

文章编号: 0253-2239(2007)02-0207-5

光强检测型光纤光栅温变不敏感动态压力传感研究^{*}

郭 团 赵启大 刘丽辉 黄桂岭 薛力芳 李国玉 董 波 刘 波
张伟刚 开桂云 袁树忠 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要: 报道了基于光纤光栅反射谱带宽调制和光强差分检测技术实现单一光纤光栅温变不敏感动态压力传感的新方法。设计了一种结构新颖的双孔梁压力传感装置, 依据双孔梁有限元受力分析将光纤光栅准确定位于线性梯度应变区, 压力作用下光纤光栅反射谱对称展宽, 反射光强线性正比于压力变化。基于光波导理论和材料力学原理推导了线性梯度应变场作用下光栅反射谱带宽、反射光强与压力之间的响应关系。利用光强差分检测技术取代传统波长解调方法, 简化解调过程的同时传感系统免受温变影响。实验表明, 在 $-10\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化范围内, 系统测量误差小于总量程 (120 kPa) 的 1.8%, 动态响应速度约 80 Hz, 重复测量系统输出稳定, 具有较好的应用价值。

关键词: 导波与光纤光学; 光纤传感; 光纤光栅; 动态压力传感; 带宽调制; 光强检测

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Light Intensity-Referred and Temperature-Insensitive Fiber Bragg Grating Dynamic Pressure Sensor

Guo Tuan Zhao Qida Liu Lihui Huang Guiling Xue Lifang Li Guoyu Dong Bo
Liu Bo Zhang Weigang Kai Guiyun Yuan Shuzhong Dong Xiaoyi

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract: The temperature-insensitive fiber Bragg grating (FBG) dynamic pressure sensing based on reflection spectrum bandwidth modulation and differential optical power detection is proposed and experimentally demonstrated. A specially designed double-hole cantilever beam is presented to locate the FBG into the linear strain-gradient region, resulting in FBG reflection spectrum symmetrical broadening and optical power linear increasing with pressure enhancing. Based on the theory of optical waveguide and material mechanics, the causation of FBG spectrum broadening under the linear strain-gradient is analyzed, and the corresponding force-to-bandwidth broadening relation and force-to-optical power relation are formulized. By replacing the traditional wavelength demodulation with optical power detection technique, the demodulating process is simplified and immune to temperature variation. For a temperature range of $-10\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, the measured pressure fluctuates less than 1.8% without any temperature compensation. The system acquisition time is up to 80 Hz for dynamic pressure measurement. The experiment demonstrates the system is stable and applicable.

Key words: guided wave and fiber optics; fiber sensing; fiber Bragg grating (FBG); dynamic pressure sensing; bandwidth modulation; optical power detection

1 引 言

光纤光栅传感器因其不受电磁干扰、重量轻、结构紧凑、对多种物理量敏感, 特别是可利用波分、空

分和时分复用技术实现分布式网络化传感等特点, 国内外已开展了广泛和深入的研究^[1,2]。压力传感是光纤光栅传感最为主要和直接的应用之一。由于

^{*} 国家自然科学基金 (60572018, 60577018)、国家 973 重点基础研究发展计划 (2003CB314906)、教育部博士点基金 (20020055036)、天津市自然科学基金重点项目 (013800511) 和天津市科技发展计划 (05YFGPG04900) 资助课题。

作者简介: 郭 团 (1979-), 男, 天津人, 博士研究生, 主要从事光纤传感理论与应用方面的研究。

E-mail: guotuan2001@163.com

导师简介: 赵启大 (1942-), 男, 北京人, 教授, 博士生导师, 主要从事声光信息处理、光纤通信与光纤传感技术的研究。

E-mail: zhaoqd@nankai.edu.cn

收稿日期: 2006-04-04; 收到修改稿日期: 2006-06-26

温度与压力的变化将同时引起光栅反射谱的漂移,因此,基于传统波长检测方法的光纤光栅压力传感系统必须解决温度和压力双参量的交叉敏感问题。针对这一问题,国内外报道了许多有效的解决方案^[3~8]。其中,基于双光栅的区分测量方法包括:参考光栅压力屏蔽法^[3],布拉格(Bragg)和长周期光栅级联法^[4],双波长光栅叠加写入法^[5,6],双芯径光栅写入法^[7]等;基于单光纤光栅的区分方法包括:一、二阶光栅衍射法^[8],高双折射光纤^[9]和双掺杂光纤^[10,11]光栅写入法,不同材料基底梁粘贴法^[12]和不同热膨胀材料封装法^[13]等;光栅结合其它器件实现区分测量的方法包括:光栅级联法布里-珀罗(F-P)干涉仪法^[14];光栅尾纤端面封装热铬材料^[15]或荧光衰减材料^[16]等。这些方案的共同点在于温度和压力信息均为波长编码,而复杂的后期波长解调系统在一定程度上限制了其在实际应用中的普及推广。因此,一种直接将波长信息转变为光强信息,通过简单直观的光强检测实现多参量区分测量的方法成为光纤光栅传感为适应实际应用的需要而另辟蹊径的一门技术,具有很好的研究价值和背景。

本文报道一种结构新颖的双孔梁压力传感装置,验证了利用光栅反射谱带宽调制和光强差分检测技术实现单一光纤光栅温变不敏感压力传感的新方法。结合有限元方法将光纤光栅准确定位于双孔梁线性梯度应变区,实验得到了反射光强线性正比于压力变化的光纤光栅展宽谱,并从理论上推导了线性梯度应变场作用下光栅反射谱带宽、反射光强与压力之间的响应关系。实验表明,基于带宽调制的光强差分检测方法在简化解调过程的同时传感系统对温度变化不敏感,可实现单一光纤光栅在变温环境下压力的准确测量。与此同时,中心对称双孔结构梁具有很好的应变瞬时回复性,适合动态环境下的压力测量。

2 基本原理

2.1 压力作用下双孔梁应变有限元分析

双孔梁为中心对称结构,由弹性钢制成,其结构如图 1 所示。光纤布拉格光栅粘贴于梁左侧孔上方平面的线性梯度应变区,待测压力沿中轴线垂直施加于双孔梁中心对称点。

基于有限元方法分析在静态压力作用下双孔梁剖面应力分布,如图 2 所示。进一步计算得到压力作用下双孔梁上平面沿光纤轴向的应变分布曲线,如图 3 所示,其中,光栅粘贴区域由点划线标出。由

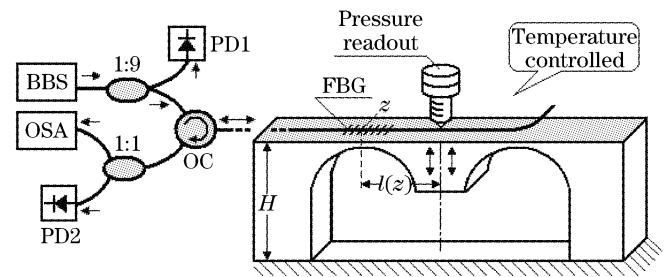


图 1 压力传感系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pressure sensing system

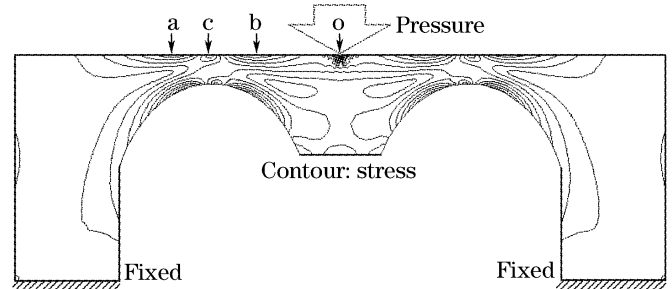


图 2 压力作用下双孔梁剖面应力分布

Fig. 2 Stress distribution of DHCB under vertically applied pressure

图 3 可知,双孔梁上表面应变为对称分布,光栅粘贴于以左弓梁弧顶正上方零应变点(点 c)为中心的最大线性应变区(点 a 和点 b 之间)。压力作用下,光纤光栅以 c 点为临界点,左侧栅区感受拉应变,对应反射波长向长波方向漂移,右侧栅区感受压应变,对应反射波长向短波方向漂移。因此,压力作用下的光栅展宽谱呈现中心波长恒定,波形对称展宽的变化趋势。由于光栅左右两侧均部分地超出了应变拐点 a 和 b,超出部分的栅格重叠反射同应变下光谱,因此反射谱两侧均出现一个反射次峰。压力实验谱与上述分析吻合,如图 4 所示。对于不同的压力作用(55 kPa, 60 kPa 和 65 kPa),光栅粘贴区应变均呈线性分布,最大压缩和拉伸值正比于施加压力大

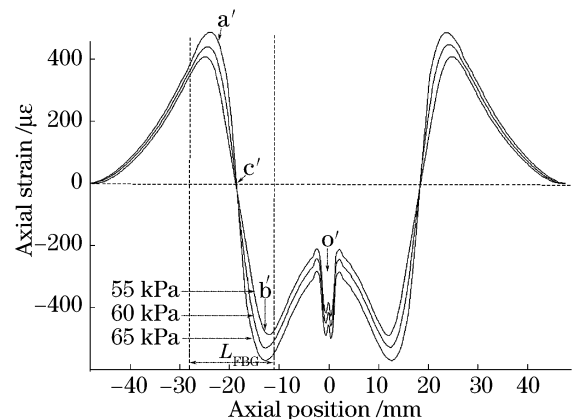


图 3 压力作用下双孔梁上表面沿光纤轴向应变分布

Fig. 3 Strain magnitude distribution along the upper surface of the double-hole cantilever beam

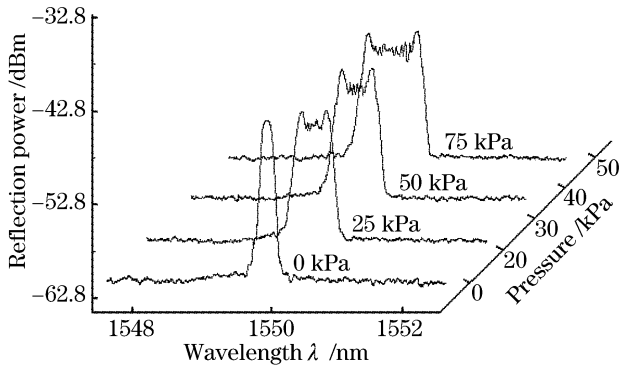


图 4 光纤光栅压力响应系列反射谱(温度固定于 20 °C)

Fig. 4 FBG reflection spectra versus pressure at fixed temperature of 20 °C

小,如图 3 所示。

对于空间均匀分布的温度场变化而言,由同一材料制成双孔梁各个位置的热膨胀系数相同,且光栅基底梁表面平整,温度变化引起的栅区各位置栅格应变相同。因此,温度变化仅导致反射谱中心波长漂移,而反射谱谱形不变。实验结果与上述分析吻合,如图 5 所示。其中,粘贴于钢梁基底的光纤光栅的波长温度响应系数为裸光纤光栅的 3 倍。

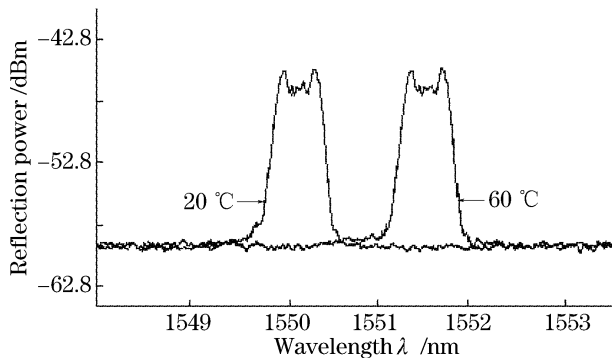


图 5 光纤光栅温度响应系列反射谱(压力固定于 50 kPa)

Fig. 5 FBG reflection spectra versus temperature at fixed pressure of 50 kPa

2.2 线性梯度应变场作用下光纤光栅反射谱带宽、光强与压力响应关系

依据材料力学分析^[17],光栅栅区 z 点的轴向应变 $\epsilon(z)$ 可表示为

$$\epsilon(z) = \frac{Hl(z)}{2EI(z)}F, \quad (1)$$

其中 H 为梁高度, $l(z)$ 为 z 点与压力作用点间距离, E 为梁的杨氏模量, $I(z)$ 为 z 点垂直截面对应梁惯性距,其大小取决于梁本身的制成材料和 z 点梁的垂直截面积。

(1) 式表明,在相同压力作用,由于光栅栅区各位置对应基底梁的 $l(z)$ 和 $I(z)$ 不同,因此相应位置的栅格应变 $\epsilon(z)$ 将沿光纤轴向随基底梁同趋势变

化。设光栅长度为 L ,则栅区最大应变差 $\Delta\epsilon_{\max}$ 可表示为

$$\Delta\epsilon_{\max} = \frac{H}{2E} \int_{z_0}^{z_0+L} \frac{l(z)}{I(z)} dz \cdot F. \quad (2)$$

对于一个初始栅距均匀分布的光纤光栅,在非均匀环境场的作用下,光栅反射谱将会产生啾啾^[18,19]。在轴向非均匀应变场的作用下,光栅反射谱带宽展宽量可表示为

$$\Delta\lambda_{\text{BW}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda(1-p_e) \cdot \Delta\epsilon_{\max}, \quad (3)$$

其中 n_{eff} 为纤芯有效折射率, Λ 为栅距, p_e 为弹光系数。将(2)式代入(3)式,则谱宽-压力响应关系为

$$\Delta\lambda_{\text{BW}} = n_{\text{eff}}\Lambda \frac{(1-p_e)H}{E} \int_{z_0}^{z_0+L} \frac{l(z)}{I(z)} dz \cdot F. \quad (4)$$

随着光栅反射谱的展宽,反射光强将随之增加。光栅反射光强增加量 ΔP 与对应带宽变化 $\Delta\lambda_{\text{BW}}$ 之间的关系为

$$\Delta P = k\alpha^2 R P_{\text{BBS}}(\lambda) \cdot \Delta\lambda_{\text{BW}}, \quad (5)$$

其中 k 和 α 分别为器件连接的光强耦合系数和光纤弯曲损耗; R 和 $\Delta\lambda_{\text{BW}}$ 分别为光栅反射率和反射带宽变化量; $P_{\text{BBS}}(\lambda)$ 宽带光源的输出谱密度,对增益平坦光源, $P_{\text{BBS}}(\lambda) \approx P_{\text{BBS}}$ 。

将(4)式代入(5)式,则光强-压力响应关系为

$$\Delta P = k\alpha^2 R P_{\text{BBS}} n_{\text{eff}}\Lambda \frac{(1-p_e)H}{E} \int_{z_0}^{z_0+L} \frac{l(z)}{I(z)} dz \cdot F. \quad (6)$$

(4)式和(6)式表明,光栅反射谱带宽和反射光强随压力变化呈线性关系,与温度变化无关。

3 实验结果与讨论

光纤光栅压力传感实验系统如图 1 所示。传感光纤光栅利用相位掩模侧面辐照技术通过准分子激光紫外写入掺锗单模光纤得到,其室温自由状态下反射谱中心波长 1549.8 nm,半峰全宽 0.2 nm。实验用宽带光源(BBS)有效带宽 40 nm(C 波段); 1×2 型耦合器分光比分别为 1:9 和 1:1,光环形器(OC)工作窗口 1530~1570 nm;分辨力为 0.01 nm 的光谱分析仪(OSA)监测反射谱形变化;两个光强探测器(PD)分别用于检测光源输出光强(10%)和光栅反射光强(50%)。定义光强差分函数 $F(P_1, P_2)$ 用以消除光源输出抖动误差以及光栅反射谱漂移过程中光源不同波段波形起伏引入的非平坦误差,其表达式为 $F(P_1, P_2) = (P_2 - \mu P_1)/(P_2 + \mu P_1)$,其中

P_1 为光源输出光强, P_2 为光栅反射光强, μ 为光强匹配因子(实验中取值 3.7×10^{-4})。

在 $-10 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度变化范围内, 待测压力加至 120 kPa , 光纤光栅反射谱及反射光强的温度和压力响应曲线如图 6 所示。对于温度变化而言, 由于热光效应作用的影响, 光栅反射谱中心波长随着温度的升高而向长波方向漂移, 如图 6(a) 所示。然而这种温致波长漂移并不引起光栅反射谱的谱形变化, 反射光强保持恒定, 如图 6(b) 所示。对于压力作用而言, 双孔结构梁在轴心上压力作用下其上表面光栅粘贴区产生线性梯度应变, 梯度斜率正比于所施加的压力数值。因此, 随着压力的增加, 光栅反射谱带宽和反射

功率均线性增加, 如图 6(d) 所示。虽然光栅各位置反射波长漂移量正比于压力施加值, 但由于光栅左右栅区分别感受拉应变和压应变, 应变数值相同, 符号相反, 因此, 反射谱在对称展宽过程中中心波长保持恒定, 如图 6(c) 所示。考虑到光栅在梯度应变作用下反射谱将随之有规律的展宽, 窄带阈值将无法覆盖整个展宽波形, 实验中以 6 dB 阈值反射谱带宽为谱宽参照记录。实验测得, 在 $-10 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度变化范围内, 系统测量误差小于 1.8% 。检测光强与压力变化呈良好的线性关系, 重复测量稳定性好。通过改变光栅粘贴处侧弓梁厚度, 选择横梁压力测量点位置, 压力测量范围和精度可调整。

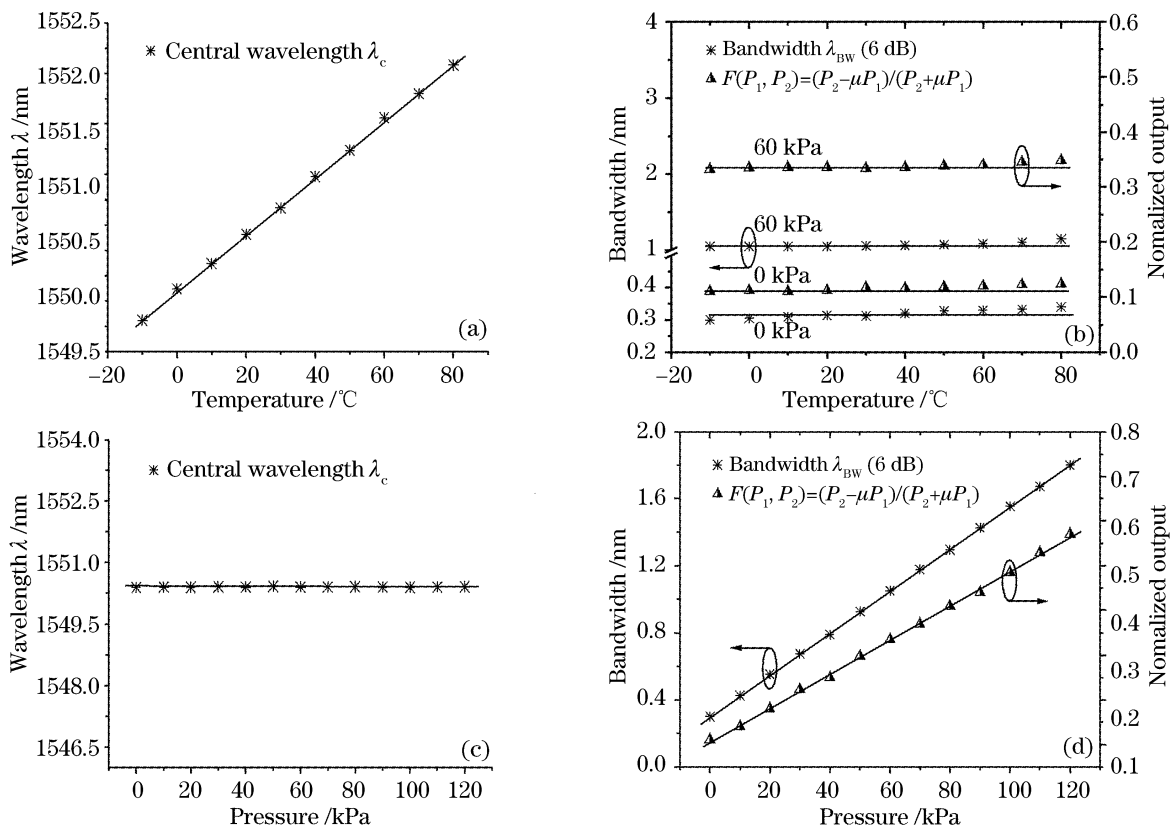


图 6 光纤光栅反射谱的温度和压力响应曲线

Fig. 6 FBG reflection spectra versus temperature and pressure

传感系统的动态响应特性是其重要评价参量之一, 特别是在实际使用过程中可能存在待测量变化迅速或待测环境不稳定等因素。为此, 对双孔梁光纤光栅压力传感系统进行了动态压力测试。实验中, 双孔梁上表面中心位置感受一个周期递减的下三角压力波, 随着下压力周期的逐渐减小, 传感系统在单位压力周期内的数据输出相应减少, 直至单一压力周期仅输出两个数据点, 此过程可以确定传感系统的动态响应时间。双孔梁光纤光栅传感系统的动态压力测试曲线如图 7 所示。实验得到, 该系统的响应时间约为 12 ms (80 Hz)。可能存在的制约

传感系统响应速度的因素包括: 双孔梁自身应变回复速度(取决于制梁材料和梁的结构), 光纤光栅与基底梁之间粘贴的牢固性和粘贴定位的准确性, 以及光电探测器的响应速度等。

实验发现, 随待测环境温度升高(特别是高温区), 由于双孔梁制成材料自身存在的热致软化效应而产生附加弯应变, 恒定压力作用下的光栅反射光强将略微增加。通过优化双孔梁结构参量, 选取热性能稳定、回复性好的制梁材料, 改善光栅粘贴质量, 提高粘贴材料的机-热稳定性以及优化光栅栅区粘贴位置等方法, 双孔梁压力传感器的稳定性可进

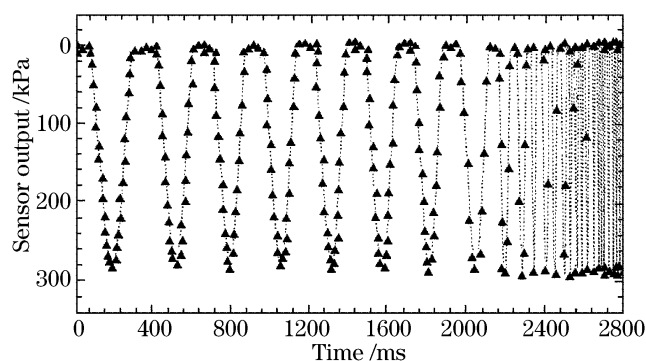


图 7 周期递减压力作用下传感系统输出

Fig. 7 Output of the sensor under a pressure applied with decreasing period

一步提高。

4 结 论

设计了一种结构新颖的双孔梁光纤光栅压力传感装置,利用有限元方法分析了双孔梁压力作用下的应变分布曲线,理论推导了光纤光栅在线性梯度应变场作用下的光栅反射谱带宽、反射光强的压力响应关系,实验验证了基于光纤光栅反射谱带宽调制光强检测的温变不敏感压力测量系统的可行性。使用经济实用的光强检测器取代光谱分析仪,利用光强差分检测技术解决光源抖动对测量结果的影响,系统实现了 80 Hz 的动态压力传感。与此同时,通过主动压力控制,此装置可实现中心波长无漂移、反射谱对称展宽的谱形调制;通过主动温度控制,光栅展宽谱中心波长可根据需要进行不同波段的动态调制(调制速度由温变速度决定)。因此,光纤光栅反射谱带宽和中心波长的压力/温度独立调制在此双孔梁性能测试中得到较好的实现,这一技术在光纤通信领域中的可调色补偿和可调带通滤波方面也具有一定的应用潜力。

参 考 文 献

- 1 Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 2 Jiang Deshang, He Wei. Review of application for fiber Bragg grating sensors[J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2002, **13**(4): 421~430 (in Chinese)
姜德生,何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(4): 421~430
- 3 Pierre Ferdinand, O. Ferragu, J. L. Lechien *et al.*. Mine operating accurate stability control with optical fiber sensing and Bragg grating technology: the European BRITE-EuRam STABILOS project[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1303~1313
- 4 H. J. Patrick, G. M. Williams, A. D. Kersey *et al.*. Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/

- temperature discrimination[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(9): 1223~1225
- 5 Xu M. G., Archambault J. L., Reekie L. *et al.*. Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors[J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(13): 1085~1087
- 6 E. Udd, D. V. Nelson, C. M. Lawrence *et al.*. Three axis strain and temperature sensor[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2718**: 104~109
- 7 James S. W., Dockney M. L., Tatam R. P.. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in fiber Bragg grating sensors[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(12): 1133~1134
- 8 Brady G. P., Kalli Kyriacos, Webb D. J. *et al.*. Recent developments in optical fibre sensing using fibre Bragg gratings[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2839**: 8~19
- 9 J. R. Dunphy, G. Meltz, M. Varasi *et al.*. Embedded optical sensor capable of strain and temperature measurement using a single diffraction grating[P]. U. S. patent 5,399, 1994. 854-21
- 10 J. Jung, N. Park, B. Lee. Simultaneous measurement of strain and temperature by use of a single fiber Bragg grating written in an erbium; ytterbium-doped fiber [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(7): 1118~1120
- 11 P. M. Cavaleiro, F. M. Araujo, L. A. Ferreira *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using Bragg gratings written in germanosilicate and boron-codoped germanosilicate fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(12): 1635~1637
- 12 X. Y. Dong, Y. Q. Liu, Z. G. Liu *et al.*. Simultaneous displacement and temperature measurement with cantilever-based fiber Bragg grating sensor[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **192**(3~6): 213~217
- 13 Liu Y. Q., Guo Z. Y., Zhang Y. *et al.*. Research on the simultaneous measurement of pressure and temperature using one fiber grating[J]. *Chin J. Lasers*, 2000, **A27**(11): 1002~1006
- 14 Tonguy Liu, G. F. Fernando, Y. J. Rao *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurements in composites using a multiplexed fibre Bragg grating sensor and an extrinsic Fabry-Perot sensor, in Smart Sensing[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3042**: 203~212
- 15 C. Fernandez-Valdivielso, I. R. Matias, F. J. Arregui. Simultaneous measurement of strain and temperature using a fiber Bragg grating and a thermochromic material[J]. *Sensors and Actuators A*, 2002, **101**(1~2): 107~116
- 16 D. I. Forsyth, S. A. Wade, T. Sun, X. Chen *et al.*. Dual temperature and strain measurement with the combined fluorescence lifetime and Bragg wavelength shift approach in doped optical fiber[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(31): 6585~6592
- 17 Guo Tuan, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and pressure using a single fiber Bragg grating based on reflected wave's broadened bandwidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1401~1405 (in Chinese)
郭团,乔学光,贾振安等. 单光纤光栅波谱展宽温度压力同时区分测量[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1401~1405
- 18 Tu Qinchang, Zhang Weigang, Chen Jianjun *et al.*. A novel high sensitivity chirp tuning device of fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1153~1156 (in Chinese)
涂勤昌,张伟刚,陈建军等. 一种新颖的高灵敏度光纤光栅带宽调谐机构[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1153~1156
- 19 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Dong Xiaoyi *et al.*. A novel independent tuning method of center wavelength and bandwidth of fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 164~169 (in Chinese)
张伟刚,开桂云,董孝义等. 新型光纤光栅中心波长与带宽独立调谐方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 164~169