

基于复合波长参考的温度稳定光纤光栅传感解调研究

江俊峰 何 盼 刘铁根 刘 琨 王 双 潘玉恒 俞 琳 闫金玲

天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津大学光纤传感研究所, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 为实现温度稳定的光纤光栅传感解调, 提出了综合使用法布里-珀罗(F-P)标准具和乙炔气室进行实时复合波长参考的校正方法。分析了F-P标准具透射光谱和乙炔气室吸收光谱的温度漂移特性。建立实验系统, 测试了F-P标准具透射光谱的温度漂移特性, 实验显示F-P标准具谱线平均温度灵敏度为 $1.16 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 谱线温度重复性误差可达 13.0 pm 。进行了基于F-P标准具单独参考和基于复合波长参考的解调温度稳定性实验, 实验结果表明 $0^\circ\text{C}\sim 55^\circ\text{C}$ 的高低温循环, 基于F-P标准具单独参考的解调值变化范围为 $\pm 32.7 \text{ pm}$, 标准差为 20.7 pm , 基于复合波长参考的解调值变化范围为 $\pm 1.2 \text{ pm}$, 标准差为 0.39 pm , 解调值变化范围温度稳定性提高了27倍。

关键词 光纤光学; 光纤传感; 光纤光栅; 波长参考; 气体吸收谱; 标准具

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1006005

Research of Temperature-Stable Fiber Bragg Grating Sensing Demodulation Based on Composite Wavelength References

Jiang Junfeng He Pan Liu Tiegeng Liu Kun

Wang Shuang Pan Yuheng Yu Lin Yan Jinling

Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Institute of Optical Fiber Sensing of Tianjin University, College of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract In order to realize temperature-stable fiber Bragg grating (FBG) sensing demodulation, a calibration method of real-time composite wavelength references using Fabry-Pérot (F-P) etalon and acetylene gas cell is proposed. The temperature drift properties of F-P etalon transmitted spectrum and acetylene gas cell absorption spectrum are analyzed. The experiment system is developed to test temperature drift property of F-P etalon transmitted spectrum. The experiment shows that the average temperature sensitivity of F-P etalon spectral line is $1.16 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ and the temperature repeatability error can be up to 13.0 pm . Temperature stability of demodulation both using F-P etalon as wavelength reference and composite wavelength references is studied. The experimental results show that under temperature cycle from 0°C to 55°C , the range of variation using single wavelength reference is $\pm 32.7 \text{ pm}$, and the standard deviation is 20.7 pm . However, the range of variation using composite wavelength references can be $\pm 1.2 \text{ pm}$, and the standard deviation is 0.39 pm . The temperature stability of variation range increases 27 times.

Key words fiber optics; fiber sensing; fiber Bragg grating; wavelength reference; gas absorption spectrum; etalon

OCIS codes 060.2310; 060.3735; 060.2340; 230.7405

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)因其体积小、质量轻、耐腐蚀、复用能力强、不受电磁干扰等优点,在航空航天、土木工程、石油化工等工业领域有着广泛应用和发展前景^[1-7]。基于可调谐滤波器的FBG解调方法是广泛地应

收稿日期: 2015-05-12; 收到修改稿日期: 2015-06-08

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915)、国家973计划(2010CB327802)、国家自然科学基金(61227011, 61378043, 61475114)、教育部科学技术研究重大项目(313038)、天津市自然科学基金(13JCYBJC16200)、深圳市科技创新委员会(JCYJ20120831153904083)、中国空间技术研究院CAST创新基金项目

作者简介: 江俊峰(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感、光电检测和光纤偏振技术等方面的研究。

E-mail: jiangjfxu@tju.edu.cn

用于FBG传感系统的高精度解调方法^[8]。可调谐滤波器通过压电陶瓷(PZT)调节腔长实现波长扫描,但PZT的迟滞和蠕变特性使得滤波器透射波长和驱动电压之间重复性差,因此需要进行实时波长校正以保证解调精度。已提出的波长校正方法主要包括FBG参考法^[9]、法布里-珀罗(F-P)标准具参考法^[10]和气体吸收谱线参考法^[11]。FBG参考法需要中心波长非常稳定的FBG,其缺点是易受温度影响且波长参考点少。F-P标准具尺寸小,覆盖光波长范围宽、波长参考点多且间隔均匀,但是F-P标准具腔长同样易受温度影响^[12]。气体吸收谱线参考法能提供温度稳定的参考波长,但覆盖光波长范围较窄,吸收谱线非均匀分布和非等强度的幅值导致波长校正复杂^[13]。

由于在航空航天应用中,FBG解调系统需要在较宽的温度范围内保证解调性能,因此FBG解调系统的温度稳定性非常关键,单一波长参考难以满足要求,目前尚鲜有报道对该方面进行详细地研究和讨论。为实现宽波段高精度的波长参考,本文提出综合使用F-P标准具和乙炔(C₂H₂)气室进行实时复合波长参考,在C波段范围内实现了宽温度范围下波长稳定性为±1.2 pm,标准差σ为0.39 pm的绝对波长解调,并可扩展到L波段。

2 基本原理

图1为基于复合波长参考的温度稳定FBG传感解调系统。系统中放大自发辐射光源(ASE)光源和可调谐滤波器(FPP-TF)构成波长扫描光源,光纤分路器、光纤环形器和光电探测器(PD)构成FBG传感通道。将F-P标准具和C₂H₂气室结合使用进行实时复合波长参考实现FBG波长提取,其中F-P标准具用来提供等间距的波长间隔,并通过采用一个已知波长的限波滤波器去掉F-P标准具的其中一条谱线,初步获得F-P标准具各条谱线的相对波长值,然后利用C₂H₂气室的一条谱线作为绝对波长参考,对F-P标准具的各条谱线的相对波长进行修正。FBG解调系统在每次波长扫描时同步采集F-P标准具、C₂H₂气室的透射光谱和FBG的反射光谱。

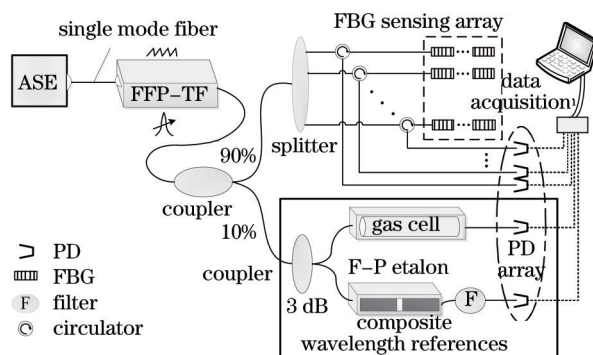


图1 基于复合波长参考的温度稳定FBG传感解调系统

Fig.1 Schematic of FBG sensing system with composite wavelength references

2.1 F-P标准具的温度特性

F-P标准具由2块内表面镀有高反膜的平行平板组成,根据多光束干涉原理,透射光的光强分布为

$$I(\lambda) = \frac{(1 - \rho)^2}{(1 - \rho)^2 + 4\rho \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}nh\right)} I_0(\lambda). \quad (1)$$

式中 $I_0(\lambda)$ 与 $I(\lambda)$ 分别为入射光和透射光的强度, ρ 为截面反射比, λ 为光波长, h 为F-P腔长。当光波长 λ 和F-P腔长 h 满足 $\lambda = \lambda^{(m)} = 2nh/m$, ($m = 0, 1, 2, \dots$) 时,透射光强有极大值。实验系统中使用的F-P标准具为空心腔,折射率 n 可近似等于1。在温度影响下,其腔长变化近似线性。当腔长 h 变化 Δh ,第 m 级干涉条纹透射光强最大值对应波长的改变量:

$$\Delta\lambda^{(m)} = \frac{2\Delta h}{m}. \quad (2)$$

图2表示标称自由光谱范围(FSR, R_{FS})为100 GHz的F-P标准具不同干涉级次下波长改变量差值随腔长变化的曲线。波长改变量与干涉级次成反比,不同干涉级次(m_1 和 m_2)下波长改变量差值关系为

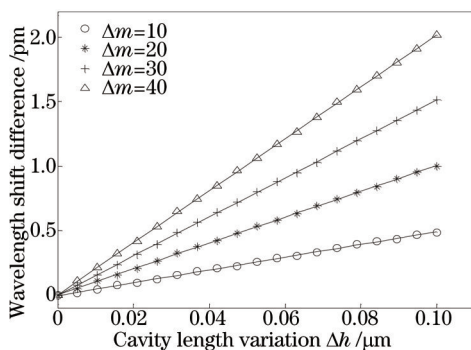


图2 不同干涉级次波长改变量差值随腔长变化曲线

Fig.2 Curves of wavelength shift difference with cavity length variation

$$\Delta\lambda^{(m_1, m_2)} = \Delta\lambda^{(m_2)} - \Delta\lambda^{(m_1)} = 2(m_1 - m_2)\Delta h / (m_1 m_2). \quad (3)$$

当温度变化 90 °C, F-P 标准具腔长变化 0.10 μm。由图 2 可得, F-P 标准具透射中心波长 1528.41 nm(对应干涉级次 $m_1=1962$)和透射中心波长 1560.22 nm(对应干涉级次 $m_2=1922$)的波长改变量分别为 102 pm 和 104 pm, 差值可达 2 pm。因此需对 F-P 标准具不同干涉级次的波长改变量依据(3)式进行补偿。

2.2 C₂H₂气室吸收谱线的温度特性

气体吸收波长是由粒子能级跃迁决定的。当一束中心波长为 λ 、光强为 I_0 的光信号通过气室后, 透射光的光强分布满足朗伯-比尔定律:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-K(\lambda) c l], \quad (4)$$

式中 $K(\lambda)$ 为谱线吸收系数; c 为气体体积分数; l 为光与气体相互作用的长度。

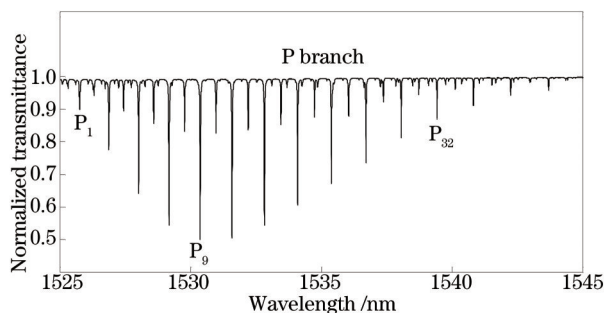


图3 去基线后的气体吸收光谱

Fig.3 Gas absorption lines after baseline extraction

C₂H₂ 气体在 1525 nm 附近有强吸收谱线, 根据转动量子数的正负可以将吸收谱线分为 P 支和 R 支, 并用转动量子数编号。图 3 为去基线后的 C₂H₂ 气体吸收光谱, 在 C 波段具有 20 多条强吸收谱线, 分布在 1525~1545 nm 范围。为提高寻峰精度, 选取信噪比(SNR)高的 C 波段最强吸收谱线 P₉ 作为参考谱线, 校正 F-P 标准具温度漂移。由高分辨率光谱谱线(HITRAN)分子光谱数据可得 26.7 kPa 压强下, C₂H₂ 气体吸收光谱参考谱线的峰值波长为 1530.3714 nm, 对应 F-P 标准具干涉光谱级次在 1959~1961 之间。

在不大的温度变化范围内, 温度本身引起的谱线漂移可以忽略不计。温度对谱线波长稳定性的影响主要表现为改变密闭气室内气压从而引起谱线漂移。对于参考谱线, 气压引起的波长漂移约为 0.016 pm/kPa^[4]。对于室温下 26.7 kPa 的密闭气室, 温度变化 90 °C, 由理想气体状态方程可得, 气压变化 8.1 kPa, 参考谱线波长漂移 0.13 pm。C₂H₂ 气室参考谱线温度漂移系数为 1.4×10⁻³ pm/°C, 具有很高的温度稳定性。若降低 C₂H₂ 气室气压, 将进一步提高 C₂H₂ 气室参考谱线温度稳定性。

2.3 基于复合波长参考的 FBG 解调温度漂移校正方法

图 4 为复合波长参考的 FBG 解调温度漂移校正方法示意图。对 F-P 标准具透射谱进行寻峰, 再将得到的峰值采样点与已知的峰值波长对应, 通过样条插值建立采样点与波长的函数关系。基于 F-P 标准具采样点-波长函数关系计算得到 C₂H₂ 气室参考谱线的峰值波长 λ_r 和 FBG 传感器的峰值波长 λ_f 。C₂H₂ 气室参考谱

线的真实波长为 λ_{ref} ,环境温度变化使F-P标准具透射谱漂移,导致参考谱线波长解调值 λ_g 偏离真实波长 λ_{ref} ,差值 $\Delta\lambda_1 = \lambda_g - \lambda_{ref}$ 。利用此差值对FBG解调波长进行校正,得到FBG真实波长 λ_{FBG} 可表示为

$$\lambda_{FBG} = \lambda_f - k \cdot \Delta\lambda_1, \quad (6)$$

式中 $k = \frac{m_1}{m_2} = \frac{m_1 \cdot R_{FS}}{m_1 \cdot R_{FS} + (\lambda_f - \lambda_g)}$, m_1, m_2 气室参考谱线所在干涉级次。

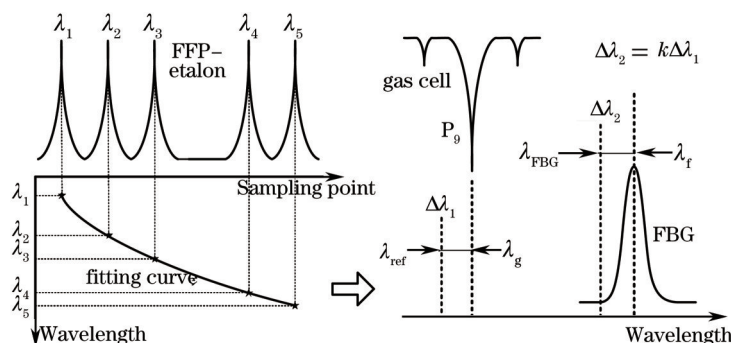


图4 复合波长参考的FBG解调温度漂移校正方法示意图

Fig.4 Diagram of FBG demodulation correcting temperature inducing wavelength shift using composite wavelength references

3 实验与结果分析

实验系统按图1搭建,其中ASE光源功率为10 mW,覆盖C波段,可调谐滤波器的自由光谱范围为70 nm、线宽为0.0375 nm。采用1×8光纤分路器,90%的波长扫描光功率经过分路器和环形器到达8个FBG传感链路,10%的波长扫描光功率经过3 dB耦合器后分别进入F-P标准具和C₂H₂气室。C₂H₂气室参考谱线的温度稳定性小于0.01 pm/°C,因此先用C₂H₂气室参考谱线研究F-P标准具的温度特性。在光源进行波长扫描时,利用F-P标准具的梳状谱线对C₂H₂气室参考谱线进行寻峰,通过得到的气体波长与标准气体波长的差值即可计算出F-P标准具透射光谱的整体漂移。

实验时将F-P标准具置于恒温箱中,控制温度从-20 °C升温到60 °C,温度步进间距10 °C,在每个温度点保温5 h后进行测量,共测试5次。图5是测量结果,可以看到随温度增加,F-P标准具透射光谱波长漂移增加,当环境温度变化80 °C,波长的温度漂移在92.0~94.0 pm,平均温度灵敏度达1.16 pm/°C,温度灵敏度变化小于3%。5次测量中,F-P标准具透射光谱波长漂移随温度变化趋势基本一致,但数值重复性不够好,同一温度下,光谱漂移量最大差值可达到13.0 pm。可见F-P标准具器件的温度重复性较差,通过温度监测采样进行算法补偿难以保证解调温度稳定性。

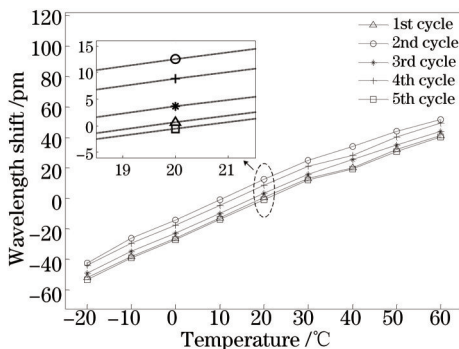


图5 F-P标准具透射光谱温度漂移特性曲线

Fig.5 Transmission spectra temperature shift curves of F-P etalon

将0 °C下中心波长为1555.0237 nm的FBG置于恒温浴槽中保持0 °C,恒温浴槽温度稳定性范围为±0.1 °C,则温度引起的FBG波长变化范围小于±1.0 pm(FBG的温度灵敏度为10.2 pm/°C)。同时把F-P标准具和C₂H₂气室放入恒温箱中,研究环境温度对波长解调的影响。实验中先将恒温箱的温度从40 °C降至0 °C,再升至55 °C,升降温过程共用10 h。图6(a)为只采用F-P标准具的FBG波长解调结果随时间变化的曲线,解调出的FBG波

长在 1554.9947~1555.0601 nm 内变化,变化范围为 ± 32.7 pm,标准差 σ 为 20.7 pm。图 6(b)和 6(c)是基于复合波长参考的 FBG 解调结果。图 6(b)在进行 F-P 标准具透射光谱温度漂移补偿时,不考虑气体参考谱线和 FBG 波长对应 F-P 标准具透射谱干涉级次差别,即 $k=1$ 。解调出的 FBG 波长在 1555.0223~1555.0251 nm 内变化,变化范围为 ± 1.4 pm,标准差 σ 为 0.61 pm。图 6(c)则考虑了干涉级次差别进行校正。解调出的 FBG 波长在 1555.0225~1555.0249 nm 内变化,变化范围为 ± 1.2 pm,标准差 σ 为 0.39 pm。因此考虑干涉级次差别进行补偿校正可使波长解调结果的标准差减小 36%。

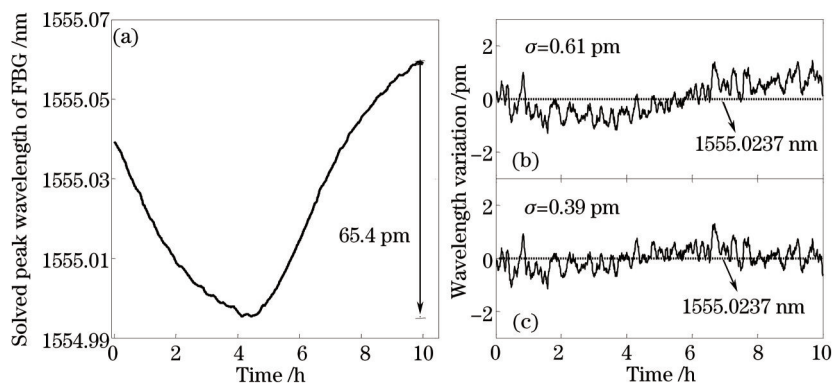


图 6 FBG 波长解调结果。(a) F-P 标准具单独作为波长参考;(b) 采用复合波长参考且 $k=1$;(c) 采用复合波长参考且 $k=m_1/m_2$

Fig.6 FBG wavelength demodulation results. (a) Etalon as single reference wavelength; (b) composite reference wavelengths, $k=1$;
(c) composite reference wavelengths, $k=m_1/m_2$

4 结 论

为实现温度稳定的 FBG 传感解调,提出了综合使用 F-P 标准具和 C_2H_2 气室进行实时复合波长参考的校正方法。理论和实验研究了 F-P 标准具透射光谱的温度漂移特性,实验测试表明在 -20 $^{\circ}C$ ~ 60 $^{\circ}C$ 范围内 F-P 标准具的谱线平均温度灵敏度为 1.16 pm/ $^{\circ}C$,谱线温度重复性误差可达 13.0 pm。研究了 F-P 标准具单独作为波长参考和复合波长参考的解调温度稳定性,实验结果表明 0 $^{\circ}C$ ~ 55 $^{\circ}C$ 的高低温度循环,F-P 标准具单独作为波长参考的解调值变化范围高达 ± 32.7 pm,标准差 σ 为 20.7 pm;基于复合波长参考且校正计算中考虑 F-P 标准具透射谱干涉级次差别,解调值变化范围为 ± 1.2 pm,标准差 σ 为 0.39 pm,解调值变化幅度温度稳定性提高了 27 倍,解调具有非常好的温度稳定性。今后将进一步采用不同气体、不同气压的气室和多种 F-P 标准具开展实验对比研究,以进一步提高解调稳定性,满足环境恶劣的航天等应用需求。

参 考 文 献

- Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1263-1276.
- Lamberti A, Vanlanduit S, De Pauw B, *et al.*. A novel fast phase correlation algorithm for peak wavelength detection of fiber Bragg grating sensors[J]. Opt Express, 2014, 22(6): 7099-7112.
- Yu Youlong, Tan Ling, Li Qian, *et al.*. Influence of thermal effect caused by piezoelectric transducer on interferometric demodulation for fiber Bragg grating sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0506005.
余有龙,谭玲,李茜,等. 压电陶瓷发热对光纤光栅传感信号干涉解调的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0506005.
- Song Zhiqiang, Qi Haifeng, Li Shujuan, *et al.*. Research on control technology of fiber grating wavelength by pulling force in grating fabrication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706009.
宋志强,祁海峰,李淑娟,等. 光纤光栅制作中波长拉力控制技术的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706009.
- Qiuming Nan, Lei Song. Research on 3D fiber Bragg grating accelerometer[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(s1): s12302
- Chen Xian, Yu Shangjiang, Yang Jixiang, *et al.*. Measurement efficiency of high-speed demodulation by linear filtering method[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 145-150.
陈显,余尚江,杨吉祥,等. 线性滤波法高速解调技术中的测量有效性研究[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 145-150.
- Wang Yongjun, Liu Yongchao, Zhang Jingtao, *et al.*. Interrogation technology for high-speed and high-resolution fiber Bragg grating sensing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205003.

- 王拥军, 刘永超, 张靖涛, 等. 高速高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205003.
- 8 Li Zhengying, Zhou Zude, Tong Xinglin, *et al.*. Research of high-speed large-capacity fiber Bragg grating demodulator[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306007.
- 李政颖, 周祖德, 童杏林, 等. 高速大容量光纤光栅解调仪的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0306007.
- 9 Liu Kun, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng, *et al.*. Nonlinearity investigation of tunable optical filter based on FBG sensing system[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2010, 21(7): 970-973.
- 刘 琨, 刘铁根, 江俊峰, 等. 基于FBG传感系统的可调光滤波器非线性研究[J]. 光电子·激光, 2010, 21(7): 970-973.
- 10 Liang Xiao, Liu Tiegeng, Liu Kun, *et al.*. Method of real-time calibration for tunable optical filter nonlinearity[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1445-1449.
- 梁 霄, 刘铁根, 刘 琨, 等. 一种可调谐光滤波器非线性实时标定方法研究[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1445-1449.
- 11 Qiao Xueguang, Wang Yu, Fu Haiwei, *et al.*. High-accuracy real time calibration of tunable Fabry-Pérot filter on large range[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(5): 852-855.
- 乔学光, 王 瑜, 傅海威, 等. 可调谐法布里-珀罗滤波器的高精度大范围实时定标[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 852-855.
- 12 Liu K, Jing W C, Peng G D, *et al.*. Investigation of PZT driven tunable optical filter nonlinearity using FBG optical fiber sensing system [J]. Opt Commun, 2008, 281(12): 3286-3290.
- 13 Rivera E, Thomson D J. Accurate strain measurements with fiber Bragg sensors and wavelength references[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(2): 325.
- 14 Swann W C, Gilbert S L. Pressure-induced shift and broadening of 1510-1540 nm acetylene wavelength calibration lines[J]. J Opt Soc Am B, 2000, 17(7): 1263-1270.

栏目编辑: 王晓琰