

基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度 光纤振动传感器

张 乐 吴 波 叶 雯 沈 永 行

(浙江大学光电系现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 基于 Pound-Drever-Hall (PDH) 激光锁频原理, 研制了一种高灵敏度的光纤振动传感器。该传感器采用光纤光栅法布里-珀罗(F-P)腔作为传感头, 将振动信号所引起的光纤光栅 F-P 腔透射峰位移信号转换成对应的误差信号进行探测。实验测试结果表明此系统对 1~5 kHz 频率范围内的振动信号传感性能优良, 信噪比大于 50 dB。综合考虑系统元器件参数及各种环境影响因素, 从理论上对系统进行了分析, 得出系统最小分辨率为 11.7×10^{-12} strain/ $\sqrt{\text{Hz}}$, 优于目前的典型光纤振动传感系统。

关键词 传感器; 光纤传感; 振动; Pound-Drever-Hall 原理; 光纤光栅; 法布里-珀罗腔

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0406006

Highly Sensitive Fiber-Optic Vibration Sensor Based on Frequency-Locking of a FBG Fabry-Perot Cavity

Zhang Le Wu Bo Ye Wen Shen Yonghang

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Department of Optical Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A highly sensitive fiber-optic vibration sensor is developed based on the Pound-Drever-Hall (PDH) frequency locking scheme of a fiber Bragg grating (FBG) Fabry-Perot (F-P) cavity. It measures the vibration signal by the error signal transferred and amplified from the phase change of the F-P cavity. The sensor system exhibits experimentally a nice sensing capability to the vibration signals within a frequency range from 1 to 5 kHz and it can obtain a more than 50dB signal to noise ratio. The analysis of the sensor, taking into account the parameters of elements used in the system and many environment factors, shows that it may reach a resolution as high as 11.7×10^{-12} strain/ $\sqrt{\text{Hz}}$, which is much better than those of the traditional fiber sensing systems.

Key words sensors; fiber-optic sensor; vibration; Pound-Drever-Hall; fiber Bragg grating; Fabry-Perot cavity

OCIS codes 060.2370; 120.2230; 120.7280

1 引 言

自 1978 年, K. O. Hill 等^[1]观察到掺锗光纤中光诱导产生光栅效应以来, 光纤光栅制作技术不断成熟。同时, 利用光纤布拉格光栅(FBG)进行光纤传感的研究引起了人们极大的兴趣^[2]。早期典型的光纤光栅传感都是根据光纤光栅中心反射峰位置改变来测量外界温度或压力信号, 能简单地实现对环境物理

量的测量, 然而灵敏度在一定程度上受到光谱分析仪波长分辨率的限制^[3]。为突破 FBG 传感灵敏度限制, 很多新颖光纤传感技术不断被提出, 其中包括 FBG 锁频测量系统^[4]和 π 相位 FBG 传感系统^[5]。FBG 锁频测量消除了光谱分析仪的分辨率限制, 实验结果显示在 1.5 Hz 频率下获得了 $1.2 \text{ ne}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的高传感灵敏度; 而 π 相位 FBG 传感系统具备对特定波

收稿日期: 2010-09-16; 收到修改稿日期: 2010-10-18

作者简介: 张 乐(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤传感和光纤激光器等方面的研究。

E-mail: zhangle1987129@163.com

导师简介: 沈永行(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器、中红外光参变振荡器、光纤传感和光纤光谱仪等方面的研究。E-mail: physyh@zju.edu.cn(通信联系人)

长的窄线宽透射,系统在 40 Hz 频率处获得了 $0.5 \text{ ne}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的传感灵敏度。

本文报道了一种新型高灵敏度光纤振动传感器,该系统基于 Pound-Drever-Hall (PDH) 锁频原理^[6],测量方法由 PDH 稳频技术^[7]演变而来,采用光纤光栅法布里-珀罗 (F-P) 腔^[8~10]作为传感头,将 F-P 腔的位移信号放大转换成相位信号进行环境应力的测量,是除上述几种典型传感系统外的又一种高灵敏度传感系统,具有获得 $\text{pe}/\sqrt{\text{Hz}}$ 极限测量灵敏度的能力。

2 系统结构与原理

光纤振动传感器的结构如图 1 所示,包括单频

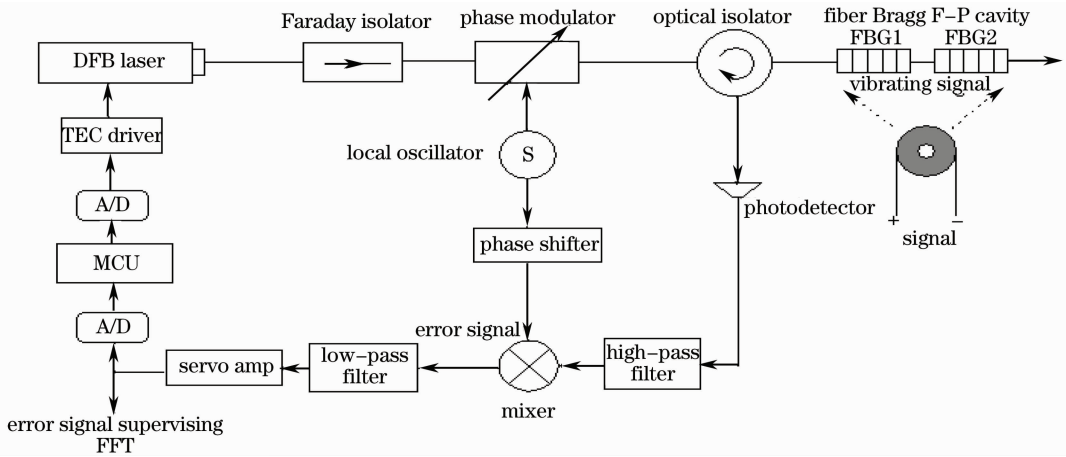


图 1 光纤锁频振动传感器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of the fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking scheme

假设单频激光入射光功率为 P_0 , 电场强度为 E_0 , 角频率为 ω , 使用调制频率为 Ω , 调制深度为 β 的电压信号对入射光进行相位调制, 那么在任意 t 时刻, 使用贝塞尔函数展开入射光电场表达式, 可得

$$E_i = E_0 \{ J_0(\beta) \exp(i\omega t) + J_1(\beta) \exp[i(\omega + \Omega)t] - J_1(\beta) \exp[i(\omega - \Omega)t] \}, \quad (1)$$

可见, 入射光包含频率相差 Ω 的三种成份。主频频率为 ω , 光强 P_c ; 左, 右边频频率为 $\omega - \Omega, \omega + \Omega$, 光强均为 P_s , 其表达式为

$$P_c = J_0^2(\beta) E_0^2 = J_0^2(\beta) P_0, \quad (2)$$

$$P_s = J_1^2(\beta) E_0^2 = J_1^2(\beta) P_0. \quad (3)$$

经 F-P 腔反射后的光场强度可根据公式 $E_r = R(\omega) E_i$ 计算, $R(\omega)$ 为 F-P 腔的反射率

$$R(\omega) = E_r / E_i = \frac{r \{ \exp[i\omega / (\Delta\nu_{\text{fsr}})] - 1 \}}{1 - r^2 \exp\{i\omega / (\Delta\nu_{\text{fsr}})\}}, \quad (4)$$

式中 r 为每个光栅的反射率, $\Delta\nu_{\text{fsr}} = c/2L$, 为腔长为 L 的 F-P 腔的自由光谱范围。

反射光束总强度 P_r 表达式为

$$P_r = |E_r|^2 = P_c |R(\omega)|^2 + P_s |R(\omega + \Omega)|^2 + P_s |R(\omega - \Omega)|^2 + 2 \sqrt{P_c P_s} \text{Re}[R(\omega) R^*(\omega + \Omega) - R^*(\omega) R(\omega - \Omega)] \cos(\Omega t) + 2 \sqrt{P_c P_s} \text{Im}[R(\omega) R^*(\omega + \Omega) - R^*(\omega) R(\omega - \Omega)] \sin(\Omega t) + f(2\Omega), \quad (5)$$

式中 $f(2\Omega)$ 为 2Ω 项。使用高速光电二极管, 将接收到的反射光束能量转换为相应的电压信号。为了得到 $\cos(\Omega t)$ 项系数所包含信号, 将光强 P_r 信号通过光电二极管转换为相应的电信号后在乘法器输入端与频率为 Ω 的参考信号进行相关处理, 得到

$$\begin{aligned}
 P_e = & P_c |R(\omega)|^2 + P_s |R(\omega + \Omega)|^2 + P_s |R(\omega - \Omega)|^2 \cos(\Omega t) + \sqrt{P_c P_s} \operatorname{Re}[R(\omega)R^*(\omega + \Omega) - \\
 & R^*(\omega)R(\omega - \Omega)] \sin(2\Omega t) + \sqrt{P_c P_s} \operatorname{Re}[R(\omega)R^*(\omega + \Omega) - R^*(\omega)R(\omega - \Omega)] + \\
 & \sqrt{P_c P_s} \operatorname{Re}[R(\omega)R^*(\omega + \Omega) - R^*(\omega)R(\omega - \Omega)] \cos(2\Omega t) + f(2\Omega) \cos(\Omega t). \quad (6)
 \end{aligned}$$

使用低通滤波器将电路信号中包含高频信号 $\cos(\Omega t)$ 和 $\cos(2\Omega t)$ 等的高频项去除。再对其表达式作化简处理,最终获得误差信号 P_e 表达式^[6]为

$$P_e = 2 \sqrt{P_c P_s} \frac{d|R|^2}{d\omega} \Omega. \quad (7)$$

结合(4)式和(7)式可用 Matlab 模拟出误差信号与频率偏移量的关系图。在 $\Omega \ll \Delta v_{1/2}$ 情况下,该关系图如图 2 所示(图中采用的 Ω 值为 20 MHz 和光纤光栅 F-P 腔腔长为 1 mm 均为系统实际值)。当入射激光频率处于谐振频率上,误差信号为零;当 F-P 腔受外界影响产生形变时,透射峰谐振频率与入射激光频率之间产生一定的偏差,误差信号变为相应数值,此数值大小与频率偏差量成线性关系,反映了 F-P 腔的瞬时形变量大小。在测量中,通过模/数(A/D)、单片机、数/模(D/A)芯片控制将激光器的输出频率锁定在透射峰的中心位置。当外界振动信号加在 F-P 腔上时,根据误差信号相应的变化即可得出振动信息。

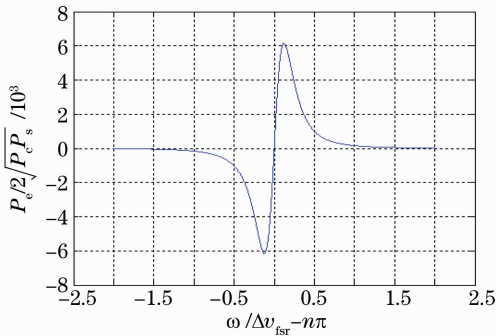


图 2 误差信号与频率偏移量关系图

Fig. 2 Dependence of the error signal, $P_e/2 \sqrt{P_c P_s}$, on the phase change, $\omega/\Delta v_{1/2} - n\pi$ (n is integer)

3 实验结果分析

系统主要由激光器、相位调制器、光纤传感头以及相应电路处理部分(包含 A/D、D/A 芯片以及单片机等)组成。在实际系统中,采用 Cyoptics 公司生产的单频 DFB 半导体激光器,工作波长在 1544.7~1547.6 nm 范围可调,输出线宽为 2~10 MHz,具备良好功率与波长稳定性;使用的相位调制器型号为 PMS1566-Q,工作波段为 1550 nm,插入损耗为 3.6 dB,半波调制电压在 1 kHz 时为 4.0 V,其带宽

频率最高可达 5 GHz 以上;光纤传感头采用自制的光纤光栅 F-P 腔,两个光纤光栅中心波长反射率约为 90%,中间空腔长度为 1 mm,透射峰位置在常温常态下对应波长为 1546.61 nm,在此处光纤光栅 F-P 腔的透射峰半峰全宽为 3.89 GHz,光谱特性如图 3 所示。

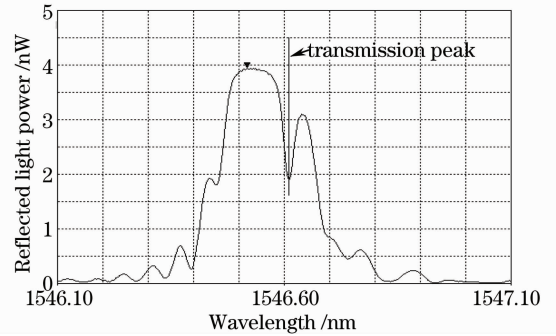


图 3 FBG F-P 腔反射光谱图

Fig. 3 Reflection spectrum of the fiber Bragg grating F-P cavity

使用 DFB 半导体激光器自带的半导体制冷器(TEC)温度调谐功能,可以改变激光器频率输出以扫描光纤光栅 F-P 腔,查找透射峰谐振频率位置所在。实验获得的 F-P 腔反射信号及误差信号波形如图 4 所示,与理论模拟获得的图 2 基本吻合。

利用 PID 软件控制法将系统频率锁定在透射峰处,则误差信号反映了光纤光栅 F-P 腔受振动影响产生的形变信息。采用压电振动片固定在光纤光栅 F-P 腔附近作为模拟振动源,在其两端加载一定频率和 ± 5 V 幅值的正弦电压信号,使其产生相应

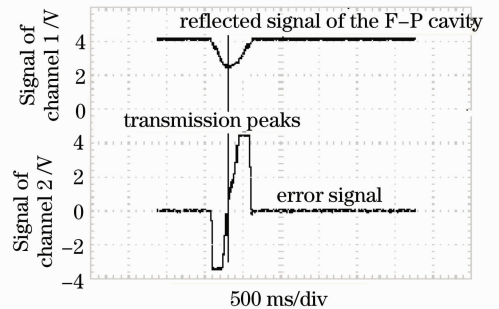


图 4 F-P 腔反射光信号与误差信号

Fig. 4 Reflection signal of the F-P cavity and the error signal

振动传递给光纤光栅 F-P 腔,用示波器对误差信号进行监测,同时进行快速傅里叶变换,获得不同振动

频率下的误差信号和其频谱信号分布如图 5 所示。

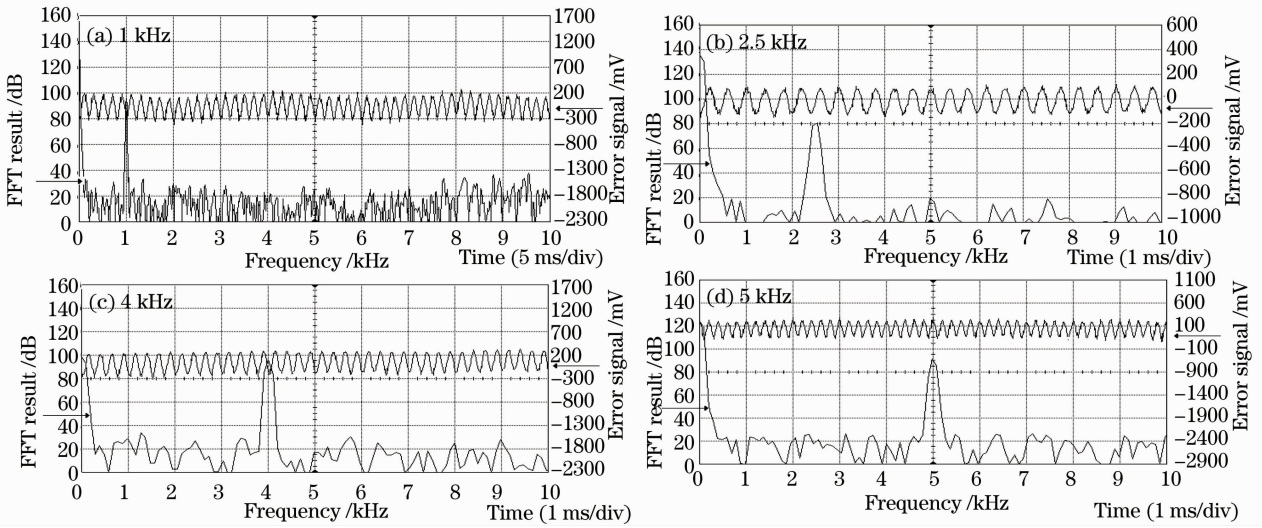


图 5 不同振动频率下的误差信号及其 FFT 变换后的结果

Fig. 5 Error signal under different vibrating frequencies and its fast Fourier transfer (FFT) result

从结果可以看出,该传感系统对频率在 1~5 kHz 范围内的微小振动信号传感性能优良,可获得清晰的振动波形信号。

实验所测得振动信号信噪比的影响因素主要有两个:PID 控制法锁频过程中的误差信号波动和温度变化引起的光纤光栅 F-P 腔中心反射波长的漂移。

1) PID 控制法锁频就是根据误差信号,利用比例、积分、微分计算出驱动电压对激光器输出频率进行控制的过程。系统采用 PID 控制法将激光输出频率锁定在透射峰中心。在不断的反馈调整激光器输出频率的过程中,会引起误差信号的微小波动。

2) 当光纤光栅 F-P 腔受外界应力和温度影响时,其长度发生了变化,导致中心反射波长发生漂移。因此误差信号不仅反映了振动信号,同时也受到温度的影响。随着系统工作时间变长,光纤光栅 F-P 腔的温度也不断缓慢的发生着变化,中心反射波长发生漂移,引起误差信号的缓慢波动。

从实验结果看,信号信噪比大于 60 dB,能准确对振动频率进行测量。

4 振动传感系统极限分辨率分析

当光纤光栅受外界应力和温度影响时,FBG 波长漂移量^[3,11]为

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \epsilon + \left(\alpha + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right) \Delta T \right\}, \quad (8)$$

式中 λ_B 为 FBG 中心反射波长, n 为光纤有效折射率, Λ 为光栅周期, ϵ 是光纤光栅的长度变化率, $P_{i,j}$ 是压光效应的 Pockels 系数, ν 是泊松系数, α 是光纤材料的热膨胀系数, T 为环境温度。式中 $\frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]$ 项数值约为 0.22。由此可得恒温下光栅受应力作用产生的中心反射波长变化为

$$\frac{1}{\lambda_B} \frac{\partial \lambda_B}{\partial \epsilon} = 0.78\epsilon^{-1}. \quad (9)$$

可推得传感系统在没有任何噪声影响下的分辨率为

$$\frac{(\delta \epsilon) / \epsilon}{\delta \nu_B} = 6.6 \times 10^{-15} \text{ strain/Hz}, \quad (10)$$

式中 λ_B, ν_B 为中心透射波长和频率, ϵ 为应变, strain 表示应变相对量 $\frac{\delta \epsilon}{\epsilon}$ 的单位, Hz 为频率的单位。

在实际系统中,测量分辨率将受到一些系统噪声的影响与限制。根据(7)式和(10)式可知主要影响噪声有:激光功率噪声、散粒噪声、激光频率噪声。1)激光功率噪声:系统采用的激光器具备了良好的功率稳定性,其相对强度噪声为-135 dB/Hz,对系统分辨率的影响非常小,在系统中可以忽略。2)散粒噪声:因为光子粒子性而造成的噪声,在系统频率很高时噪声非常小,系统对最小分辨率的影响相对于激光频率噪声可以忽略^[12]。3)激光频率噪声:系统主要噪声,限制了最小振动分辨率。

激光频率噪声谱密度 S_f 与激光线宽 $\Delta\nu_L$ 之间的关系式^[4]:

$$\Delta\nu_L = \pi S_f^2. \quad (11)$$

实验中DFB激光器的最大输出线宽为10 MHz,因此根据(11)式计算出激光频率噪声谱密度 S_f 为 $1.78 \times 10^3 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。可以得出实验系统中受激光线宽影响的最小振动分辨率

$$\left[\frac{(\partial \epsilon)/\epsilon}{\delta \nu_B} \right] \times S_f = 11.7 \times 10^{-12} \text{ strain} / \sqrt{\text{Hz}}, \quad (12)$$

考虑典型的光纤振动传感器^[13,14]的最小分辨率一般为 $10^{-9} \text{ strain}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级,系统具有明显优越性。

5 结 论

基于PDH锁频原理,研制了一个光纤光栅F-P腔振动传感器。该系统具有实用性和有效性,其最小分辨率优于典型光纤传感系统。该传感系统的设计与实现基于全光纤结构,具有光纤传感系统抗电磁干扰、体积小等优点。

为进一步提升系统性能,后期系统中可以采用单频短腔掺铒光纤激光器代替DFB半导体激光器,它可获得小于1 kHz的极窄线宽输出^[15,16],从而使系统测量灵敏度得到进一步提升。根据(11)式可以得到单频短腔掺铒光纤激光器的频率噪声谱密度 S_f 为 $1.78 \times 10^3 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。在此条件下,该系统受激光频率噪声影响的最小分辨率有望提高2个数量级。

参 考 文 献

- 1 K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguides; application to reflection filter fabrication [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(10): 647~649
- 2 V. V. Dvoyrin, V. M. Mashinsky, L. I. Bulatov *et al.*. Bismuth-doped-glass optical fibers-a new medium for lasers and amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(20): 2966~2968
- 3 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 4 B. Lissak, A. Arie, M. Tur. Highly sensitive dynamic strain measurements by locking lasers to fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(24): 1930~1932
- 5 A. Dandridge, A. B. Tveten, T. G. Giallorenzi. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(10): 1647~1653
- 6 Eric D. Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. *Am. J. Phys.*, 2002, **69**(1): 79~87
- 7 R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Appl. Phys. B: Photophys. Laser Chem.*, 1983, **31**(2): 97~105
- 8 M. Gupta, H. Jiao, A. O'Keefe. Cavity-enhanced spectroscopy in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(21): 1878~1880
- 9 Yin Guolu, Lou Shuqin, Peng Wanqing *et al.*. Sensitivity of fiber Bragg grating-based Fabry-Perot interferometric sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1490~1495
尹国路, 娄淑琴, 彭万敬等. 光纤布拉格光栅法布里-珀罗干涉式传感器灵敏度[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1490~1495
- 10 Xiaoke Wan, Henry F. Taylor. Intrinsic fiber Fabry-Perot temperature sensor with fiber Bragg grating mirrors[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(16): 1388~1390
- 11 Jong H. Chow, Ian C. M. Littler, Glenn de Vine *et al.*. Phase-sensitive interrogation of fiber Bragg grating resonators for sensing applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(5): 1881~1889
- 12 Li Zhizhong, Yang Huayong, Cheng Yusheng *et al.*. Pressure sensing characteristics of panda fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 157~162
李智忠, 杨华勇, 程玉胜等. 熊猫光纤光栅压力传感特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 157~162
- 13 Ady Arie, Boaz Lissak, Moshe Tur. Static fiber-Bragg grating strain sensing using frequency-locked lasers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(10): 1849~1855
- 14 Wentao Zhang, Yuliang Liu, Fang Li. Fiber Bragg grating hydrophone with high sensitivity[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(9): 631~633
- 15 Y. Cheng, J. T. Kringlebotn, W. H. Loh *et al.*. Stable single frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable absorber based tracking narrow-band filter[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 875~877
- 16 Chu Xingchun, Zhao Shanghong, Wu Zhuoliang *et al.*. Experimental research on spectral beam combination of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co-doped double-clad fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 929~933
楚兴春, 赵尚弘, 吴卓亮等. $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤激光器谱组束实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 929~933