测极低频信号的光纤传感器相位生成载波解调方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0405001
- 7 Bo Linhou, Liao Yanbiao, Zhang Min *et al.*. The improvement on PGC demodulation method based on optical fiber interferometer sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1324~1327
柏林厚,廖延彪,张敏等. 干涉型光纤传感器相位生成载波解调方法改进与研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1324~1327
- 8 Wang Yibin, Tian Qian, Zhang Enyao. Influence of light intensity on measurement accuracy of laser diode multiplexing optical fiber displacement sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **21**(3): 183~187
王屹滨,田芊,章恩耀. 半导体激光器多路光纤位移传感器中光强对测量精度的影响[J]. *中国激光*, 1994, **21**(3): 183~187
- 9 Wang Bofan, Li Zhongliang, Wang Xiangzhao *et al.*. Two-wavelength sinusoidal phase-modulating interferometer insensitive to intensity modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1008001
王渤帆,李中梁,王向朝等. 消除光强调制影响的双波长正弦相位调制干涉仪[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1008001
- 10 Bin Tong, Min Li, Yunlin Li. Double-fiber Fabry-Perot interferometry optical fiber liquid level sensor[C]. *SPIE*, 2012, **8351**: 83510T
- 11 Xue Junwen, Pei Xuedan, Su Binghua *et al.*. Study of F-P etalon using in lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(3): 031402
薛竣文,裴雪丹,苏秉华等. 激光器中F-P标准具的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(3): 031402