

文章编号: 0253-2239(2010)s100215

四芯光纤布拉格光栅横向力的传感特性

何惠梅^{1,2} 王 丽¹

(¹北京工业大学应用数理学院, 北京 100124)
(²北京化工大学理学院, 北京 100029)

摘要 基于耦合模和材料力学理论,研究了四芯光纤布拉格(Bragg)光栅(FBG)的横向力传感特性与横向力大小、方向及光纤包层外径之间的关系。在横向力作用下,4个纤芯的布拉格光栅的反射谱分裂成两个波峰,谐振波长及两峰间隔均与横向力大小成正比,却随着横向力加载角度的增大而减小;处于两个相垂直的径向上的光纤光栅的波峰分裂比值与横向力大小无关,只与横向力加载方向有关。在保证光纤归一化频率不变的前提下,谐振波长与波峰分裂均随光纤外径的减小而增加,但增加的程度会随横向力加载角度而变化。

关键词 光纤传感;四芯光纤光栅;横向力;光纤外径

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS2010.s100215

Analysis of Four-Core Fiber Bragg Gratings Characterization by Applying Transverse Force

He Huimei^{1,2} Wang Li¹

(¹College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)
(²College of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract Based on coupled-mode theory and mechanics of materials, the four-core fiber Bragg gratings (F-CFBG) transverse force sensing rules according to transverse load, direction and fiber outer diameter were studied. The F-CFBG reflection spectrum split into two main peaks under transverse load. The resonant wavelength changes and the space between those two peaks are proportional with the applied transverse force magnitude, but decrease as the transverse orientation increases. The ratio of the peak splitting between two cores at 90° separation only lie on the orientation of transverse. The numerical analysis of F-CFBG wavelength shift with different outer diameters was also presented respectively. On condition that normalized frequency keeps constant, the wavelength change and the space between those two peaks increase as the fiber outer diameter decreases, but the increase degree lie on the transverse orientation.

Key words fiber sensing; four-core fiber Bragg gratings; transverse force; fiber diameter

OCIS codes 060.0060; 060.3735; 060.2310

1 引 言

光纤布拉格(Bragg)光栅(FBG)因其自身的优良传感特性而得到了广泛的研究和应用。利用FBG对轴向应力感测的研究成果已有很多的报道。

FBG作为传感器的重要用途之一就是将其埋入复合材料或结构中来实现对内部应变分布的实时监测,因此检测轴向应变的同时,对材料的横向应变及其形变的检测也是十分重要的。

收稿日期: 2010-08-23; 收到修改稿日期: 2010-10-15

基金项目: 全国高校博士点基金(200800050013)和北京市教委基金(Km200910005019)资助课题。

作者简介: 何惠梅(1972—),女,博士研究生,主要从事非线性光学和光纤通信等方面的研究。

E-mail: hehm@mail.buct.edu.cn

导师简介: 王 丽(1958—),女,教授,博士生导师,主要从事光学频率变换及其激光调谐技术、光纤通信、脉冲激光沉积氧化物半导体材料的物理性质等方面的研究。E-mail: lwang.l@bjut.edu.cn(通信联系人)

目前人们可以利用高双折射光纤来实现对横向力或多维应力的测量^[1~5]。近年来,因其在在一个包层内有多个纤芯的这种特殊结构,多芯光纤除了在生产高密度光缆领域得到应用外^[6],在光纤通信和光纤传感领域也得到了许多应用^[7~12]。在传感领域中,多芯光纤的各纤芯可同时对测场中的不同点进行取样检测。因此多芯光纤在对横向力或多维应力同时检测的研究中为人们提供了一种新的途径。写入光栅的多芯光纤的传感特性^[13]引起了研究人员的兴趣,但有关多芯光纤光栅的横向力传感特性的理论研究的报道并不多见。本文通过详细的理论分析,研究了四芯光纤光栅的横向力传感特性与横向力大小、方向以及光纤外径大小之间的关系。

2 理论分析

布拉格光纤光栅的模式耦合方程表示为^[14]

$$\frac{dA(z)}{dz} = i\zeta A(z) + ikB(z), \quad (1)$$

$$\frac{dB(z)}{dz} = -i\zeta B(z) - ik^* A(z), \quad (2)$$

式中 $A(z)$ 和 $B(z)$ 分别为光纤光栅区域中的前向波和后向波; ζ 和 k 表示直流自耦合系数和模式间的交流交叉耦合系数。当直流自耦合系数 $\zeta = 0$ 时,模式间的交叉耦合作用最强,此时的谐振波长 λ_B 为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff},0} \Lambda, \quad (3)$$

式中 Λ 和 $n_{\text{eff},0}$ 为光纤光栅周期和有效折射率。可见,光纤布拉格光栅谐振波长 λ_B 取决于光纤光栅周期 Λ 和有效折射率 $n_{\text{eff},0}$ 。当外界温度、应变、压力等物理量变化时,导致 Λ 和 $n_{\text{eff},0}$ 发生变化,从而引起谐振波长变化 $\Delta\lambda_B$ 为

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff},0} \cdot \Delta\Lambda + 2\Delta n_{\text{eff},0} \cdot \Lambda, \quad (4)$$

(4)式表明光纤光栅布拉格波长与纤芯有效折射率和光栅周期的变化量有关。

当光纤受到一个沿横向均匀分布的压力 F 作用时,光纤横截面内任意点产生两个相互垂直(x 和 y 方向)的应力,分别用 $\sigma_x(x, y)$, $\sigma_y(x, y)$ 表示,具体表示为^[1]

$$\sigma_x(x, y) = \frac{-2F}{\pi L} \times \left\{ \frac{x^2 \left(\frac{D}{2} + y \right)}{\left[x^2 + \left(\frac{D}{2} + y \right)^2 \right]^2} + \frac{x^2 \left(\frac{D}{2} - y \right)}{\left[x^2 + \left(\frac{D}{2} - y \right)^2 \right]^2} - \frac{1}{D} \right\}, \quad (5)$$

$$\sigma_y(x, y) = \frac{-2F}{\pi L} \times \left\{ \frac{\left(\frac{D}{2} + y \right)^3}{\left[x^2 + \left(\frac{D}{2} + y \right)^2 \right]^2} + \frac{\left(\frac{D}{2} - y \right)^3}{\left[x^2 + \left(\frac{D}{2} - y \right)^2 \right]^2} - \frac{1}{D} \right\}, \quad (6)$$

式中 D 为光纤直径, F 为光纤所受的横向力大小, L 为横向力作用范围内的光纤长度。设光纤的轴向应力为 σ_z , 根据弹光效应,此时栅区的有效折射率发生了变化,横截面内 x 和 y 方向的折射率变化为^[15]

$$\Delta n_{\text{eff},x} = -\frac{(n_{\text{eff},0})^3}{2E} \times \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_x + [(1 - \nu) p_{12} - \nu p_{11}] \times (\sigma_y + \sigma_z) \}, \quad (7)$$

$$\Delta n_{\text{eff},y} = -\frac{(n_{\text{eff},0})^3}{2E} \times \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_y + [(1 - \nu) p_{12} - \nu p_{11}] \times (\sigma_x + \sigma_z) \}, \quad (8)$$

由于单芯光纤光栅的位置处于光纤的中心($x = 0$, $y = 0$),因此,横向力作用下其受到的内应力为 $\sigma_x = \sigma_y = 0$,并且 $\Delta n_{\text{eff},x} = \Delta n_{\text{eff},y}$ 。四芯光纤是一个包层里有4个纤芯,4个纤芯分别处于以光纤中心为对称中心、边长为 a 的正方形的4个顶点上,其结构和受横向力的截面如图1所示。图中的①②③④为4个纤芯。由于4个纤芯处于光纤的非中心位置,因此在横向力作用下,各纤芯所受到的两相垂直的内应力 $\sigma_x(x, y)$, $\sigma_y(x, y)$ 均不为零,并且 $\sigma_x(x, y) \neq \sigma_y(x, y)$,横截面内 x 和 y 方向的折射率变化不相等,即 $\Delta n_{\text{eff},x} \neq \Delta n_{\text{eff},y}$,因此两偏振方向的有效折射率 $n_{\text{eff},x} = n_{\text{eff},0} + \Delta n_{\text{eff},x}$ 和 $n_{\text{eff},y} = n_{\text{eff},0} + \Delta n_{\text{eff},y}$ 是不相等的,所以各纤芯产生双折射,光栅的谐振峰分裂为两个波峰,分别是 x 和 y 方向的偏振光,两偏振光对应的波长变化量分别为

$$\Delta\lambda_{B,x} = -\frac{(n_{\text{eff},0})^2 \lambda_B}{2E} \times \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_x + [(1 - \nu) p_{12} - \nu p_{11}] \times (\sigma_y + \sigma_z) \} + \frac{\lambda_B}{E} \times \{ \sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \}, \quad (9)$$

$$\Delta\lambda_{B,y} = -\frac{(n_{\text{eff},0})^2 \lambda_B}{2E} \times \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_y + [(1 - \nu) p_{12} - \nu p_{11}] \times (\sigma_x + \sigma_z) \} + \frac{\lambda_B}{E} \times \{ \sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \}, \quad (10)$$

两波峰分裂的距离为

$$\Delta\lambda_{B,x} - \Delta\lambda_{B,y} = \frac{(n_{\text{eff},0})^2}{2E}(p_{11} - p_{12})(1 + \nu)(\sigma_y - \sigma_x), \quad (11)$$

(7)~(11)式中, E 和 ν 分别为光纤的杨氏模量和泊松比, p_{11} 和 p_{12} 分别为光纤的弹光系数。(9)和(10)式的第一项表示由于折射率的改变所导致的波长变化, 第二项表示由于光栅栅距改变而引起的波长变化。

以 θ 表示横向力加载方向相对于纤芯 1 所处的径向的角度, 简称为横向力加载角度, 如图 1 所示。经分析可知, 在横向力作用下, 谐振峰的波长变化或波峰分裂程度不仅与单位长度上的横向力 F/L 有关, 还与横向力加载角度 θ 及光纤直径 D 有关。

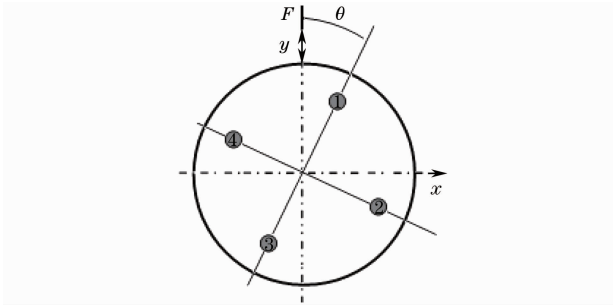
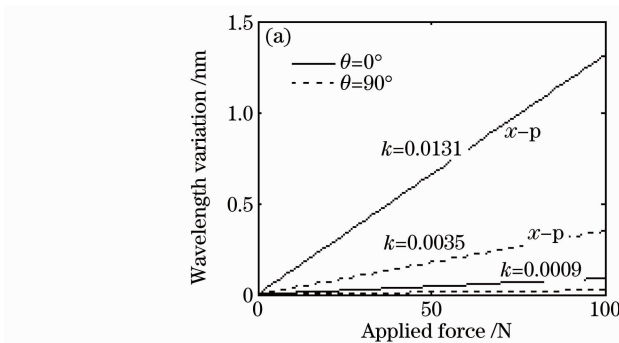


图 1 四芯光纤结构和受横向力截面图

Fig. 1 Cross section of applying loads up to the four core fiber

3 数值计算与分析

利用纯熔石英玻璃光纤的参数 $E = 7.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $\nu = 0.17$, $p_{11} = 0.121$, $p_{12} = 0.270$, $n_{\text{eff},0} = 1.456$, 对 4 个纤芯处于边长为 $50 \mu\text{m}$ 的正方形顶点



上, 4 个纤芯上写入的光栅长度 L 为 10 mm 、折射率调制深度为 $\delta n = 10^{-4}$ 、谐振峰波长为 $\lambda_{B,0} = 1550 \text{ nm}$ 的四芯光纤光栅进行数值计算。

在光纤包层直径 ($D = 125 \mu\text{m}$) 和横向力加载角度一定时, 两种特殊的情况即平面应变 (光栅轴向无应变, 轴向应变 $\epsilon_z = 0$) 和平面应力 (光栅轴向自由, $\sigma_z = 0$) 的谐振波长与横向力大小的关系如图 2 所示。图中 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 对应的曲线分别代表两个相互垂直的径向上的光纤光栅 (如: 纤芯 1 和纤芯 2) 的谐振波长变化与横向力大小的关系; $x-p$ 代表的是 x 偏振方向的分裂峰, 未标明的为 y 偏振方向的 (下文未提到的相应图注与此处含义一致); 各曲线的斜率为 k ; 图 2(a) 和 (b) 分别对应平面应变、平面应力的情况。由图 2 可知, 在均匀横向力作用下, 两偏振方向的谐振波长变化量与横向力大小是线性关系。图中各曲线斜率值代表的是波长变化的灵敏度 $\frac{d(\Delta\lambda)}{dF}$ 。图 2(a) 中未表明 k 值的曲线的斜率为 0.0002 , 可见波长变化灵敏度与 θ 有关, $\theta = 0^\circ$ 的灵敏度比 $\theta = 90^\circ$ 的大。两个偏振方向的灵敏度也不相等, x 偏振方向的灵敏度远大于 y 偏振方向的。对比图 2(a) 和 (b) 可知, 平面应力的波长变化灵敏度比平面应变的高。

由(11)式可知平面应变和平面应力的谐振峰分裂 ($\Delta\lambda_{B,x} - \Delta\lambda_{B,y}$) 是相同的。纤芯光栅的谐振峰分裂随横向力大小的关系如图 3 所示。由图 3 可见, 各纤芯光栅的谐振峰分裂与横向力成正比; 分裂的灵敏度与横向力加载方向有关, $\theta = 0^\circ$ 的方向对应的分裂灵敏度 $d(\Delta\lambda_{B,x} - \Delta\lambda_{B,y})/dF$ 大于 $\theta = 90^\circ$ 方向的。

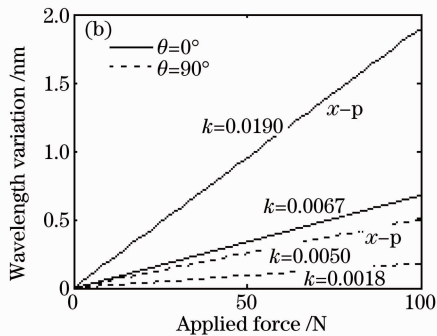


图 2 反射波长变化与横向载荷关系。(a) 平面应变, (b) 平面应力

Fig. 2 Bragg wavelength versus the applied force. (a) case of plane strain $\epsilon_z = 0$, (b) case of plane stress $\sigma = 0$

若横向力加载方向沿着纤芯 1 和纤芯 3 的连线, 则图 3 中的 $\theta = 0^\circ$ 对应的是纤芯 1, $\theta = 90^\circ$ 对应的

是纤芯 2。定义 $K_{ij} = \frac{d(\Delta\lambda_{B,x} - \Delta\lambda_{B,y})_i}{d(\Delta\lambda_{B,x} - \Delta\lambda_{B,y})_j}$ (i, j 为 1 或

2), K_{12} 是纤芯 1 光栅的波峰分裂与纤芯 2 光栅的波峰分裂的比值; K_{21} 是纤芯 2 光栅的波峰分裂与纤芯 1 光栅的波峰分裂的比值。对图 3 进一步计算得到 $K_{12} = 3.77$ 和 $K_{21} = 0.265$ 。对于任意的横向力加载方向, 该比值介于 3.77 和 0.265 之间, 并且与横向力大小无关, 只与横向力加载方向有关, 如图 4 所示。

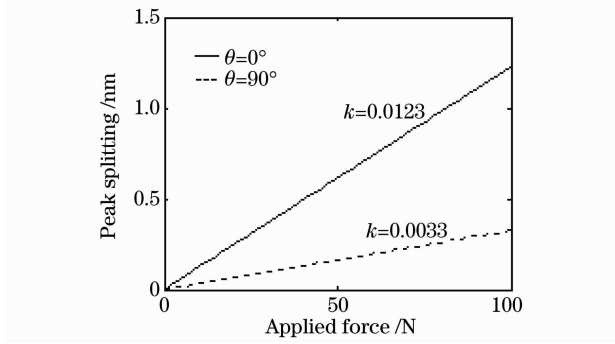


图 3 反射峰分裂随横向力变化的曲线
Fig. 3 Peak splitting due to increasing load

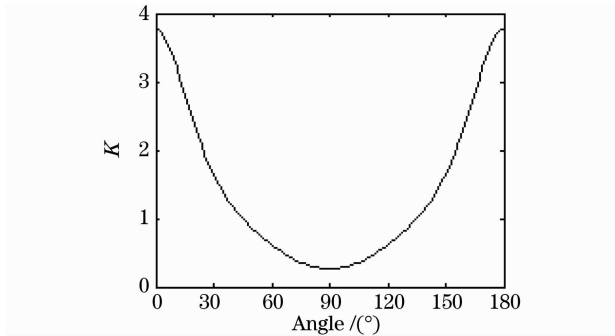


图 4 相垂直径向上的两光栅波峰分裂的比值与横向力加载方向的关系
Fig. 4 Ratio of the peak splitting between two cores at 90° separation

当横向力 ($F = 200 \text{ N}$) 和光纤外径为定值时, 图 5 给出了波长变化与横向力加载角度 ($\theta = 0^\circ$ 到 $\theta = 90^\circ$ 之间) 的关系, 图 6 给出了波峰分裂与横向力加载角度的关系。可见灵敏度随横向力加载角度而变。 $\theta = 0^\circ$ 时灵敏度最大, 逐渐递减到 $\theta = 90^\circ$ 时最小。

对固定结构的四芯光纤而言, 光纤外径的改变即意味着纤芯到包层外边缘距离不同。下面考虑光纤外径对光栅谐振波长及波峰分裂的影响。由于平面应力的波长改变灵敏度要比平面应变的情况高, 因此以下只分析平面应力的情况。以 d 表示纤芯到光纤包层外边缘的距离, 在横向力大小 ($F = 80 \text{ N}$) 和加载方向都一定的情况下, 波长变化与 d 的关系如图 7 所示。由图 7 可知, 谐振波长随光纤外径大小而变化; 光纤外径越小, 波长变化越大。波

峰分裂与 d 的关系如图 8 所示。由图 7, 8 可知, 在

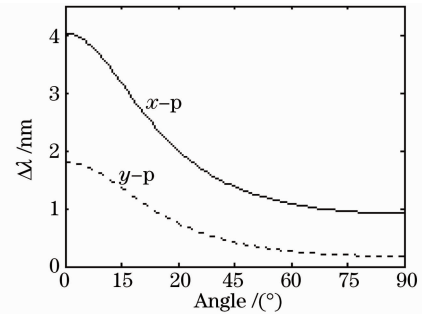


图 5 波长漂移与横向力加载角度的关系
Fig. 5 Reflection Bragg wavelength changes versus orientations of the transverse load

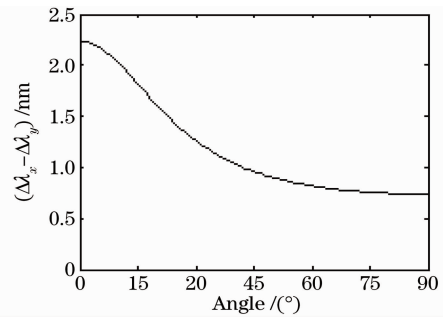


图 6 波峰分裂与横向力加载角度关系
Fig. 6 Peak splitting vs orientations of the transverse load

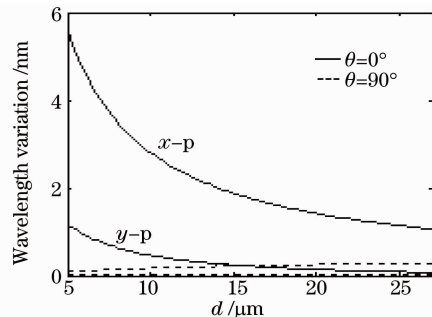


图 7 谐振波长漂移与纤芯到外径边缘距离 d 的关系
Fig. 7 Reflection Bragg wavelength variation versus the distance from fiber core to the outer diameter

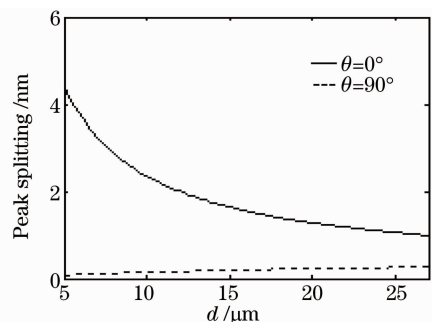


图 8 波峰分裂与纤芯到外径边缘距离 d 的关系
Fig. 8 Peak splitting versus the distance from fiber core to the outer diameter

保证光纤归一化频率不变的前提下, 谐振波长的改变(或波峰分裂)随 d 的减小而递增, 在横向力加载角度为 $\theta=90^\circ$ 时的光栅的谐振峰受 d 值影响较小。可见选择薄包层的四芯光纤光栅可以提高横向力传感的灵敏度。

4 结 论

对四芯光纤光栅在均匀横向力作用下的特性进行了理论分析和数值模拟计算, 得到了一些有用的结论, 为进一步研究提供了参考。理论分析表明, 在均匀横向力作用下, 四芯光纤光栅的谐振峰分裂成两个波峰, 两个峰分别代表 x 和 y 偏振方向的偏振光。计算结果表明, 谐振峰有如下变化: 1) 光纤光栅谐振波长及波峰分裂均与横向力大小成正比, 并随横向力加载角度的增大而减小; 2) 平面应力的波长改变灵敏度要比平面应变的高; 3) 处于两个互相垂直的径向上的光纤光栅的波峰分裂比值与横向力大小无关, 而只与横向力加载方向有密切关系; 4) 谐振峰波长及波峰分裂均随光纤外径的减小而增大。四芯光纤光栅的这些特性, 将为其在横向力大小及其方向的传感尤其是多维传感领域的应用具有一定的指导意义, 进而对设计高灵敏度的横向压力传感器提供了一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 P. D. Gianino, B. Bendow. Calculations of stress-induced changes in the transverse refractive-index profile of optical fibers [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(3): 430~434
- 2 K. Okamoto, T. Hosaka, T. Eda. Stress analysis of optical fibers by a finite element method [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(10): 2123~2129
- 3 C. M. Lawrence, D. V. Nelson, E. Udd *et al.*. A fiber optic sensor for transverse strain measurement [J]. *Exp. Mech.*, 1999, **39**(3): 202~209
- 4 S. Kreger, T. Calvert, E. Udd. High pressure sensing using fiber Bragg gratings written into birefringent side hole fiber [C]. *IEEE Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 2002, **OFS-15**: 355~358
- 5 E. Udd, W. L. Schulz, J. Seim *et al.*. Fiber optic smart bearing load structure [C]. *SPIE*, 1999, **3587**: 40~49
- 6 B. Rosinski, J. W. D. Chi, P. Grosso *et al.*. Multichannel transmission of a multicore fiber coupled with vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *J. Lightwave Tech.*, 1999, **17**(5): 807~810
- 7 C. Anne, J. Poulin, R. Vallee. Optical bandpass filter from a curved segment of a detuned two-core fiber [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(21): 5064~5071
- 8 M. Fokine, L. E. Nilsson, A. Claesson *et al.*. Integrated fiber Mach-Zehnder interferometer for electro-optic switching [J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(18): 1643~1645
- 9 D. Gauden, D. Mechin, C. Vaudry *et al.*. Variable optical attenuator based on thermally tuned Mach-Zehnder interferometer within a twin core fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **231**(1-6): 213~216
- 10 Xia Jiangzhen, Cai Haiwen, Ren Hong *et al.*. Study on output characteristics of erbium doped fiber ring lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 823~827
夏江珍, 蔡海文, 任虹等. 掺铒光纤环形激光器输出特性的研究 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 823~827
- 11 Wei Pan, Bin Lin. Two-core fiber interferometric strain sensor [J]. *IEEE Digital Signal Processing Industrial Applications*, 1997, **4**: 2773~2776
- 12 W. N. MacPherson, M. J. Gander, R. McBride *et al.*. Remotely addressed optical Fiber curvature sensor using multicore photonic crystal fibre [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **193**(1-6): 97~104
- 13 J. D. C. Jones, J. S. Barton, W. N. MacPherson *et al.*. Bragg gratings in multicore optical fibers for sensor applications [C]. *Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides (BGPP)*, Optical Society of America, 2007, BTuE3
- 14 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *IEEE J. Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 15 R. Gafsi, M. A. El-Sherif. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2000, **6**(3): 299~323