

文章编号: 0253-2239(2004)10-1401-5

单光纤光栅波谱展宽温度压力同时区分测量*

郭 团 乔学光 贾振安 孙 安 陈长勇

(西安石油大学理学院光纤传感重点实验室, 西安 710065)

摘要: 报道了利用单光纤布拉格光栅反射波带宽展宽技术实现温度与压力同时区分测量的新方案。通过聚合物材料将光栅粘接于双孔悬臂梁非均匀应变区,在压力作用下悬臂梁带动光栅发生非均匀应变,使布拉格反射波波长漂移的同时带宽展宽,而温度变化仅引起反射波波长漂移。在 20~100 ℃和 0~7.8 N 的温度和压力测量范围内,温度测量精度 ± 1.1 ℃,压力测量精度 ± 0.18 N,布拉格反射波中心波长漂移量和带宽展宽量随温度和压力的变化呈良好的线性关系,线性度均高于 99.6%。多次测量表明,此方案的展宽波形稳定,重复性好。

关键词: 光传感技术; 光纤布拉格光栅; 带宽展宽; 区分测量

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Simultaneous Measurement of Temperature and Pressure using a Single Fiber Bragg Grating Based on Reflected Wave's Broadened Bandwidth

Guo Tuan Qiao Xueguang Jia Zhen'an Sun An Chen Changyong

(Key Lab of Optical Fiber Sensing, Science School, Xian Shiyou University, Xian 710065)

(Received 16 October 2003; revised 8 December 2003)

Abstract: A novel approach for simultaneous measurement of temperature and pressure using a single fiber Bragg grating (FBG) based on reflected wave's broadened bandwidth is proposed and demonstrated. FBG is affixed on the non-uniformity strain area of double-hole cantilever beam by special polymer. Bragg reflected wavelength is shifted and reflected bandwidth is broadened by pressure change, while temperature change just leads to the shift of reflected wavelength. In the temperature range 20~100 ℃ and pressure range 0~7.8 N, the precisions of temperature measure and pressure measure are ± 1.1 ℃ and ± 0.18 N respectively. The response curves of FBG have good linearity which are higher than 99.6%. Reflection spectrum has a steady figure through repeated measurement.

Key words: optical sensing; fiber Bragg grating; broadened bandwidth; simultaneous measurement

1 引 言

在光纤传感技术发展的过程中,产生出来一种更新颖、更具有光纤本征特性的新型传感器——光纤光栅传感器。这种传感器除具有一般光纤传感器不受电磁干扰、灵敏度高、重量轻、结构紧凑、成本低,适于在高温、腐蚀性或危险性环境使用的优点之

外还具有本征自相干能力强和在一根光纤上利用波分复用技术实现多点复用、多参量分布式区分测量的独特优势^[1],因而具有巨大的发展潜力。温度和压力传感是光纤光栅传感最为主要和直接的应用。由于温度与压力同时引起光纤光栅的布拉格波长移动而造成交叉敏感,如何对这两种效应加以区分是光纤光栅传感技术真正走向实际应用所必需解决的问题。针对这一问题,国内外已报道了很多解决方案^[2~9],包括双周期光纤布拉格光栅(FBG)法^[2],长周期光纤光栅/光纤布拉格光栅融合法^[3,4],不同聚合物封装法^[5],不同包层直径法^[6],光纤光栅布里-珀罗腔法^[7],悬臂梁法^[8],在掺锗和硼锗共掺光纤

* 国家自然科学基金(69877025)、国家 863 发展计划(2002AA313150)、国家教育部科学技术(02190)、陕西省自然科学基金(2000C34)资助课题。

E-mail: guotuan2001@163.com

收稿日期:2003-10-16;收到修改稿日期:2003-12-08

上写入光栅区分法^[9]。但这些方案有一个共同的缺点,即需要采用两个或两个以上的光栅组合来克服交叉敏感问题,难以保证测量位置的准确性,从而影响了测量精度,增加了成本的同时制作工艺也较为复杂。与此同时,部分方案需要多个解调光源,这给光纤光栅传感器的实际应用带来不便,有的则失去了光纤光栅传感器所特有的波长编码特性。

本文提出了一种基于光纤布拉格光栅反射波带宽展宽技术,通过聚合物材料将光栅粘接于双孔悬臂梁非均匀应变区,利用其非均匀应变带动光栅使布拉格反射波波长漂移的同时带宽展宽,而温度仅引起反射波波长漂移、带宽不展宽,实现单光栅温度压力双参量同时区分测量。实验表明,布拉格反射波中心波长漂移随温度和压力变化呈良好的线性关系,波形展宽稳定,测量精度高。

2 基本原理

2.1 光纤布拉格光栅的温度应变响应机理

温度对光栅的影响主要有两方面:一是热膨胀导致材料尺度变化,另一方面是热致折射率改变;轴向应变对光栅的影响表现在:一是使光栅栅距、光纤纤芯和包层半径变化,另一方面将通过光弹效应改

变光纤的折射率。温度和应变两者综合作用结果使得光纤布拉格光栅反射波中心波长发生漂移。

光纤布拉格光栅的响应峰值波长为^[10]

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率, Λ 为光栅栅距。

改变纤芯折射率和光栅栅距时,布拉格反射波长变化量为

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda\Delta n_{\text{eff}} + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda. \quad (2)$$

当温度和应变同时变化时,布拉格反射波波长的相应改变为^[10]

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda[(1-p_e)\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T], \quad (3)$$

式中 $p_e = (n_{\text{eff}}^2/2)[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]$ 为光纤的有效弹光系数, p_{ij} 为光纤材料的弹光张量分量, ν 为光纤材料的泊松比系数, ϵ 为应变, α 为光纤材料的热膨胀系数, ξ 为光纤材料的热光系数, ΔT 为温度改变量。对于石英光纤 $p_e \approx 0.22$, $\alpha \approx 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\xi \approx 7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

当光纤布拉格光栅被粘贴或埋置于基底材料中时,基底材料的形变和热膨胀将通过应力对其作用,使其温度应变响应系数改变。若用 α_{sub} 表示基底材料的热膨胀系数,则此时光纤布拉格光栅的温度与应变响应可表示为^[11]

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda\{(1-p_e)\epsilon + [\alpha + \xi + (1-p_e)(\alpha_{\text{sub}} - \alpha)]\Delta T\}. \quad (4)$$

通常基底材料的热膨胀系数远大于光纤材料本身的热膨胀系数,即满足 $\alpha_{\text{sub}} \gg \alpha$, 因此(4)式可简化为

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda\{(1-p_e)\epsilon + [\xi + (1-p_e)\alpha_{\text{sub}}]\Delta T\}. \quad (5)$$

2.2 双孔悬臂梁温度压力响应特性分析

双孔悬臂梁由铝材料制成,设梁长度为 L , 厚度为 H 。双孔中各单孔由两离心半圆组成,其结构如图1所示。双孔悬臂梁一侧紧固于侧壁,另一侧施加压力。通过聚合物材料将光栅粘贴于预定标的双孔悬臂梁非均匀应变区上表面,粘贴时通过刻入适当深度凹槽以

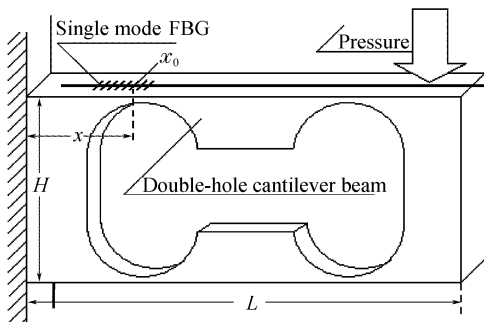


Fig. 1 Schematic diagram of the double-hole cantilever beam used in sensing system

确保光栅与梁表面粘贴的牢固性和准直性。

当在梁的自由端施加垂直压力时,梁的上表面受拉应力作用产生拉应变,根据材料力学原理,自由端压力 P 引起的梁上考察点 x_0 处截面的弯矩 M 可表示为^[12]

$$M = (L-x)P, \quad (6)$$

式中 x 为考察点 x_0 到悬臂梁固定端的距离。 x_0 处的轴向应力 σ 可表示为^[12]

$$\sigma = \frac{MH}{2I} = \frac{(L-x)HP}{2I}, \quad (7)$$

式中 I 为 x_0 处截面的惯性矩,由梁的横截面积及其制成材料决定; $H/2$ 为 x_0 到中性轴的距离。(7)式表明,梁表面应力的大小与惯性矩 I 有关,在相同的压力 P 作用下,梁臂横截面积越小, I 越小,梁臂所受拉应力 σ 越大。通过双孔设计,可以增加梁臂较薄处的拉应力,实现压力增敏。与此同时,为了使截面上的应力变化趋于平稳,双孔悬臂梁在拉应

力集中区采用较大半径的圆弧过渡,使拉应力能够集中均匀的分布在横截面上,改善了悬臂梁的应变响应特性。

由胡克定理得到压力 P 引起的梁上考察点 x_0 处的应变 ε 为^[12]

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{(L-x)HP}{2EI}, \quad (8)$$

式中 E 为合金铝材料的弹性模量。

结合双孔悬臂梁结构分析(8)式可知,在相同的压力作用下,由于光栅粘贴处各位置梁的截面积不同即惯性矩 I 不同,不同位置的应变 ε 将由弧顶向两侧递减,带动光栅不同位置栅距伸长量以同样的趋势依次递减,从而得到中心反射波长不同的反射峰,由于各反射峰间距相对于其反射波带宽较小,波与波之间大部分重叠,因此形成了一个整体带宽展宽的布拉格反射波。对于由同一材料制成的双孔悬臂梁,各部分热胀系数相同,光栅与梁表面的聚合物热胀系数恒定,因此温度变化时光栅各位置的应变 ε 相同,带宽不展宽。 $\Delta\varepsilon$ 成为与温度变化无关的压力函数。设光栅长度为 l ,在压力 P 的作用下,光栅应变变化绝对量为

$$\Delta\varepsilon = \frac{(L-x)Hl}{2EI^2}P. \quad (9)$$

将(8)式代入(5)式,得到粘贴于双孔悬臂梁上的布拉格光栅中心反射波长随温度与压力变化响应关系式为

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda\{[(1-p_e)(L-x)H/(2EI)]P + [\xi + (1-p_e)\alpha_{\text{sub}}]\Delta T\}. \quad (10)$$

将(9)式代入(5)式,得到布拉格中心反射波带宽展宽量随温度与压力变化响应关系式为

$$\Delta\lambda_{\text{BW}} = n_{\text{eff}}\Lambda \frac{(1-p_e)(L-x)Hl}{EI^2}P. \quad (11)$$

综上所述,布拉格中心反射波长漂移量和反射带宽展宽量与压力和温度变化量的关系矩阵为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\lambda_{\text{BW}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{F1} & K_{T1} \\ K_{F2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中 $\Delta\lambda_B$ 和 $\Delta\lambda_{\text{BW}}$ 分别为布拉格中心反射波漂移量和带宽展宽量; P 和 ΔT 为压力与温度变化量; $\Delta\lambda_B$ 压力响应系数,

$$K_{F1} = n_{\text{eff}}\Lambda(1-p_e)(L-x)H/(EI),$$

温度响应系数

$$K_{T1} = 2n_{\text{eff}}\Lambda[\xi + (1-p_e)\alpha_{\text{sub}}];$$

$\Delta\lambda_{\text{BW}}$ 压力响应系数

$$K_{F2} = n_{\text{eff}}\Lambda(1-p_e)(L-x)Hl/(EI^2).$$

将实验得到的 $\Delta\lambda_B$ 和 $\Delta\lambda_{\text{BW}}$ 代入(12)式可方便地求出相应的 P 和 ΔT 。

3 实验结果与讨论

光纤布拉格光栅温度压力传感实验装置如图 2 所示。实验中使用中心波长 1550 nm,功率 40 nW,有效带宽 45 nm(C 波段)的掺铒光纤光源;耦合器为工作窗口 1550 nm,3 dB 衰减 2×2 型耦合器;多功能光谱分析仪(Anritsu MS9710C)最高分辨率为 0.05 nm;加温设备通过台式热干燥箱由电子加热炉控制,工作范围 $0 \sim 200$ °C;温度数值由紧帖光纤光栅的数字温度计读取,精确度为 0.5 °C;台式热干燥箱内热量通过空气传递给光纤光栅,保证了光纤光栅的受热均匀性和连续性;压力通过悬挂于双孔悬臂梁光栅另一端托盘中的砝码重量传递,精确度为 0.001 N。被测光纤光栅利用准分子激光器紫外光在掺铗单模光纤上采用相位掩模板技术侧面辐照写入得到,其室温自由状态下中心反射波长 1548.25 nm,反射率为 95%,3 dB 带宽 0.2 nm。通过上述实验装置,利用宽带光源 1525 nm 至 1565 nm 处平坦增益宽带光波经耦合器入射到单模光纤进而入射到置于加热箱内的光纤光栅,经光纤光栅反射的窄带反射波再次通过耦合器进入光谱分析仪,分析光栅温度和压力响应特性。

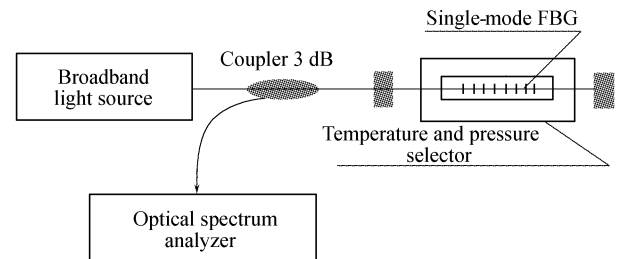


Fig. 2 Schematic diagram for fiber Bragg grating temperature and pressure sensing

由于光栅在压力作用下反射波漂移的同时波形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 10 dB 阈值反射波的中心值 λ_B 及带宽宽度 λ_{BW} 为记录数据以消除上述问题。在 $20 \sim 100$ °C 的测温范围,以 10 °C 为测温间隔,绘制出了升温过程中心反射波长 $\Delta\lambda_B$ 和带宽宽度 λ_{BW} 的温度变化曲线及其线性拟合曲线,如图 3 所示。在 $0 \sim 7.8$ N 压力测量范围内,以 0.2 N 测量间隔,绘制出了光栅在拉伸过程中中心反射波长 λ_B 和带宽宽度 $\Delta\lambda_{\text{BW}}$ 的压力变化曲线及其线性拟合曲线,如

图 4 所示。图 5 给出了 20 °C 和 100 °C 时布拉格反射谱,图 6 给出了 0 N、3.9 N 和 7.8 N 时布拉格反射波带宽展宽谱。实验数据曲线及反射谱表明:压力变化在引起布拉格反射波中心波长漂移的同时反射波带宽展宽;温度变化仅引起布拉格反射波中心波长漂移,带宽不展宽;中心波长漂移曲线及带宽展宽曲线均具有较好的线性。

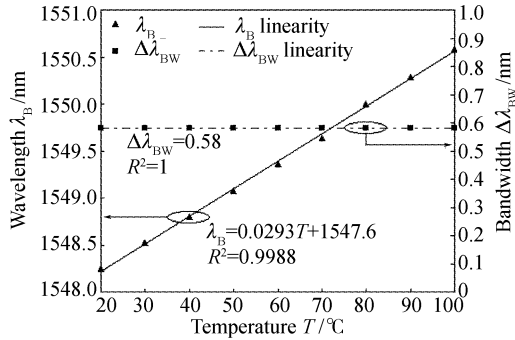


Fig. 3 $\lambda_B, \Delta\lambda_{BW}$ versus temperature in °C measured without any pressure applying on it

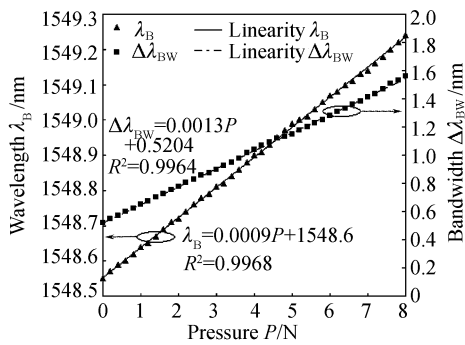


Fig. 4 $\lambda_B, \Delta\lambda_{BW}$ versus pressure in N measured at a temperature of 28 °C

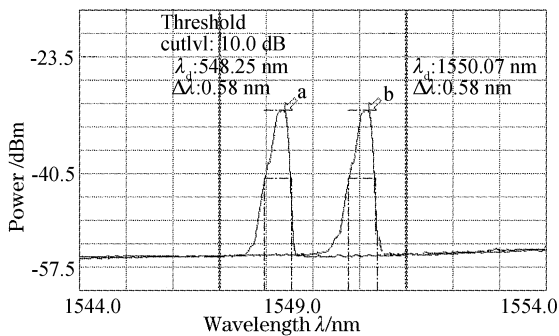


Fig. 5 Reflection spectrum of fiber Bragg grating at 20 °C (a) and 100 °C (b) without any pressure applying on it

实验得出,双孔悬臂梁光纤布拉格光栅反射波中心波长 λ_B 压力响应系数为 0.092 nm/N,线性度为 99.68%;温度响应系数为 0.029 nm/°C,线性度为 99.88%;反射波带宽压力展宽响应系数为 0.133 nm/N,线性为 99.64%;温度响应系数为 0.

代入(12)式得到

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\lambda_{BW} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.092 & 0.029 \\ 0.133 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (13)$$

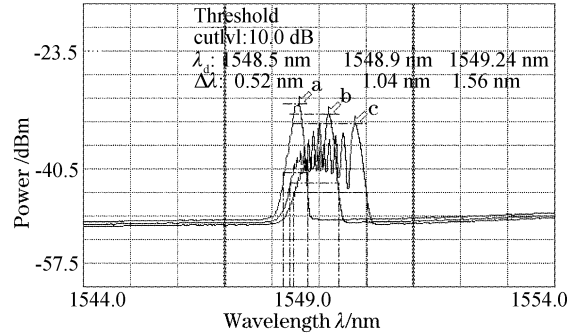


Fig. 6 Reflection spectrum of fiber Bragg grating at 0 N (a), 3.9 N (b) and 7.8 N (c) at a temperature of 28 °C

实验中,在温度升高 30 °C 和 2 N 砝码压力作用下,布拉格光栅反射谱中心波长漂移和带宽展宽分别为 1.05 nm 和 0.26 nm,将两者代入(13)式可得,温度变化量为 30.5 °C,压力大小为 1.99 N,与实验条件的变化基本一致。多次测量展宽波型稳定,响应曲线线性度高,温度测量精度 ± 1.1 °C,压力测量精度 ± 0.18 N,表明这种温度压力同时测量方法切实可行。双孔悬臂梁由热膨胀系数较大铝材料制成,粘贴于其上的布拉格光栅温度响应系数为 0.029 nm/°C,是裸光栅的 3 倍,增加了区分测量的精确性;与此同时,此传感装置可通过一个光栅感受双孔悬臂梁上不同位置的的压力变化,测量位置选择性好;通过改变光栅粘贴处悬臂梁弧顶厚度和压力作用点与光栅距离,可适时调整压力测量范围及其精度,具有较好的实际应用价值。

实验发现,反射波带宽展宽的同时反射功率随之增加。通过分析布拉格反射功率与温度压力改变量的对应关系,联立布拉格中心反射波长与温度压力对应关系,同样可实现单光栅温度压力的同时区分测量。实验发现,通过测量布拉格反射波窄带功率将引入布拉格波长漂移过程中光源不同波段波形起伏误差。针对这一问题,采用固定测量包含整体布拉格波长漂移范围的一个较宽带宽的反射功率的方法以消除上述误差。实验中,以 1549 nm 为中心,4 nm 带宽反射功率为记录数据,在测量反射带宽展宽的同时记录其反射功率,得到功率的温度响应系数为 0.005 dB/°C,应变响应系数为 0.08 dB/N。实验中掺铒光纤光源输出总功率长期稳定性 ± 0.02 dB,光谱仪功率分辨率 ± 0.01 dB。布拉格中心反射波长 λ_B 和反射功率 P_B 与温度压力对应关系

式关系为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta P_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.092 & 0.029 \\ 0.08 & 0.005 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (14)$$

需要指出,实验得到反射功率的温度响应系数不为零。依据载氢光纤 Riant-Poumellec 模型^[13],布拉格光栅反射功率是温度的函数,两者成正比。因此,在反射带宽不展宽的情况下,反射功率仍将随温度的升高而微弱增加。

结论 本文设计了一种新颖的双孔悬臂梁光纤光栅温度压力传感装置,提出了基于光纤布拉格光栅反射带宽展宽技术,实现单光栅温度压力双参量同时区分测量的新方案。在实际测量中,我们利用自行研制的光栅匹配滤波解调系统取代光谱仪,通过在解调系统中预设适当阈值的光功率,解调得到前后阈值波长 λ_1 和 λ_2 ,利用公式 $\lambda_B = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ 和 $\Delta\lambda_{BW} = \lambda_2 - \lambda_1$ 到对应的中心反射波长和展宽宽度。此系统保留了光纤光栅传感器的波长编码特性的优点,易于实现温度压力分布式区分测量,具有很好的实际应用价值。

参 考 文 献

- 1 Jackson D A, Gibeiro A B L, Reekie L *et al.*. Simple multiplexing scheme for a fiber optic grating sensor network. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(14): 1192~1194
- 2 Xu M G, Archambault J L, Reekie L *et al.*. Discrimination between strain and temperature using dualwavelength fiber grating sensors. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(13): 1085~1087
- 3 Patrick H J, Williams G M, Kersey A D *et al.*. Hybrid fiber Bragg grating/long period grating sensor for strain/temperature discrimination. *Photon. Technol. Lett.*, 1997, **8**(9): 1223~1225
- 4 Wang Muguang, Wei Wei, Tong Zhi *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single dual-period fiber grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7): 867~869 (in Chinese)
- 5 Fernandez-Valdivielso C, Matias I R, Arregui F J. Simultaneous measurement of strain and temperature using a fiber Bragg grating and a thermochromic material. *Sensors and Actuators*, 2002, **101**: 107~116
- 6 James S W, Dockney M L, Tatam R P. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fiber Bragg grating sensors. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(12): 1133~1134
- 7 Du Weichong, Tao Xiaoming, Tam Hwayaw. Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1): 105~107
- 8 Dong Xinyong, Liu Yunqi, Liu Zhiguo *et al.*. Simultaneous displacement and temperature measurement with cantilever-based fiber Bragg grating sensor. *Opt. Commun.*, 2001, **192**: 213~217
- 9 Cavaleiro P M, Araujo F M, Ferrerira L A *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using Bragg gratings written in germanosilicate and boroncodoped germanosilicate fibers. *Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(12): 1635~1637
- 10 Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic Bragg grating sensors. *Proc. SPIE*, 1989, **1169**: 98~107
- 11 Dong Xinyong, Guan Baiou, Zhang Ying *et al.*. Simultaneous displacement and temperature measurement using one fiber Bragg grating. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2001, **28**(7): 621~624 (in Chinese)
- 12 Liu Hongwen. *Materialmechanics* (材料力学). Beijing: High Education Press, 1998. 313~318 (in Chinese)
- 13 Zhou Changzun, Chen Yang, Peter Kung. Research on thermal stability of fiber Bragg grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(4): 434~437 (in Chinese)