

文章编号: 0258-7025(2006)08-1081-06

边孔光纤光栅的传感特性

李智忠^{1,2}, 罗洪¹, 杨华勇¹, 马丽娜¹, 胡永明¹

(¹ 国防科技大学光电学院, 湖南长沙 410073; ² 海军潜艇学院, 山东青岛 266071)

摘要 报道了一种新型边孔光纤及边孔光纤光栅的研究结果。采用有限元法分析了边孔光纤内部的应力分布和双折射数值,并通过波长扫描技术对其双折射进行了测量,理论计算和实验测量结果表明双折射数值达到 4×10^{-5} 。根据边孔光纤光栅两反射峰偏振态相互正交的特性,提出了一种基于偏振检测的波长检测方案对边孔光纤光栅的传感特性进行了测量。结果表明两峰中心波长间隔随温度变化的灵敏度仅有 $0.05 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,是普通单模光纤光栅温度灵敏度的 $1/184$ 。提出了一种基于横向荷载压力增敏的新型边孔光纤光栅封装装置,使边孔光纤光栅双峰间距的压力灵敏度从 $5.6 \text{ pm}/\text{MPa}$ 增加到 $119.14 \text{ pm}/\text{MPa}$,增敏21倍,实现了温度不敏感的高灵敏度压力传感。

关键词 光纤光学;边孔光纤;光纤光栅;压力传感

中图分类号 TN 253; TP 212.14 **文献标识码** A

Side-Hole Fiber Grating Sensing Characteristics

LI Zhi-zhong^{1,2}, LUO Hong¹, YANG Hua-yong¹, MA Li-na¹, HU Yong-ming¹

(¹College of Optoelectronics, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)
(²Navy Submarine Academy, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract The research results of a novel kind of side-hole fiber and side-hole fiber grating are reported. The finite element method is used to analyze the interior stresses distribution and the birefringence values of side-hole fiber, which is also measured by wavelength scanning method, both the theoretical and the measurement results show that the birefringence of side-hole fiber reaches 4×10^{-5} . Utilizing the property that the polarizations of the two reflection peaks are orthogonal, the article has presented a novel scheme based on polarization detection to measure peak separation. The experimental results show that the temperature sensitivity of peak separation is $0.05 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, which is only $1/184$ of the normal single-mode fiber grating. A novel transversal load sealing method is first presented in this paper, with a pressure sensitivity of $119.14 \text{ pm}/\text{MPa}$, which is 21 times of the pressure sensitivity of bared side-holes fiber grating $5.6 \text{ pm}/\text{MPa}$. The temperature-insensitive high sensitivity pressure sensing can be realized with the side-hole fiber grating.

Key words fiber optics; side-hole fiber; fiber grating; pressure sensing

1 引言

用光纤光栅的应变和热膨胀进行压力、温度等多种物理量的检测,已成为光纤光栅传感器的重要应用^[1,2]。在这些应用中,消除温度-应力耦合成为光纤光栅传感器中必须解决的一大难题^[3]。目前已有多种关于光纤光栅温度-应力去耦方案的报

道^[3~7],但在一些方案中,附加的特殊结构使光纤光栅传感器失去了许多原有的优点,给应用带来不少新的问题。文献[8]报道了用边孔光纤制作特殊光纤光栅的研究结果,为从光纤结构上解决温度-应力耦合提出了一条新的途径。但要使这种新型的器件实用化还须解决一系列的理论及技术问题。本文对边孔光纤及边孔光纤光栅进行了一系列的理论和

收稿日期:2005-11-17;收到修改稿日期:2006-02-28

基金项目:国家自然科学基金(60377029)资助项目。

作者简介:李智忠(1979—),男,山东潍坊人,国防科技大学博士研究生,主要从事光电信息技术和光纤光栅传感技术研究。E-mail:jirmy@163.com,jirmy@sina.com

导师简介:胡永明(1960—),男,国防科技大学光电学院教授,博士生导师,主要从事光电信息技术和光纤光栅传感技术方面的研究。E-mail:huyongming_nudt@hotmail.com

实验研究。

2 边孔光纤的结构和特性

边孔光纤是一种新型的保偏光纤，它的结构与熊猫型保偏光纤相类似，不同的是将熊猫光纤包层的两个应力区变成两个以纤芯为中心对称的空洞，图 1 为边孔光纤的结构示意图。由于边孔光纤中不存在高热膨胀系数的应力区，因而与熊猫光纤相比，边孔光纤具有较好的热稳定性；同时由于边孔的存在，可以使光纤外部各向同性的压力在纤芯内部产生各向异性的应力，从而可以产生较大的应力双折射。也就是说，与其他保偏光纤相比，边孔光纤不仅具有较好的热稳定性，还有较高的压力灵敏度，因此特别适合进行压力传感^[1~3]。

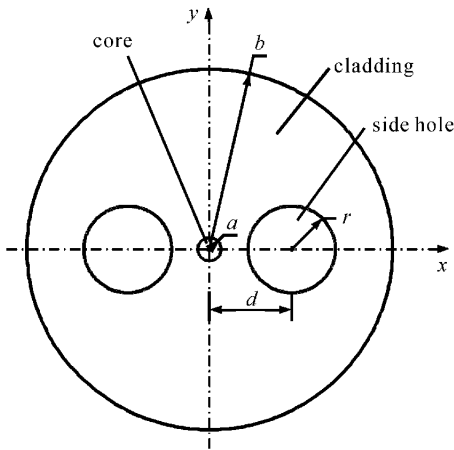


图 1 边孔光纤横截面示意图
Fig. 1 Cross-section of side-hole fiber

边孔光纤的制作流程是首先在光纤预制棒上按照设计要求加工两个对称的高精度的空心边孔，然后在拉丝机上利用改进的工艺拉制边孔光纤，在拉丝过程中必须采取一定的措施保证边孔结构不受破坏。图 2 为设计制作的边孔光纤的剖面图，其几何尺寸为：纤芯半径 $a = 4 \mu\text{m}$ ，包层半径 $b = 62.5 \mu\text{m}$ ，边孔半径 $r = 16 \mu\text{m}$ ，边孔距纤芯中心的距离 $d = 24 \mu\text{m}$ （各标注如图 1 所示）。

在边孔光纤拉制过程中，当光纤从近千度的软化温度冷却到室温时，由于纤芯材料和包层材料热膨胀系数的差别使得纤芯和包层内部存在热应力，而边孔的存在改变了光纤自身结构的对称性，使得热应力分布不再具有圆对称性，在光纤纤芯内出现了非对称性的应力分布，从而出现了应力双折射。由于该类边孔光纤的纤芯是圆形的，因此不存在几

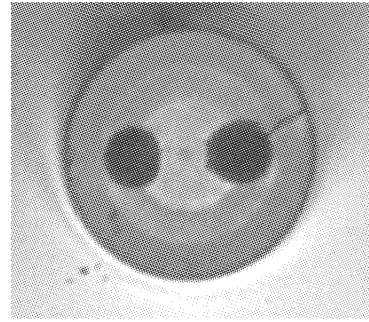


图 2 边孔光纤的剖面图
Fig. 2 Photograph of the side-hole fiber

何双折射^[9]。

以纤芯中心为坐标原点，以两边孔连线为 x 轴，其垂直方向为 y 轴建立笛卡儿坐标系，如图 1 所示。采用有限元法对边孔光纤内部的应力分布进行分析，图 3 和图 4 分别为单模光纤和边孔光纤在图 1 所示的 y 轴上应力分量随坐标变化的分布图。通过图 4 可以看出，光纤内部应力分量的数值随着坐标的增加而递减，且两者都为正值，表明光纤纤芯内部存在一个向外的拉应力。通过图 3 和图 4 的比较可以看出，由于边孔的存在使得边孔光纤纤芯区域的应力分量 σ_x 和 σ_y 数值不再相等，从而导致了光纤双折射的产生。根据有限元计算结果，边孔光纤双折射的数值 $B = 3.81 \times 10^{-5}$ 。同时由图 4 可见 $\sigma_y \geq \sigma_x$ ，则表明图 1 中 y 轴方向的折射率大于 x 轴方向，因此 y 轴为光纤的慢轴方向，即该类边孔光纤的两边孔连线的垂直方向为光纤的慢轴方向。

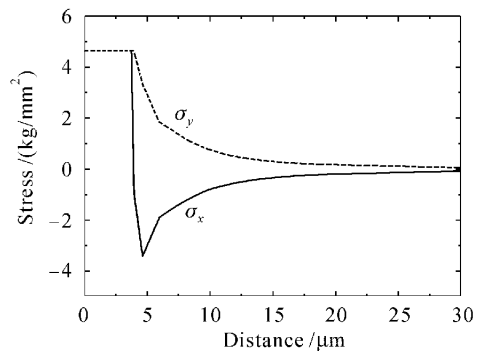


图 3 单模光纤 y 轴的应力分布
Fig. 3 Stress distribution along y -axis of single-mode fiber

采用图 5 所示的波长扫描方案对制作的边孔光纤的双折射进行了测量。从窄带可调谐光源发出的光经过起偏器 P_1 （两者夹角为 45° ）之后在 A 点入射到待测光纤，激励起两偏振正交模式 E_x 和 E_y ，经过

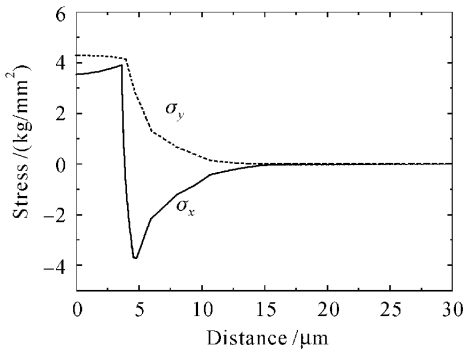


图 4 边孔光纤 y 轴的应力分布

Fig. 4 Stress distribution along y-axis of side-hole fiber

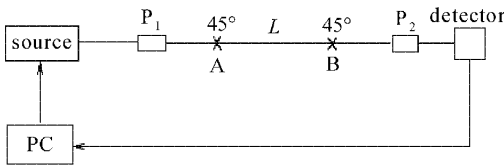


图 5 波长扫描法双折射测量系统

Fig. 5 Birefringence measurement system with wavelength scanning technology

长度为 L 的被测光纤后,在 B 点经检偏器 P_2 (两者夹角为 45°) 后到达探测器 D。可见两偏振方向的光在检偏器 P_2 处发生干涉,根据不同波长处所测得的两偏振光相干涉时的相位延迟,通过数据拟合技术就可确定待测光纤的双折射数值。实验中测得的边孔光纤的双折射数值为 4.05×10^{-5} ,与理论计算数值基本吻合。

3 边孔光纤光栅的谱线特性以及波长检测方案

为制作性能良好的光纤光栅,在光纤芯内进行了高浓度掺锗处理。采用相位模板法在边孔光纤上成功地制作了光纤光栅。由于双折射的存在,边孔光纤光栅的反射谱中会形成满足布拉格条件的两个反射峰,它们的偏振态相互正交。采用普通的波长扫描技术^[10]所测得的边孔光纤光栅反射谱线将是这两个反射峰的叠加曲线。由于边孔光纤自身的本征双折射较小,导致了两个偏振方向反射谱线中的双峰间距很小,因而使得采用普通波长扫描技术所检测到的反射谱线(如图 6(a)所示,双峰间距约为 40 pm,每个反射峰的谱宽约为 120 pm)中没有明显的双峰存在。可见在双峰间距较小的情况下,采用普通波长扫描技术根本无法测量边孔光纤光栅的双峰间距,而边孔光纤光栅恰恰需要测量双峰间距

行温度自补偿的压力传感。因此提出了一种新型的基于偏振检测的实验方案,如图 7 所示。从可调谐窄带激光器输出的线偏振光沿与保偏光纤光轴成 45° 的方向注入光纤中,保偏光纤与边孔光纤熔接时保持与光轴平行,光进入边孔光纤光栅后将产生两个不同偏振的反射峰。反射光通过保偏光纤耦合器 C1 引出,经过保偏光纤耦合器 C2 分为两束,再经过两个正交方向的检偏器 P_x, P_y 检偏,即可在相应的探测器 D_x, D_y 处得到边孔光纤光栅不同偏振态的反射信号。

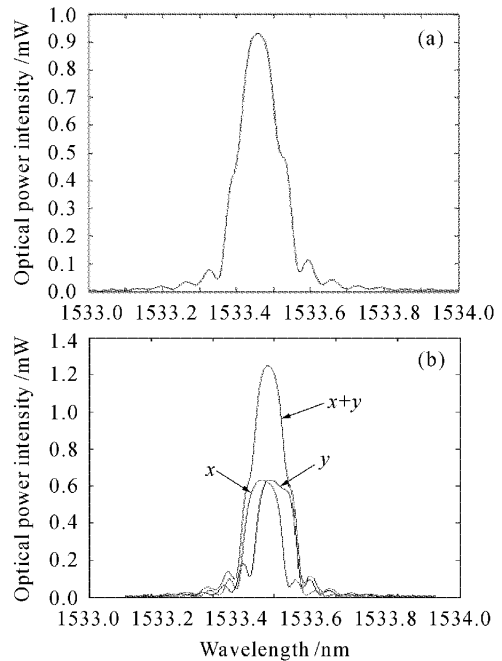


图 6 通过普通波长扫描方案(a)和偏振检测方案(b)测得的反射谱线

Fig. 6 Reflection spectra detected with (a) normal wavelength scanning technique and (b) polarization detection technique

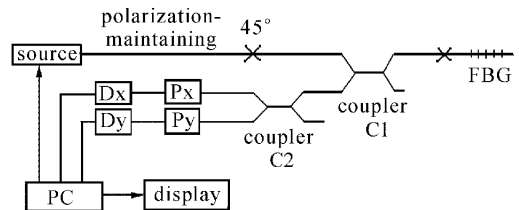


图 7 基于偏振检测的边孔光纤光栅特性测量系统

Fig. 7 Side hole fiber grating measurement system based on polarization detection

系统所用光源为 NetTest 公司生产的型号为 TUNICS-plus 10 s 的可调谐窄带激光器,其波长调谐范围为 1530 ~ 1570 nm,输出光功率在 0 ~

10 dBm可调,波长扫描间距为2 pm,输出的线偏振光的消光比大于25 dB;光纤为熊猫型保偏光纤,消光比为30 dB;耦合器为熔锥型保偏光纤耦合器,分束比为1:1,插入损耗小于0.5 dB,消光比为25 dB;检偏器采用保偏光纤偏振器,插入损耗小于0.3 dB,消光比为30 dB。图 6(b)是通过该种方案所检测到的边孔光纤光栅的反射谱线。其中 x, y 曲线分别表示图 1 所示 x 偏振方向和 y 偏振方向所检测到的反射谱线, $x + y$ 曲线是将两个偏振方向的反射谱线叠加所得到的总反射谱线。通过图 6(b) 可以明显看出,在边孔光纤光栅的两个偏振方向各有一个反射峰,其中心波长分别为 $\lambda_y = 1533.606 \text{ nm}$, $\lambda_x = 1533.565 \text{ nm}$,两中心波长的间隔 $\Delta\lambda = 0.041 \text{ nm}$,由此推算出边孔光纤的双折射 $B = 3.91 \times 10^{-5}$,此结果与前述双折射值基本相同。同时可以看出 $\lambda_y > \lambda_x$,这与前面计算得出的 y 轴方向的折射率大于 x 轴方向的结论相一致。另外将图 6(b) 中的 $x + y$ 反射谱线形状与图 6(a) 的反射谱线比较可以看出,两者基本吻合,从而证实了前面分析所得出的边孔光纤光栅的反射谱线是两个偏振方向相互正交的反射谱线叠加的结论。

4 边孔光纤光栅的温度、压力特性

采用图 7 所示的波长检测方案,将边孔光纤光栅分别置于压力罐和温箱内(压力罐的压强范围为 0~3 MPa,温箱的温度范围为 30~80 °C),对其温度和压力传感特性进行了测量。图 8 为实验测得的边孔光纤光栅的温度特性。图 8(a) 为边孔光纤两个反射峰的中心波长位移随温度变化的曲线,图 8(b) 为两个反射峰中心波长数值随温度变化的数据线性拟合曲线。通过图 8(b) 的线性拟合可以看出,两个反射峰的温度灵敏度分别为 $\alpha_y = 9.16 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, $\alpha_x = 9.21 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,线性度 R 为 0.998。可见双峰间距随温度变化的灵敏度系数为 $\Delta\alpha = 0.05 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,是单个反射峰温度灵敏度系数的 1/184,减小了两个数量级,成功地实现了温度自补偿。

同时又对边孔光纤光栅的压力特性进行了测量,图 9 为实验测得的边孔光纤光栅的压力特性图线。图 9(a) 为边孔光纤两个反射峰的中心波长位移随压力变化的曲线,图 9(b) 为两个反射峰中心波长的差值随压力变化的线性拟合曲线。通过图 9(b) 可以看出双峰间距随压力变化的灵敏度系数为 $5.6 \text{ pm}/\text{MPa}$,线性度 R 为 0.998。

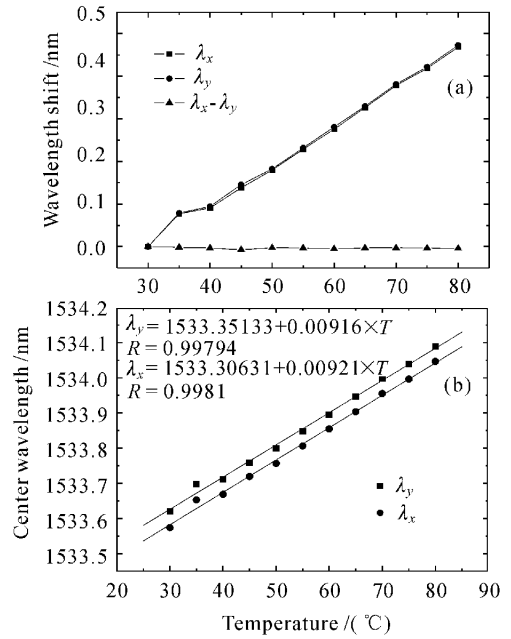


图 8 中心波长位移随温度变化的曲线(a)和温度特性的线性拟合曲线(b)

Fig. 8 Center wavelength shift versus temperature curve (a) and linear fit curve of temperature property (b)

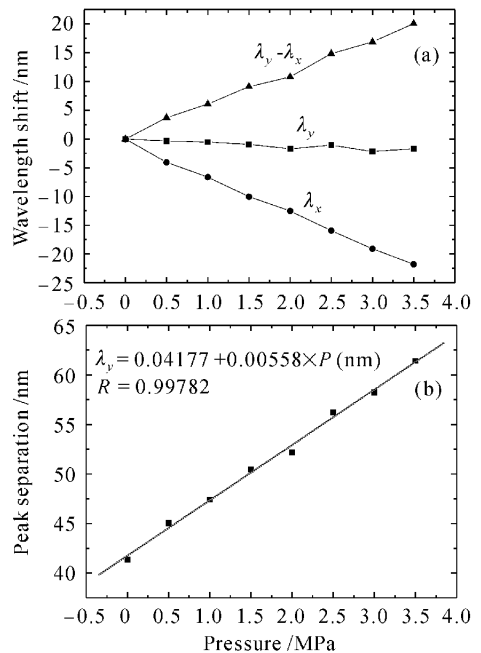


图 9 中心波长位移(a)和双峰间距(b)随压力的变化曲线

Fig. 9 Center wavelength shift (a) and peak separation (b) versus pressure curves

通过图 8,图 9 的实验测量结果可以看出,边孔光纤光栅的双峰间距基本上对温度不敏感,因此测量边孔光纤光栅的双峰间距可实现温度不敏感的压

力传感,解决了普通单模光纤光栅压力传感测量中的温度压力交叉敏感问题。另外利用边孔光纤光栅进行压力测量时,测量量为波长间隔,对测量的绝对精度不作要求,只要有较高的波长分辨率即可,这将使其应用非常便利。根据上面的实验结果,边孔光纤光栅双峰间距的压力灵敏度仅有5.6 pm/MPa,灵敏度仍然较小,必须采取进一步的措施进行压力增敏。

虽然已有文章进行过有关普通单模光纤光栅高倍压力增敏的实验研究^[2,11,12],但由于边孔光纤光栅的压力传感机制是测量双峰间距,与单模光纤光栅测量单峰移动的机制不完全一致,因此普通单模光纤光栅的压力增敏措施对边孔光纤光栅而言并不一定完全适用,国外学者也没有进行过边孔光纤光栅压力增敏的报道。我们提出一种横向荷载的增敏封装结构对边孔光纤光栅进行压力增敏,如图 10 所示。将边孔光纤光栅以及另外两根支撑光纤平放在两平板玻璃之间,平板玻璃周围采用环氧树脂胶进行密封封装。采用该种封装结构可以将外界对整个平板面的压力转化为对三个支撑点的压力,加大了对边孔光纤光栅的横向荷载,可实现压力增敏。由于所用材料都是石英玻璃,它们具有相同的温度响应特性,所以封装之后的温度敏感系数不会发生变化,实验测量结果表明其温度特性与图 8 基本一致。封装后的边孔光纤光栅传感探头尺寸为15 mm×6 mm×3 mm,如图 11 所示,封装后的压力特性如图 12 所示。

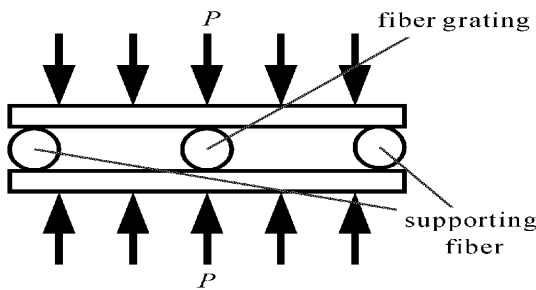


图 10 横向荷载封装结构示意图
Fig. 10 Structure of transversal load sealing

对封装后的压力特性数据进行线性拟合,横向荷载增敏封装后双峰间距的压力灵敏度为119.14 pm/MPa,与裸边孔光纤光栅5.6 pm/MPa相比压力增敏 21 倍,实现了温度不敏感的高灵敏度压力传感。该种增敏装置的另外一个优点在于可以改变平板的尺寸来设计所需要的压力增敏倍数。值

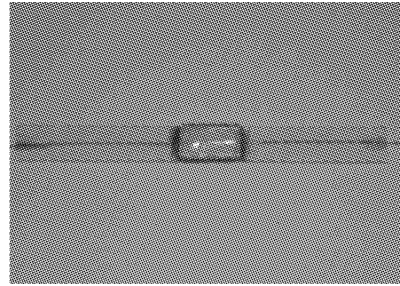


图 11 边孔光纤光栅的横向荷载封装
Fig. 11 Transversal load sealing of side-hole fiber grating

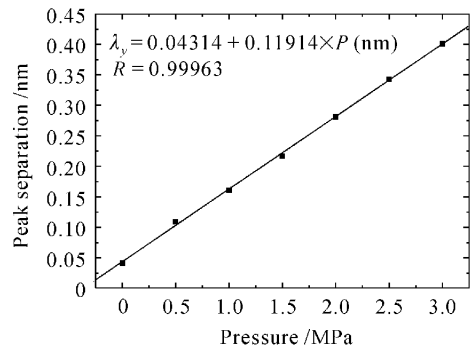


图 12 封装后的压力特性曲线
Fig. 12 Pressure property curve after sealing

得注意的是,在封装过程中必须对边孔光纤进行精准对轴处理,否则不能达到预求的增敏效果。

5 结 论

边孔光纤是一种新型的具有奇异结构的保偏光纤。通过测量边孔光纤光栅的双峰间距可以实现温度不敏感的压力传感测量。实验结果表明裸光纤光栅的温度灵敏度仅为0.05 pm/°C,是普通单模光纤光栅温度灵敏度的1/184。提出了一种基于横向荷载压力增敏的新型边孔光纤光栅封装装置,使边孔光纤光栅双峰间距的压力灵敏度从5.6 pm/MPa增加到119.14 pm/MPa。实验结果表明采用边孔光纤光栅技术有望发展一种新型温度不敏感的高灵敏度压力传感器。

参 考 文 献

- Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, 15 (8):1442~1462
- Liu Lihui, Zhang Weigang, Guo Honglei *et al.*. Study on experiment of fiber Bragg grating pressure sensitivity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, 31(10):1266~1268
刘丽辉,张伟刚,郭宏雷等. 光纤布拉格光栅压力增敏的实验

- 研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(10):1266~1268
- 3 Li Zhizhong, Yang Huayong, Liu Yang *et al.*. Research on solutions of cross-sensitivity of fiber grating sensing [J]. *Optical Communication Technology*, 2004, **28**(6):20~22
李智忠, 杨华勇, 刘 阳 等. 光纤光栅交叉敏感解决方案研究 [J]. 光通信技术, 2004, **28**(6):20~22
- 4 M. G. Xu, J. L. Archambault, L. Reekie *et al.*. Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(13):1085~1087
- 5 Wei-Chong Du, Xiao-Ming Tao, Hwa-Yaw Tam *et al.*. Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1):105~107
- 6 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
- 7 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
- 8 Robert J. Schroeder, Tsutomu Yamate, Eric Udd. High pressure and temperature sensing for the oil industry using fiber Bragg gratings written onto side hole single mode fiber [C]. *SPIE*, 1999, **3746**:42~45
- 9 Li Zhizhong, Hu Yongming, Yang Huayong *et al.*. Finite-element analysis of birefringence in circular-core side-hole fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8):1013~1018
李智忠, 胡永明, 杨华勇 等. 圆芯型边孔光纤双折射的有限元分析[J]. 光学学报, 2005, **25**(8):1013~1018
- 10 Li Zhizhong, Sun Chongfeng, Yang Huayong *et al.*. Study on optical power fluctuation measurement in FBG center wavelength detecting with tunable laser [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(4):413~417
李智忠, 孙崇峰, 杨华勇 等. FBG 中心波长的可调谐光源法检测中光强起伏研究[J]. 光电子 • 激光, 2005, **16**(4):413~417
- 11 Zhang Ying, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun *et al.*. A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1):89~91
张 颖, 刘志国, 郭转运 等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究[J]. 光学学报, 2002, **22**(1):89~91
- 12 Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *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