

文章编号: 0253-2239(2010)s100309

基于级联长周期光纤光栅的多参量传感器研究

崔文涛 刘艳格 邰伯寅 王 兵

(南开大学现代光学研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 为实现多参量同时传感测量并消除交叉敏感, 提出一种新型的基于两个不同周期的级联长周期光纤光栅的多参量传感测量方案。通过对不同周期的长周期光纤光栅传感特性的研究, 发现具有不同周期的、且谐振峰位于不同波段的长周期光纤光栅对相同外参量的变化具有明显的敏感差异, 基于此特性可设计多参量传感器。实验中通过控制写制参数和写制周期, 利用 CO₂ 激光器成功写制出具有该特性的级联长周期光纤光栅, 并实验研究了该级联长周期光纤光栅的温度和折射率传感特性, 实验结果显示该级联光栅中两个不同谐振峰分别对温度和折射率具有不同的响应灵敏度, 可以很好地实现双参量传感测量。

关键词 光纤传感器; 多参量传感器; 级联光纤光栅; 长周期光纤光栅; 温度传感特性; 折射率传感特性

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100309

Multi-Parameter Sensor Based on Cascaded Long-Period Fiber Gratings

Cui Wentao Liu Yange Tai Boyin Wang Bing

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300071, China*)

Abstract A novel multi-parameter sensor based on a cascaded long-period fiber grating with two different periods is proposed and demonstrated. The sensing properties of long-period fiber gratings with different periods are investigated in detail which indicate that the long-period fiber gratings with different periods and the resonant peak positions have obvious sensitivity differences to the same changes of the external parameters. Such properties are useful for the design of multi-parameter sensor. Through the control of the fabrication parameters and the period, the fabrication of the cascaded long-period fiber gratings is achieved with the CO₂ laser. The temperature and refractive index sensing properties of the cascaded long-period fiber grating are explored through experiments. Multi-parameter sensing is realized with such cascaded long-period fiber gratings in the experiments.

Key words fiber optic sensors; multi-parameter sensor; cascaded fiber grating; long-period fiber grating; temperature sensing property; refractive index sensing property

OCIS codes 050.2770; 060.2370; 060.2340; 060.3735

1 引 言

光纤光栅是在光纤中制作的一种无源器件, 由于其具有许多独特的优点, 在光纤通信和光纤传感领域受到了重视和广泛应用。多参量传感在光纤传感领域具有很好的应用前景, 而消除交叉敏感则是实现多参量传感需要解决的一个关键问题。目前, 关于消除交叉敏感这一问题已提出多种解决方案,

如: 双光纤布拉格(Bragg)光栅法、啁啾 Bragg 光纤光栅法和双参量矩阵运算法等^[1~2]。在基于光纤光栅的传感器中, 相比 Bragg 光纤光栅, 长周期光纤光栅(LPFG)具有更大的光谱带宽和对温度、应变、折射率、弯曲等参量变化更为敏感的特性。目前关于长周期光纤光栅传感应用的报道大多是利用单个光栅的某一谐振波长对某一外参量敏感的特性实现的

收稿日期: 2010-08-23; **收到修改稿日期**: 2010-10-15

基金项目: 国家大学生创新性实验计划(091005554)和国家 973 计划(2010CB327605)资助课题。

作者简介: 崔文涛(1989—), 男, 本科, 主要从事光电子技术方面的研究。E-mail: racheangelm6@gmail.com

导师简介: 刘艳格(1973—), 女, 博士, 教授, 主要从事光纤光子学及其应用方面的研究。E-mail: ygliu@nankai.edu.cn (通信联系人)

传感器研究^[3~7],此种方法很难有效地消除与温度等参量的交叉敏感的影响。2009年,G. R. C. Possetti等^[8]利用在同一根光纤上写制的两段周期相同的级联长周期光栅作为马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪实现了水中盐度的测量。但这种级联光纤光栅由于是由完全相同的模式耦合形成的两个光栅组成的,不能有效地消除与温度等其它参量的交叉敏感问题。2010年,许剑波等^[9]提出了在两种不同光纤的熔点处写制长周期光栅,形成两组谐振峰,由于来源于不同光纤上的谐振峰波长位置具有不同的对外响应,从而实现了多个物理量的同时测量。此方法的局限性在于对熔点的质量具有较高的要求^[10]。本文提出一种新型的基于两个不同周期的级联长周期光纤光栅的多参数传感测量方案。利用具有不同周期的、且谐振峰位于不同波段的长周期光纤光栅对相同外参量变化具有明显的敏感差异这一特性,提出了基于该级联长周期光纤光栅的新型传感器的设计方案,可以实现温度与折射率等外参量的同时测量。

2 原 理

实验设计并制作的级联长周期光栅如图1所示。该级联长周期光栅由CO₂激光逐点写入法制

作而成,由周期分别为800 μm和650 μm的长周期光栅级联而成。

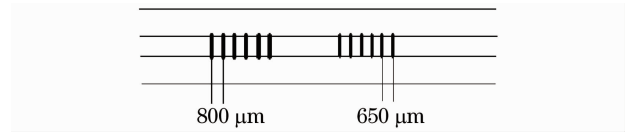


图1 级联长周期光纤光栅结构示意图

Fig. 1 Structure of the cascaded long-period fiber grating

实验中,以50 μm为间隔在普通单模光纤上写制了周期300~850 μm的长周期光纤光栅。通过对各个周期的长周期光纤光栅光谱特性的研究和分析,发现周期为650 μm和800 μm的长周期光栅在1350~1650 nm波段具有明显的位于不同波段的谐振峰,因此将这两段光栅级联后其谐振峰不会相互影响,具备来源于不同周期光栅的谐振峰同时感测多个外参量的条件。

考虑温度时,长周期光纤光栅的相位匹配条件为^[11]

$$[\beta^{\circ}(\lambda, T) - \beta_{1v}^{\text{cl}}(\lambda, T)]\Lambda = 2\pi, \quad (1)$$

式中 $\beta^{\circ}(\lambda, T)$ 和 $\beta_{1v}^{\text{cl}}(\lambda, T)$ 分别表示温度为 T 时纤芯模和包层模的传播常数,均是 λ 和 T 的函数; Λ 为温度为 T 时的光栅周期。

根据相位匹配条件(1)式和 $\lambda = \Lambda(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v, \text{eff}}^{\text{cl}})$,可以得到长周期光纤光栅的温度灵敏度 $K_{L, T}$ ^[11]。

$$K_{L, T} = \frac{d\lambda_{\text{res}}}{dT} = - \frac{\alpha(\beta^{\circ} - \beta_{1v}^{\text{cl}}) + \frac{\partial(\beta^{\circ} - \beta_{1v}^{\text{cl}})}{\partial T}}{\frac{\partial(\beta^{\circ} - \beta_{1v}^{\text{cl}})}{\partial \lambda}} = \lambda_{\text{res}} \frac{\alpha + \frac{\zeta_{\text{eff}}^{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \zeta_{1v, \text{eff}}^{\text{cl}} n_{1v, \text{eff}}^{\text{cl}}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v, \text{eff}}^{\text{cl}}}}{1 - \frac{\lambda_{\text{res}}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v, \text{eff}}^{\text{cl}}} \frac{\partial(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v, \text{eff}}^{\text{cl}})}{\partial \lambda}} = \gamma \lambda_{\text{res}} \left(\alpha + \frac{\zeta_{\text{eff}}^{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \zeta_{1v, \text{eff}}^{\text{cl}} n_{1v, \text{eff}}^{\text{cl}}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v, \text{eff}}^{\text{cl}}} \right), \quad (2)$$

式中 $\gamma = \frac{1}{1 - \Lambda \frac{d}{d\lambda}(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v, \text{eff}}^{\text{cl}})}$ 为波导色散因子;

λ_{res} 为谐振波长; α 为热膨胀系数; β° 和 β_{1v}^{cl} 分别为纤芯模和一阶包层模的传播常数; $\zeta_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $\zeta_{1v, \text{eff}}^{\text{cl}}$ 分别为纤芯模和一阶包层模的有效热光系数; $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{1v, \text{eff}}^{\text{cl}}$ 分别纤芯模和一阶包层模的有效折射率。

在(2)式中,分子上的第1项与光栅的热膨胀有关,第2项与热光效应有关,对不同的包层模,这两项对 $K_{L, T}$ 的影响会不同,但主要由第2项决定,其值的正负与 ζ° 和 ζ^{cl} 的相对大小有关,这对 $K_{L, T}$ 有很大的影响;分母则是和光纤的波导结构有关^[11]。

由(1),(2)式可以得出,对于一定周期的长周期光栅,可能有多包层模与纤芯模满足相位匹配条

件,因此,单个长周期光纤光栅可同时具有多个谐振峰。不同周期的长周期光栅一般具有不同的谐振峰,不同谐振峰可能具有不同的温度灵敏度,通过设计,可使级联光栅的多个谐振峰对相同的温度变化存在差异较大的温度灵敏度。

设 n_1, n_2 和 n_3 分别为纤芯、包层和环境的折射率。考虑 $n_3 < n_2$ 。当 n_3 变化时,长周期光纤光栅的相位匹配条件为^[11]

$$\beta^{\circ}(\lambda, n_3) - \beta_{1v}^{\text{cl}}(\lambda, n_3) = 2\pi/\Lambda, \quad (3)$$

式中 $\beta^{\circ}(\lambda, n_3)$ 和 $\beta_{1v}^{\text{cl}}(\lambda, n_3)$ 分别表示纤芯模和包层模的传播常数,均是 λ 和 n_3 的函数; Λ 为长周期光纤光栅的周期,保持不变; n_3 是变化的。

长周期光纤光栅的折射率灵敏度 K_n 为^[11]

$$K_n = \frac{d\lambda_{\text{res}}}{dn_3} = -\frac{\frac{\partial(\beta^{\text{co}} - \beta_{1v}^{\text{cl}})}{\partial n_3}}{\frac{\partial(\beta^{\text{co}} - \beta_{1v}^{\text{cl}})}{\partial \lambda}} = \frac{\Lambda \frac{\partial(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}})}{\partial n_3}}{1 - \Lambda \frac{\partial(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}})}{\partial \lambda}} = \lambda_{\text{res}} \frac{\frac{1}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}} \frac{\partial(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}})}{\partial n_3}}{1 - \frac{\lambda_{\text{res}}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}} \frac{\partial(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}})}{\partial \lambda}} = \gamma \lambda_{\text{res}} \frac{1}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}} \frac{\partial(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}})}{\partial n_3} = \gamma \Lambda \frac{\partial(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}})}{\partial n_3}, \quad (4)$$

式中 $\gamma = \frac{1}{1 - \Lambda \frac{d}{d\lambda}(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}})}$, 为波导色散因子;

λ_{res} 为谐振波长; α 为热膨胀系数; β^{co} 和 β_{1v}^{cl} 分别为纤芯模和一阶包层模的传播常数; $\zeta_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $\zeta_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}$ 分别为纤芯模和一阶包层模的有效热光系数; $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}$ 分别纤芯模和一阶包层模的有效折射率^[11]。

当环境折射率改变时, 纤芯模的传播常数基本不变, 因此, 谐振波长的漂移主要是环境折射率的变化引起包层模传播常数或有效折射率的变化而引起的。在环境折射率从小(如空气为 1)逐渐增大的过程中, 当远离包层折射率时, 谐振波长的漂移不大, 当接近包层折射率 n_2 时, 谐振波长的漂移逐渐增加, 在十分接近 n_2 时, 谐振波长的漂移非常大, 即谐振波长对环境折射率的变化非常敏感。由(4)式可以看出, 不同包层模对应的折射率灵敏度是不同的, 因此可以得出, 对于相同的环境折射率的改变, 不同周期光栅的谐振波长的漂移量是不同的。

基于以上分析可得出, 由不同周期的长周期光纤光栅组成的级联长周期光纤光栅可具备位于不同波段的谐振峰, 并且不同的谐振峰对温度和折射率的灵敏度存在较为明显的差异, 可基于此特性设计多参量传感器。

3 实验结果及分析

采用与文献[7]相同的写入装置利用 CO_2 激光器逐点写入法在普通单模光栅上成功制作出了该种级联长周期光纤光栅, 其中两段长周期光栅长度分别为 3.2 cm 和 2.6 cm, 中间裸纤长 1 cm, 写制的级联长周期光栅的透射光谱图如图 2 所示。

图 2 中的 3 条曲线中虚线、粗实线和细实线分别对应周期为 800 μm , 650 μm 的单个长周期光纤光栅和级联长周期光纤光栅的光谱。从图中可以观察到, 级联长周期光纤光栅的光谱近似为周期为 800 μm , 650 μm 两长周期光栅光谱的叠加。由于该级联光栅的两谐振峰位于明显不同的波段, 因此实验中对其温度和折射率传感特性进行了研究。实验中研究的两谐振峰为峰 1 和峰 2, 分别来源于周

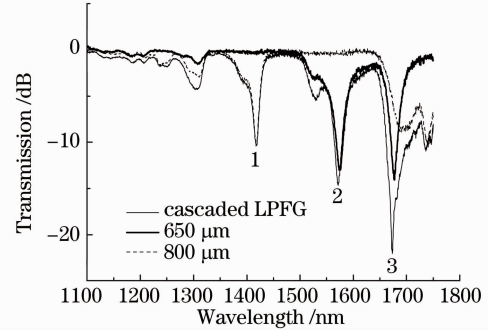


图 2 周期为 800 μm 和 650 μm 的长周期光栅及其级联光栅的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra of the cascaded LPFG and the LPFG with the period of 800 μm and 650 μm 期为 800 μm , 650 μm 的光栅。由于峰 3 为周期为 800 μm , 650 μm 两长周期光栅位于 1650~1750 μm 波段的谐振峰的叠加, 实验中无法判断其漂移源于哪一段光栅的谐振峰, 因此不予研究。

实验中首先对该级联长周期光栅的温度传感特性进行了研究。环境温度为 27 $^{\circ}\text{C}$ 。将级联光栅置于温控箱中, 使用胶带将光栅固定并保持拉直状态, 温控箱温度设定为 30 $^{\circ}\text{C}$ ~90 $^{\circ}\text{C}$, 以 10 $^{\circ}\text{C}$ 为间隔用光谱仪记录级联长周期光栅谐振波长的漂移大小, 其谐振波长随温度的漂移如图 3 所示。

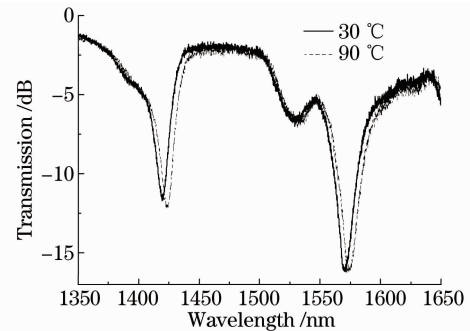


图 3 级联光栅谐振峰随温度的漂移

Fig. 3 Relation between the wavelength shift of the cascaded LPFG resonant peak and the temperature

从图 3 可见, 周期为 800 μm 的光栅相应的谐振峰 1 的温度灵敏度明显大于周期为 650 μm 的光栅相应的谐振峰 2 的温度灵敏度。通过进一步的数据分析, 得到了两谐振峰的波长漂移随温度的变化,

如图 4 所示。

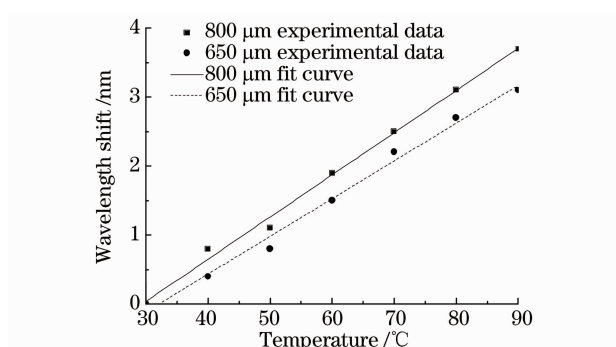


图 4 级联光栅两谐振峰的温度灵敏度对比

Fig. 4 Comparison of the temperature sensitivities of the two resonant peaks of the cascaded LPFG

图 4 给出了两谐振峰的温度灵敏度,在温度从 30 °C 变化至 90 °C 时,与周期 800 μm 和 650 μm 光栅对应的谐振峰的波长漂移量分别为 3.7 nm 和 3.1 nm,相应的温度灵敏度分别为 0.0610 nm/°C 和 0.0540 nm/°C,线性拟合的相关系数分别为 0.994 和 0.989,具有明显的温度灵敏差异,与理论预测相符。

实验中对级联长周期光纤光栅的折射率传感特性进行了研究。图 5 为级联光栅折射率传感实验的原理示意图。

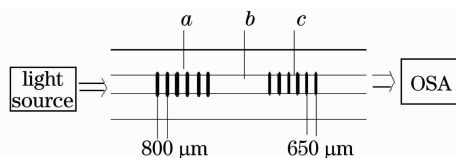


图 5 级联长周期光纤光栅折射率传感实验原理图
Fig. 5 Schematic illustration of the refractive index sensing experiment of the cascaded LPFG

由于光栅对接近包层折射率的环境折射率最为敏感,实验所用光纤的包层折射率为 1.44,因此使用折射率为 1.45 的折射率匹配液进行实验,折射率匹配液的热光系数为 $\xi = -0.000392/^\circ\text{C}$ 。匹配液分三次滴于光栅上:先后顺序为 *b* 处、*a* 处和 *c* 处,最后一次滴加完后光栅及裸纤部分即全部浸于折射率匹配液中。实验中,宽带光源发出的光先后经过周期为 800 μm 和 650 μm 的光栅到达光谱仪。用光谱仪分别记录下折射率匹配液先后滴于 *b* 处、*a* 处和 *c* 处之后的光谱,如图 6 所示。

观察图 6 发现,当折射率匹配液仅滴于裸纤部分时,谐振峰没有发生漂移,说明滴于裸纤部分的折射率匹配液对于谐振波长的漂移没有贡献;当折射率匹配液又滴于周期为 800 μm 的光栅栅区时,对

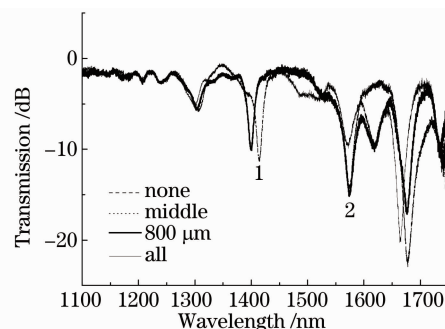


图 6 级联长周期光纤光栅折射率传感实验光谱

Fig. 6 Spectrum of the refractive index experiment of the cascaded LPFG

应于该周期光栅的谐振峰 1 发生明显漂移,对折射率改变敏感;当折射率匹配液最后滴于周期为 650 μm 的光栅栅区时,对应于该周期光栅的谐振峰 2 没有明显的漂移,但是幅度有较为明显的变化。由于光源发出的光首先经过周期为 800 μm 的光栅,其纤芯模与某包层模发生耦合产生谐振峰 1。当遇到 650 μm 的光栅时,纤芯模与另一包层模发生谐振,产生谐振峰 2。当在周期为 650 μm 的光栅栅区滴加折射率匹配液时,由于包层折射率与该折射率匹配液有几乎相同的折射率,因此包层对模式的束缚作用减弱,从而改变纤芯模与包层模的谐振强度,实验中表现为谐振峰 2 的幅度变浅,说明有部分能量又耦合回纤芯,而谐振波长位置没有明显变化。该实验现象表明:该级联光纤光栅中对应于周期为 650 μm 的光栅的谐振波长对环境折射率变化没有明显漂移,而对应于周期为 800 μm 的光栅的谐振波长对环境折射率变化有明显漂移。该实验现象与理论预测相符。

以上实验现象与理论分析相符。该级联光栅的两谐振峰对于环境温度和折射率变化均具有不同的灵敏度,因此可将该特性用于温度和折射率的双参量传感测量中。

4 结 论

通过将两段周期不同的、且谐振峰位于不同波段的长周期光纤光栅进行级联,得到了级联长周期光纤光栅,并对其温度和折射率传感特性进行了研究。实验表明,该级联光栅中的两个谐振峰对于相同的外界温度和环境折射率的变化具有不同的响应灵敏度,基于此特性可设计性能优异的双参量测量传感器。

参 考 文 献

- 1 Wang Hongliang, Zhang Jing, Qiao Xueguang *et al.*. Study on strain and temperature cross sensitivity of fiber Bragg grating sensor[J]. *J. Appl. Opt.*, 2008, **29**(5): 804~807
王宏亮, 张 晶, 乔学光等. 光纤 Bragg 光栅应变、温度交叉敏感问题的研究[J]. *应用光学*, 2008, **29**(5): 804~807
- 2 Xiao Xi, Zhao Xiaojun. Current state of research on temperature and strain cross-sensitivity of fiber Bragg grating sensors [J]. *Infrared*, 2008, **29**(3): 7~10
肖 熙, 周晓军. 光纤光栅传感器温度和应变交叉敏感的研究现状[J]. *红外*, 2008, **29**(3): 7~10
- 3 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Zhao Qida *et al.*. Linearly torsion sensor of fiber grating with temperature-independent[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1): 83~87
张伟刚, 开桂云, 赵启大等. 免受温度影响的光纤光栅线性扭转传感器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 83~87
- 4 Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Stress sensitivity enhanced in-fiber Bragg grating pressure sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 473~476
傅海威, 乔学光, 贾振安等. 应力增敏的光纤布拉格光栅压强传感器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 473~476
- 5 Sung Hyun Nam, Chun Zhan, Jon Lee *et al.*. Bend-insensitive ultra short long-period gratings by the electric arc method and their applications to harsh environment sensing and communication[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(3): 731~737
- 6 M. Jiang, A. Zhang, Y. Wang *et al.*. Fabrication of a compact reflective long-period gratings sensor with a cladding-mode-selective fiber end-face mirror[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(20): 17976~17982
- 7 M. Han, Y. Wang, Y. Wang *et al.*. Fiber-optic physical and biochemical sensing based on transient and traveling long-period gratings[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(1): 100~102
- 8 G. R. C. Possetti, R. C. Kamikawachi, C. L. Prevedello *et al.*. Salinity measurement in water environment with a long period grating based interferometer[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **20**(3): 034003
- 9 J. Xu, Y. Liu, Z. Wang *et al.*. Simultaneous force and temperature measurement using long-period grating written on the joint of a microstructured optical fiber and a single mode fiber [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(5): 1~6
- 10 S. W. James, M. L. Dockney, R. P. Tatam. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(12): 1133~1134
- 11 Zhang Zijia. Theoretical Basis and Sensing Technology of Fiber Grating[M]. Beijing: Science Press, 2009. 188~189, 191~194
张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 188~189, 191~194