

基于 Lyot 滤波器和长周期光纤光栅的温度与应变的同时测量

童峥嵘 郭 阳* 杨秀峰 曹 晔

(天津理工大学薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384)

摘要 提出了一种基于光纤干涉原理的同时测量温度和应变的传感器,通过在 Lyot 滤波器(LFF)中熔接一段长周期光纤光栅(LPFG)构成。其中 LFF 由在起偏器(PL1)和检偏器(PL2)中嵌入一段保偏光纤(PMF)构成。实验结果表明,LFF 的干涉谱和 LPFG 的谐振峰对温度和应变有不同的响应灵敏度,因此可利用敏感矩阵实现对温度和应变的同时测量。实验测得 LFF 和 LPFG 的温度灵敏度分别为 $-1.3173 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $0.0604 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,应变灵敏度分别为 $-0.0185 \text{ nm}/\mu\epsilon$ 和 $-0.0004 \text{ nm}/\mu\epsilon$ 。温度和应变的测量精度分别为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 和 $\pm 25 \mu\epsilon$ 。该系统采用线性结构,结构简单、易于实现,具有较高的灵敏度和稳定性,同时测量结果具有良好的线性度。

关键词 光纤光学;长周期光纤光栅;Lyot 滤波器;同时测量;悬臂梁

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0305002

Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Based on a Long-Period Fiber Grating Combined with a Lyot Fiber Filter in a Linear Configuration

Tong Zhengrong Guo Yang Yang Xiufeng Cao Ye

(Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract A novel sensor for simultaneous temperature and strain measurement based on fiber interference is proposed. The sensor is formed by incorporating a long-period fiber grating (LPFG) inside a Lyot fiber filter (LFF), in which the LFF can be constructed by placing a polarization maintaining fiber (PMF) between two polarizers (PL) with the primary axis of the fiber rotated 45° relative to the polarizer axes. Due to the different responses of the LFF and LPFG to temperature and strain variations, it is possible for the proposed fiber sensor to measure temperature and strain simultaneously by use of a well-conditioned sensitivity matrix equation. The experimental temperature sensitivity coefficients of LFF and LPFG are $-1.3173 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ and $0.0604 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, respectively. The strain sensitivity coefficients achieve $-0.0185 \text{ nm}/\mu\epsilon$ and $-0.0004 \text{ nm}/\mu\epsilon$, respectively. A sensing resolution of $\pm 1^\circ\text{C}$ in temperature and $\pm 25 \mu\epsilon$ in strain has been experimentally obtained. The experimental results are in good agreement with the theoretical analysis. Furthermore, this linear configuration is simple and easy to achieve, and has high stability and sensitivity.

Key words fiber optics; long-period fiber grating; Lyot fiber filter; simultaneous measurement; cantilever beam

OCIS codes 060.2420; 060.2330; 230.1150; 060.2310

1 引 言

在工程结构应用中,常常需要对温度和应变进

行同时测量,但在实际测量中温度和应变往往由于各种因素的作用而相互影响,因此需要解决温度和

收稿日期: 2011-09-20; 收到修改稿日期: 2011-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(61107052) 资助课题。

作者简介: 童峥嵘(1971—),女,博士,教授,硕士生导师,主要从事光纤通信与传感等方面的研究。

E-mail: zhrong@sohu.com

* 通信联系人。E-mail: guoyang_1@126.com

应变的同时测量问题。光纤布拉格光栅(FBG)具有体积小、熔接损耗小、全兼容于光纤、能埋入智能材料等优点,因此在光纤通信和传感领域都得到了广泛应用。目前已提出了很多方法对温度和应变进行同时测量,大多是利用单光栅法或是光栅与其他传感器的结合。例如对单根 FBG 进行部分腐蚀^[1],利用新型旋转折变型长周期光纤光栅(LPFG)^[2],这种方法对光栅的制作要求较高;对两根具有不同掺杂浓度的 LPFG 进行级联^[3],这对于光栅的掺杂浓度有很高的要求,不易控制;将两根 FBG 级联后进行封装^[4,5],这种方法需要保证光栅与梁的完全刚性粘贴;单个 FBG 与高双折射(HB)光纤环境(FLM)的结合^[6],但其干涉谱易受到 Sagnac 环两个臂长差的影响而不稳定;利用 FBG 与单-多-单模(SMS)结构的组合^[7],该传感器的制作较为复杂。

LPFG 作为一种透射型无源光纤器件,具有无后向反射,测量精度高等优点。LPFG 的模式耦合属于纤芯基模和同向传输的包层模之间的耦合,对外界环境的变化非常敏感,因此具有比 FBG 更高的温度、湿度、浓度、应变、弯曲、振动和扭曲灵敏度^[8~14]。目前干涉型光纤传感器,例如 M-Z 干涉型光纤传感器、Michelson 干涉型光纤传感器、F-P 干涉型光纤传感器、Sagnac 干涉型光纤传感器等,因其不易受电磁场干扰、响应速度快、成本低等优点,已经受到越来越广泛的重视。干涉型光纤传感器与其他传感器相比,虽然结构复杂,但其灵敏度很高,动态响应宽,因而成为光纤传感器研究的一个重要组成部分。

本文提出了一种基于 Lyot 滤波器(LFF)和 LPFG 的同时测量温度和应变的传感器,其中 LFF 由在起偏器(PL1)和检偏器(PL2)中嵌入一段保偏光纤(PMF)构成,将 LPFG 与 PMF 熔接构成传感头。LFF 的干涉谱和 LPFG 的谐振峰对温度和应变有不同的响应灵敏度,因此可利用敏感矩阵实现对温度和应变的同时测量。LFF 不仅具有干涉型光纤传感器的高灵敏度、快响应速度等优点,同时与 Sagnac 光纤传感器相比,干涉谱的稳定性较高,有利于测量精度的提高。

2 原 理

实验装置原理如图 1 所示,BBS 为宽带光源,LPFG 和 PMF 熔接嵌入两个 PC 中,构成 LFF-LPFG 滤波器,PC 用来稳定光纤的偏振状态,PL1 为起偏器,PL2 为检偏器。缓慢调节 PC,当 PMF

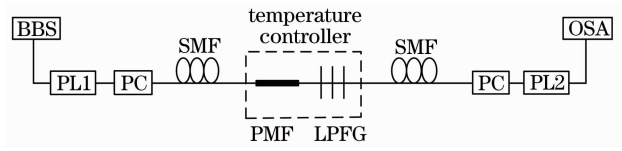


图 1 传感器的原理图

Fig.1 Schematic diagram of the sensor

的快轴与偏振轴的夹角呈 45° 时,构成 LFF^[15]。光在 PMF 的快轴和慢轴以不同的速度分别传播,由双折射效应产生的正弦波长相关滤波器的传输函数可表示为

$$T(\lambda) = \cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda}\Delta n_{\text{eo}}l_{\text{eff}}\right). \quad (1)$$

其波长间隔可表示为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eo}}l_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

式中 λ 为工作波长, Δn_{eo} 为光纤的双折射系数, l_{eff} 为光纤的有效长度, l_{eff} 越长,干涉谱的波长间隔越小。

实验所用等强度悬臂梁如图 2 所示,梁长为 L ,厚度为 h ,梁固定端宽度为 b ,在梁自由端处由标准砝码施加荷载 P ,用以产生不同的应变。当梁自由端的挠度 ω 不大时,曲率半径 ρ 可视为常量,根据材料力学知识,可得等强度悬臂梁上的应变与梁上任意位置 l 的挠度 ω_l 的关系为^[16]

$$\varepsilon = \frac{h}{l^2}\omega_l = KP. \quad (3)$$

式中 K 为等强度梁的应变-荷载灵敏度。

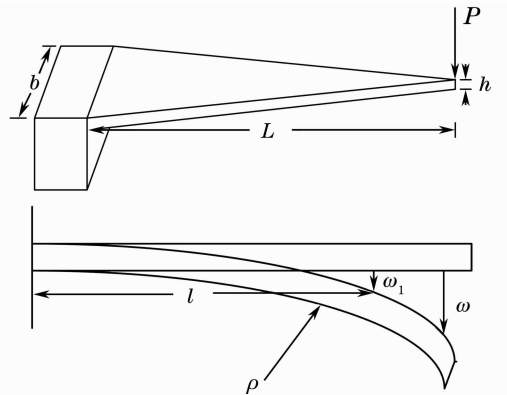


图 2 等强度悬臂梁结构图

Fig.2 Scheme of equi-intensity cantilever beam

当温度和应变同时变化时,光纤的双折射系数和有效长度发生改变,LFF 的波长变化为

$$\Delta\lambda \sim \left(l_{\text{eff}} \frac{\partial \Delta n_{\text{eo}}}{\partial l} + \Delta n_{\text{eo}} \frac{\partial l_{\text{eff}}}{\partial l}\right) \Delta l + \left(l_{\text{eff}} \frac{\partial \Delta n_{\text{eo}}}{\partial T} + \Delta n_{\text{eo}} \frac{\partial l_{\text{eff}}}{\partial T}\right) \Delta T. \quad (4)$$

由耦合模理论知,LPFG 的相位匹配条件可表

示为

$$\lambda_D^m = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})\Delta, \quad (5)$$

式中 λ_D^m 为谐振波长, Δ 为光栅周期, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 分别为纤芯基模 LP₀₁ 和一阶 m 次包层模 LP_{0m} 的有效折射率。

当温度和应变同时变化时, LPFG 的波长漂移为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda \sim & \left[\left(\frac{\partial n_{\text{eff}}^{\text{co}}}{\partial T} - \frac{\partial n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}{\partial T} \right) \Delta + (\partial n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \partial n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) \frac{\partial \Delta}{\partial T} \right] \Delta T + \\ & \left[\left(\frac{\partial n_{\text{eff}}^{\text{co}}}{\partial l} - \frac{\partial n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}{\partial l} \right) \Delta + (\partial n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \partial n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) \frac{\partial \Delta}{\partial l} \right] \Delta l. \quad (6) \end{aligned}$$

由(4)和(6)式得,当温度和应变同时变化时, LFF 和 LPFG 具有不同的灵敏度系数,从而可以利用敏感矩阵实现对温度和应变的同时测量。

3 实验结果和讨论

实验采用高频 CO₂ 激光脉冲在普通单模光纤(SMF)上写入的 LPFG, 谐振波长为 1575.6 nm, PMF 采用日本 Fujikura 公司生产的 SM15-PS-U25A 熊猫型保偏光纤, 在其工作波长 1554.36 nm 处的拍长为 3.1 mm, 长度为 35 cm, 双折射系数为 5.1×10^{-4} , 光谱仪(OSA) AQ6317B 的分辨率为 0.01 nm。所用等强度悬臂梁的梁长 $L=110.5$ cm, 梁固定端宽度 $b=72$ mm, 厚度 $h=5.5$ mm。图 3 为实验测得的 LFF 的干涉谱图。将 $\lambda=1554.36$ nm、 $\Delta n_{\text{co}}=5.1 \times 10^{-4}$ 、 $l_{\text{eff}}=35$ cm 代入(2)式, 得出波长间隔为 13.53 nm, 与图 3 所示波长间隔 14.04 nm 相一致。

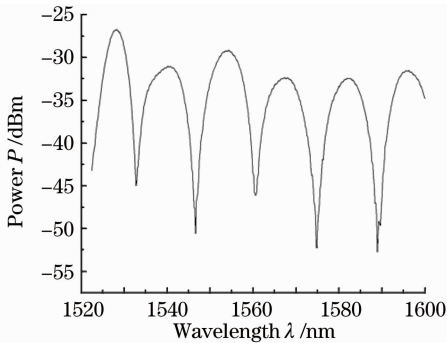


图 3 LFF 的干涉谱图

Fig. 3 Interference spectrum of LFF

通过调整 PC 控制干涉条纹对比度, 得到只有两个峰的透射谱图, 一个是 LFF 的透射峰, 波长为 1560.66 nm, 一个是 LPFG 的谐振峰, 谐振波长为 1575.6 nm, 如图 4 所示。

为了防止弯曲等外界因素的影响, 将 LPFG 和

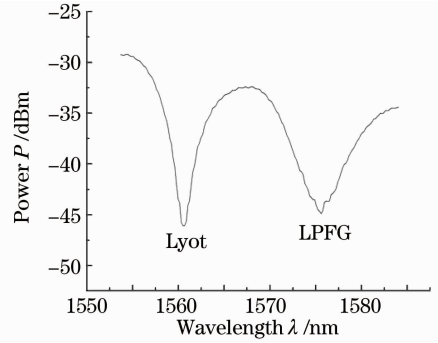


图 4 传感器的透射谱图

Fig. 4 Transmission spectra of the sensor

PMF 水平固定, 放在型号为 MH-5800 的恒温箱中加热, 对温度特性进行测量。从 25 °C 加热至 65 °C, 每隔 5 °C 记录一次波长变化, 其温度的透射谱变化如图 5 所示。由图可见, LPFG 随温度的升高向长波方向漂移了 2.416 nm, 温度灵敏度为 0.0604 nm/°C。由于双折射系数随温度的升高而减小, 故 LFF 随温度的升高呈现方向相反的变化趋势, 向短波方向漂移了 52.69 nm, 温度灵敏度为 -1.3173 nm/°C。

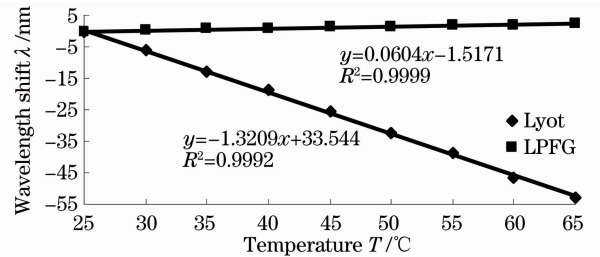


图 5 温度实验曲线

Fig. 5 Experimental curve of temperature

当温度保持室温恒定时, 在等强度梁无预应力的情况下, 将传感头沿梁的中轴线刚性粘贴于梁上, 使其距离梁固定端的长度为 $l=527.5$ mm, 光路的其他部分被固定在操作平台上。在梁自由端施加标准砝码以产生应变, 在 $0 \sim 711.6 \mu\epsilon$ 范围内, LPFG 和 LFF 均发生蓝移。每隔 $88.95 \mu\epsilon$ 记录一次波长变化, 如图 6 所示。LPFG 向短波方向漂移了 0.306 nm, 应变灵敏度为 -0.0004 nm/ $\mu\epsilon$, LFF 向短波方向漂移了 13.189 nm, 应变灵敏度为

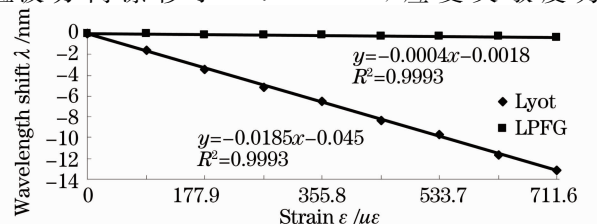


图 6 应变实验曲线

Fig. 6 Experimental curve of strain

-0.0185 nm/μ ϵ 。由图 5,6 可以看出,传感器的温度和应变响应均具有良好的线性度。

当温度和应变同时变化时,LFF 和 LPFG 的透射波长漂移量可表示为

$$\Delta\lambda_i = K_{T_i} \Delta T + K_{\epsilon_i} \Delta\epsilon, \quad (7)$$

式中 ΔT 和 $\Delta\epsilon$ 分别为温度和应变变化, $i=1,2$ 分别对应 LFF 和 LPFG,由此可得敏感矩阵方程

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{\epsilon1} \\ K_{T2} & K_{\epsilon2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 K_{T1} 和 K_{T2} 分别为 LFF 和 LPFG 的温度灵敏度系数, $K_{\epsilon1}$ 和 $K_{\epsilon2}$ 分别为 LFF 和 LPFG 的应变灵敏度系数,可由图 5,6 的斜率分别得到。将(8)式转置并代入灵敏度系数,得

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{0.00164} \begin{bmatrix} -0.0004 & 0.0185 \\ -0.0604 & -1.3173 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

从而可由 LFF 和 LPFG 的波长变化得到温度和应变的变化,实现对温度和应变的同时测量。

温度和应变同时测量的结果如图 7 所示,分别将温度固定在 25 °C,应变从 88.95 μ ϵ 增大至 711.60 μ ϵ ,以及将应变固定在 266.85 μ ϵ ,温度从 25 °C 增大至 65 °C,得到同时测量的传感特性。通过观察 LFF 和 LPFG 的波长漂移,并利用(9)式,得到温度和应变的变化量。由图可知温度和应变的最大误差分别为 ±1 °C 和 ±25 μ ϵ ,其测量精度受到 OSA 的分辨率,以及是否与等强度梁完全刚性粘贴等因素的影响。

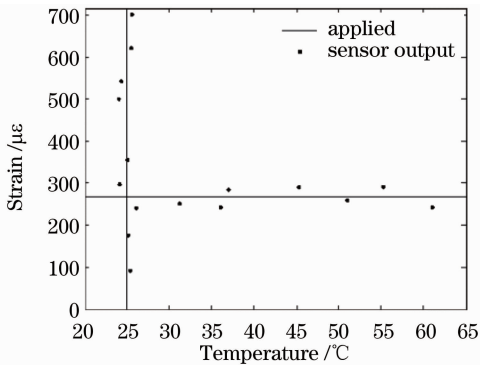


图 7 温度和应变同时测量实验图

Fig. 7 Sensor output obtained by Eq. (9) for the applied strain at a fixed temperature of 25 °C and temperature variations under a constant strain of 266.85 μ ϵ , respectively

4 结 论

设计了一种同时测量温度和应变的传感器,通

过在 LFF 中熔接一段 LPFG 构成。LFF 和 LPFG 对温度和应变有不同的响应灵敏度,故可通过敏感矩阵实现对温度和应变的同时测量。由实验得知,LFF 和 LPFG 的温度灵敏度分别为 -1.3173 nm/°C 和 0.0604 nm/°C,应变灵敏度分别为 -0.0185 nm/μ ϵ 和 -0.0004 nm/μ ϵ ,温度和应变的测量精度分别为 ±1 °C 和 ±25 μ ϵ 。该传感器解决了温度和应变的同时测量问题,其线性结构的干涉谱谱形稳定,灵敏度高,并具有结构简单,不易受电磁干扰等优点,实验结果具有良好的线性度。

参 考 文 献

- Huang Rui, Cai Haiwen, Qu Ronghui *et al.*. Separate measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 232~235
黄锐,蔡海文,翟荣辉等.一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 232~235
- Song Yun, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a long-period fiber grating with rotary refractive index modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1129~1133
宋韵,朱涛,饶云江等.旋转折变型长周期光纤光栅实现应变和温度的同时测量[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1129~1133
- Young Geun Han, Sang Bae Lee. Simultaneous measurement of temperature and strain using dual long-period fiber gratings with controlled temperature and strain sensitivities[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(5): 476~481
- Qiao Xueguang, Han Peng, Jia Zhen'an *et al.*. Research on simultaneous discriminating measurement of temperature and pressure using Fiber Bragg grating sensing technology [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2009, **20**(9): 1186~1188
乔学光,韩鹏,贾振安等.光纤光栅温度压力同时区分测量技术研究[J]. *光电子激光*, 2009, **20**(9): 1186~1188
- Qiao Xueguang, Chen Yi, Jia Zhen'an. Study on simultaneous discriminating measurement of temperature and pressure based on dual FBG[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, **21**(1): 12~14
乔学光,陈懿,贾振安.基于双光纤光栅温度压力同时区分测量的研究[J]. *光电子激光*, 2010, **21**(1): 12~14
- Dapeng Zhou, Li Wei, Wingki Liu *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature based on a fiber Bragg grating combined with a high-birefringence fiber loop mirror[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(18): 4640~4643
- Enbang Li. Sensitivity-enhanced fiber-optic strain sensor based on interference of higher order modes in circular fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(16): 1266~1268
- Chen Chengjin, Zhou Xiaojun, Lan Lan *et al.*. Study on long-period fiber gratings based on micro-bend effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1955~1959
陈成金,周晓军,兰岚等.基于微弯效应的长周期光纤光栅的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 1955~1959
- Song Yun, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. A humidity sensor based on ultra-long-period fiber gratings with asymmetric refractive index modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2042~2045
宋韵,朱涛,饶云江等.基于非对称折变型超长周期光纤光栅的湿度传感器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2042~2045
- Zeng Xiangkai, Rao Yunjiang, Liang Kuai. Characteristic analysis of LPFG resonance wavelength shift wiving to transverse

- load[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0106002
- 曾祥楷, 饶云江, 梁 快. 长周期光纤光栅谐振波长的横向负载特性分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0106002
- 11 Zou Hongbo, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Dynamic demodulation of fiber Bragg grating vibration sensor based on cascaded long-period fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805005
- 邹红波, 梁大开, 曾 捷 等. 基于级联长周期光纤光栅的光纤布拉格光栅振动传感器的动态解调[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0805005
- 12 Guan Shouhua, Yu Qingxu, Zheng Jianzhou. Study on torsion characteristics of a new-type long-period fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1996~2000
- 关寿华, 于清旭, 郑建洲. 一种新型长周期光纤光栅扭曲特性的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1996~2000
- 13 Gu Zhengtian, Zhang Jiangtao. Metal-coated long-period fiber grating liquid sensor based on dual-peak resonance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0305003
- 顾铮先, 张江涛. 基于双峰谐振效应的镀金属长周期光纤光栅液体浓度传感器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0305003
- 14 Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Bending sensing rules for long-period fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1681~1685
- 赵洪霞, 鲍吉龙, 陈 莹. 长周期光纤光栅弯曲传感特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1681~1685
- 15 R. M. Sova, C. S. Kim, Jin U. Kang. Tunable dual-wavelength all-PM fiber ring laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(3): 287~289
- 16 Shao Jun, Liu Junhua, Qiao Xueguang *et al.*. A fiber pressure sensor based on bourdon and cantilever beam of uniform strength [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2006, **17**(7): 807~809
- 邵 军, 刘君华, 乔学光 等. 基于弹簧管悬臂梁的 FBG 压力传感的研究[J]. *光电子激光*, 2006, **17**(7): 807~809

栏目编辑: 谢 婧