

# 熊猫光纤光栅压力传感特性研究

李智忠<sup>1,2</sup> 杨华勇<sup>2</sup> 程玉胜<sup>1</sup> 胡永明<sup>2</sup>

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

**摘要** 采用有限元法建立了熊猫光纤光栅的压力传感模型, 分析了压力变化所导致的内部应力分布。结果表明, 熊猫光纤光栅双峰间距随着压力增加而增大, 其快轴方向的压力灵敏度系数为  $-4.08 \text{ pm/MPa}$ , 其绝对值大于慢轴方向  $-3.5 \text{ pm/MPa}$ 。理论分析和实验测量了几何结构对压力传感特性的影响规律, 结果表明, 熊猫光纤光栅压力灵敏度系数与猫眼半径距离比的平方成线性关系。对比实验结果表明, 无法通过测量熊猫光纤光栅双峰间距的方案实现对温度不敏感的压力传感测量。

**关键词** 光纤光学; 熊猫光纤光栅; 压力传感; 有限元法

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092901.0157

## Pressure Sensing Characteristics of Panda Fiber Gratings

Li Zhizhong<sup>1,2</sup> Yang Huayong<sup>2</sup> Cheng Yusheng<sup>1</sup> Hu Yongming<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Navy Submarine Academy, Qingdao, Shandong 266071, China

<sup>2</sup> College of Optoelectronics, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** The pressure sensing mode of panda fiber gratings is built using the finite element method and the stress distribution induced by pressure is analyzed. The experimental results show that the peak separation of Panda fiber gratings increases with pressure, and  $-4.08 \text{ pm/MPa}$  the pressure sensitivity along fast axis is stronger than that  $-3.5 \text{ pm/MPa}$  along slow. The influence of fiber structure on pressure sensing characteristics is studied through theoretical calculation and experimental measurement, and the results show that the pressure sensing coefficients of panda fiber gratings are linear with the square of the ratio of radius to distance of stress applied zone. The contrastive experimental results show that the Panda fiber grating cannot be used to measure thermally-insensitive pressure through testing its peak separation.

**Key words** fiber optics; Panda fiber grating; pressure sensing; finite element method

## 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<sup>[1,2]</sup>。在这些应用中, 消除温度-压力耦合成为光纤光栅传感器中必须解决的一大难题。虽然目前已有多种关于光纤光栅温度-压力去耦方案的报导<sup>[3]</sup>, 但多数方案系统复杂, 使得光纤光栅传感器丧失了结构简单、体积小的固有优势。Robert J. Schroeder 等<sup>[4]</sup>将光纤布拉格光栅写入了一种新型的双折射光纤——边孔光纤, 结果发现通过直接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, 从而解决温度-压力耦合问题。由于该方案同时保持了结构简单、体积小的优势, 从而引起了人们对边孔光纤及边孔光纤光栅的广泛研究<sup>[5~8]</sup>。然而, 由于边孔光纤结构较为特殊, 制作较为困难<sup>[7]</sup>, 能否采用其他常用双折射光纤, 尤其是与边孔光纤结构相似的熊猫光纤, 代替边孔光纤而达到同样效果?

## 2 理论分析

### 2.1 基本结构

熊猫光纤主要由纤芯、包层和应力施加区(又称“猫眼”)三部分构成<sup>[10]</sup>。在光纤制作过程中, 当光

收稿日期: 2008-03-21; 收到修改稿日期: 2008-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(60507010)资助课题。

作者简介: 李智忠(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光纤传感技术和水声信号处理技术方面的研究。

E-mail: jirmy@163.com

纤从近千度的软化温度冷却到室温时,应力施加区与包层材料之间热膨胀系数的差别使得熊猫光纤内部产生了非轴对称性分布的热应力,从而产生了应力双折射。由于双折射的存在,光纤横截面内存在相互正交的、分别为有效折射率最大和最小的两个方向,分别被称为慢轴和快轴。对于熊猫光纤,两猫眼连线方向为双折射的慢轴方向。

利用有限元软件的静态结构分析模块建立了熊猫光纤三维模型,如图 1 所示。基于位移求解的有限元算法,对如图 1 所示的熊猫光纤的内部应力 ( $S_x, S_y$ ) 及其双折射分布进行了分析计算,如图 2。其结构参数为:纤芯半径  $a = 4 \mu\text{m}$ ,包层半径  $b = 62.5 \mu\text{m}$ ,猫眼半径  $r = 16 \mu\text{m}$ ,猫眼距离  $d = 24 \mu\text{m}$ ; 厂家所提供的猫眼参数为:热膨胀系数  $\alpha_3 = 24.94 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$  (对应  $\Delta T = -1000 ^\circ\text{C}$  时),杨氏模量  $E_3 =$

$6500 \text{ kg/mm}^2$ ,泊松比  $\nu_3 = 0.201$ ;纤芯和包层的参数: $E_1 = E_2 = 7830 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\nu_1 = \nu_2 = 0.186$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2 = 5.4 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ 。参考文献[10]对熊猫光纤的应力和双折射分布进行了实验测量,其测量结果与图 2 的计算结果完全吻合。

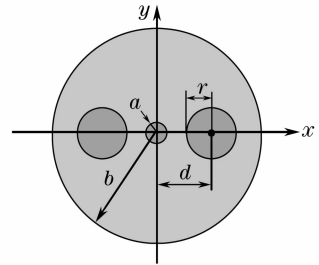


图 1 熊猫光纤结构示意图

Fig. 1 Cross section of Panda fiber

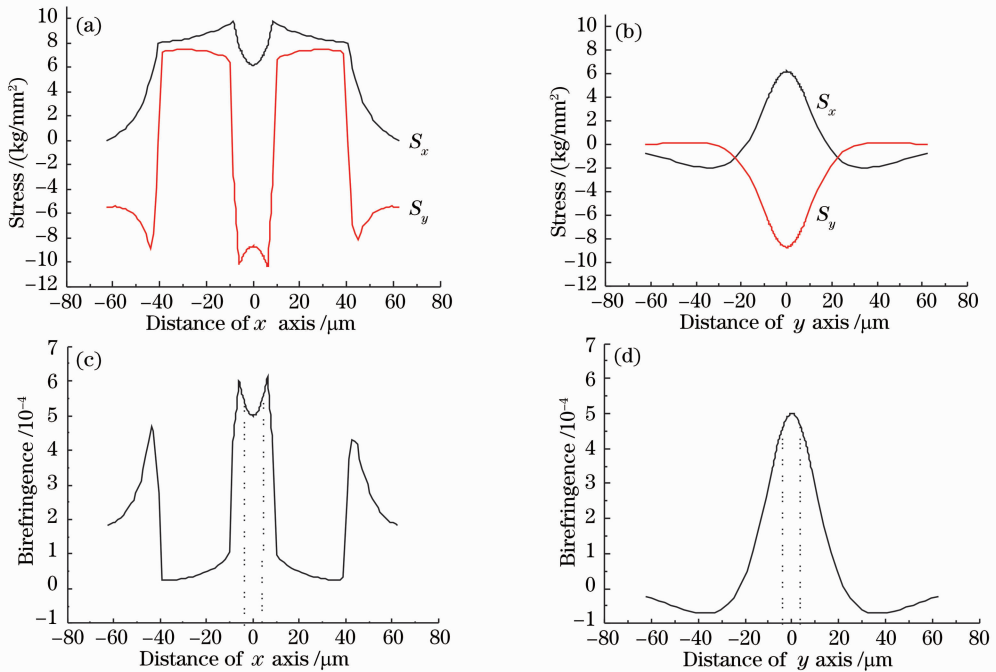


图 2 熊猫光纤在  $x$  和  $y$  坐标轴上的应力分布 (a), (c) 和双折射分布 (b), (d)

Fig. 2 Stress distribution (a), (c) and birefringence distribution (b), (d) along  $x$  axis and  $y$  axis of Panda fiber

由于光纤双折射的存在,在熊猫光纤上刻写一个光栅,等效于在两偏振方向的同一位置各写入了一个光栅。当一宽谱光注入时,其反射谱线上会出现偏振态相互正交的两个反射峰<sup>[8]</sup>,其中心波长  $\lambda_i$  可表示为

$$\lambda_i = 2n_i\Lambda, \quad (i = x, y) \quad (1)$$

式中  $n_i$  为  $i$  方向的有效折射率,  $\Lambda$  为光纤光栅的栅格周期。则双峰间距  $\delta\lambda$  可表示为

$$\delta\lambda = \lambda_x - \lambda_y = 2B\Lambda, \quad (2)$$

式中  $B$  为熊猫光纤的固有双折射。

## 2.2 压力传感机理分析

不同压力形式的作用效果是不一样的<sup>[11]</sup>, 本文研究的压力形式是最为常见的径向和纵向都存在的各向同性压力。对于熊猫光纤光栅,在外界各向同性压力作用下,由于猫眼的存在使得两偏振方向产生不同的应变,从而具有不同的压力响应特性。根据弹性形变和弹光效应,两反射峰中心波长随压力变化的位移量可表示为<sup>[11]</sup>

$$\Delta \lambda_x = \lambda_x \left[ -\frac{n_x^2}{2}(p_{11}\epsilon_x + p_{12}\epsilon_y + p_{12}\epsilon_z) + \epsilon_x \right] = K_{px} \Delta P, \quad (3)$$

$$\Delta \lambda_y = \lambda_y \left[ -\frac{n_y^2}{2}(p_{12}\epsilon_x + p_{11}\epsilon_y + p_{12}\epsilon_z) + \epsilon_y \right] = K_{py} \Delta P,$$

式中  $p_{11}, p_{12}$  为弹光系数,  $\epsilon_i$  为  $i$  ( $i = x, y, z$ ) 方向的应变,  $K_{px}$  和  $K_{py}$  分别为  $x$  和  $y$  方向上中心波长移动的压力灵敏度系数。

定义  $\lambda_0 = (\lambda_x + \lambda_y)/2, n_0 = (n_x + n_y)/2$ , 则双峰间距  $\delta\lambda$  的变化量可表示为

$$\Delta(\delta\lambda) = \Delta\lambda_x - \Delta\lambda_y = \frac{B_p}{n_0} \lambda_0 = (K_{px} - K_{py}) \Delta P = K_{pd} \Delta P, \quad (4)$$

式中  $K_{pd}$  为双峰间距移动的压力灵敏度系数,  $B_p$  为由压力变化所导致的诱导双折射<sup>[12]</sup>。

由虎克定理可计算  $x, y$  方向的应变并代入(3)式, 即可完成对压力灵敏度系数的求解。图3是外界压力在1 MPa时在 $(x, y)$ 坐标轴上所引起的应力分布。

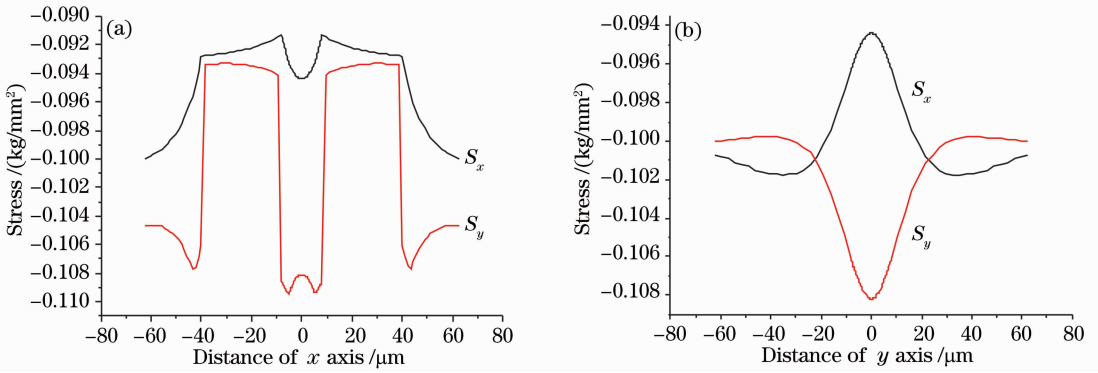


图3 在1 MPa压力时熊猫光纤  $x$  和  $y$  坐标轴上所引起的应力分布

Fig. 3 Stress distribution along  $x$  axis (a) and  $y$  axis (b) of panda fiber with 1 MPa pressure

由图3可见, 外界压力所导致的应力分布与熊猫光纤内部的应力分布基本一致, 因此它所产生的诱导双折射  $B_p$  与光纤本身的固有双折射  $B$  方向一致, 光纤偏振保持能力得以提高, 即当受到外界各向同性压力时, 熊猫光纤的保偏效果将会更好。

取  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}, n_0 = 1.456$ , 对  $r = 16 \text{ }\mu\text{m}, d = 24 \text{ }\mu\text{m}$  时的压力灵敏度系数的计算结果为:  $K_{px} = -3.631 \text{ pm/MPa}, K_{py} = -4.142 \text{ pm/MPa}, K_{pd} = 0.511 \text{ pm/MPa}$ 。灵敏度系数的正负表示波长移动的方向, 其绝对值的大小反映压力响应能力的强弱。

两个偏振方向的压力灵敏度系数都为负数, 表

明随着压力的增加, 两偏振方向的中心波长均向短波方向移动;  $y$  方向压力灵敏度系数的绝对值大于  $x$  方向, 则表明  $y$  方向比  $x$  方向具有更灵敏的压力响应能力。另外, 双峰间距的压力灵敏度系数为正值, 表明随着压力的增加, 双峰间距增大, 其原因在于外界压力增大了光纤双折射。

### 2.3 几何结构对压力传感特性的影响

各向异性分布的光纤结构导致了熊猫光纤两偏振方向压力响应能力的不同, 几何结构的变化必然会对压力传感特性产生影响。

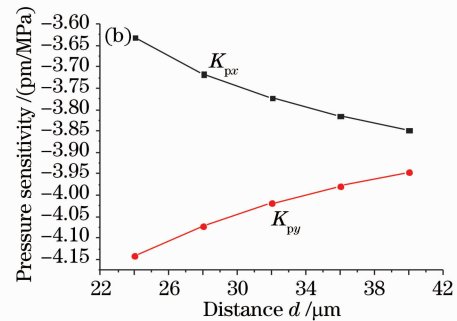
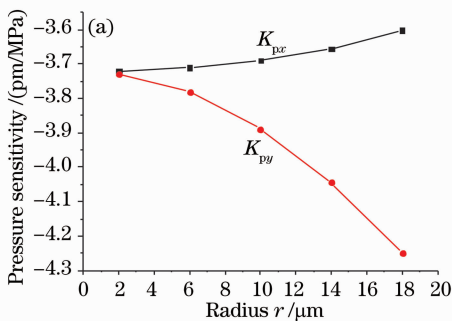


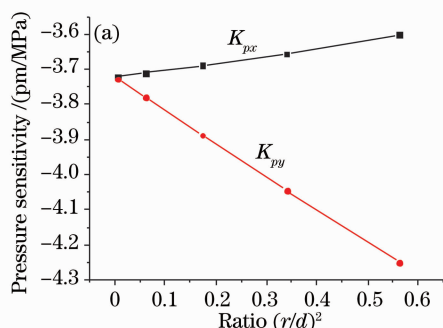
图4 压力灵敏度系数随猫眼半径(a)和猫眼距离(b)的变化曲线

Fig. 4 Dependence of the pressure sensitivity coefficients on the radius (a) and distance (b) of stress applied zone

熊猫光纤的外径  $b$  和纤芯半径  $a$  都有标准规定,不能任意改变。保持猫眼距离  $d=24\ \mu\text{m}$  不变,令猫眼半径  $r$  的变化范围为  $2\sim 18\ \mu\text{m}$ ,图 4(a)是两偏振方向的压力灵敏度系数随猫眼半径  $r$  的变化曲线。保持猫眼半径  $r=16\ \mu\text{m}$  不变,令猫眼距离  $d$  的变化范围为  $24\sim 40\ \mu\text{m}$ ,图 4(b)为两偏振方向的压力灵敏度系数随猫眼距离  $d$  的变化曲线。

由图 4(a)可见,在猫眼半径较小时( $r=2\ \mu\text{m}$ ),两偏振方向上的压力灵敏度系数都接近猫眼不存在时单模光纤光栅的压力灵敏度数值 $-3.72\ \text{pm}/\text{MPa}$ <sup>[13]</sup>,从侧面验证了模型的合理性。

分析图 4 可见, $x$  方向压力灵敏度系数的绝对值随猫眼半径的增加而减小,随猫眼距离的增加而



增大; $y$  方向压力灵敏度系数的绝对值随猫眼半径的增加而增大,随猫眼距离的增加而减小。因此,若要提高  $x$  方向的压力灵敏度须减小猫眼半径,增大猫眼距离;若要提高  $y$  方向的压力灵敏度则要增大猫眼半径,减小猫眼距离。

如图 5 所示,无论改变猫眼半径还是改变猫眼距离,熊猫光纤的压力灵敏度系数基本上与猫眼半径与猫眼距离比值(猫眼半径距离比)的平方( $r/d$ )<sup>2</sup> 近似成线性比例关系。可见,随着( $r/d$ )<sup>2</sup> 数值的增加, $x$  方向压力灵敏度系数的绝对值线性减小, $y$  方向线性增加,双峰间距压力灵敏度系数近似线性增加。因此猫眼半径距离比的平方( $r/d$ )<sup>2</sup> 是影响熊猫光纤光栅压力传感特性的决定因素。

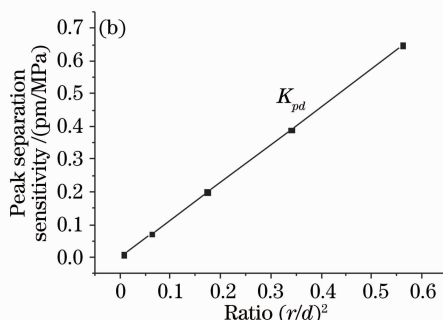


图 5 压力灵敏度系数随  $(r/d)^2$  的变化曲线

Fig. 5 Dependence of the pressure sensitivity coefficients on the ratio  $(r/d)^2$

综合分析图 4 和图 5 可知,无论熊猫光纤结构如何变化,总有  $K_{py} < K_{px} < 0, K_{pd} > 0$  成立,即随着压力增加,两偏振方向的中心波长均向短波方向移动,快轴方向的压力响应能力大于慢轴方向,双峰间距总是随着压力的增加而增大。

### 3 实验结果

实验所用熊猫光纤的型号为 sc0201(pm11)-1A 的熊猫型双折射光纤(编号 PM1 #)。由于它不具备光敏性而不能直接刻写光纤光栅,因此在制作前对其进行了 15 天的载氢处理,然后采用相位掩模法<sup>[14]</sup> 制作了光纤光栅,裸栅区长度为  $30\ \text{mm}$ 。其几何参数为:纤芯半径  $a=3.9\ \mu\text{m}$ ,包层半径  $b=62.5\ \mu\text{m}$ ,猫眼半径  $r=16\ \mu\text{m}$ ,猫眼距离  $d=24.5\ \mu\text{m}$ 。将厂家提供的材料参数代入,采用有限元法的计算结果为: $K_{px}=-3.63\ \text{pm}/\text{MPa}, K_{py}=-4.14\ \text{pm}/\text{MPa}, K_{pd}=0.51\ \text{pm}/\text{MPa}$ 。

熊猫光纤光栅的反射谱线中存在着偏振方向相互正交的两个反射峰,普通的波长检测方案测很难实现对两个反射峰的有效检测。因此实验中采用了

基于偏振检测的谱线测量方案<sup>[8]</sup>,利用两反射峰偏振态相互正交的特性,采用检偏器件将两反射峰分开检测。

图 6 是在室温时测得的熊猫光纤光栅两个偏振方向的反射谱线,由于曝光过量,反射谱线形状不够理想,部分存在啁啾现象<sup>[15]</sup>,但明显可见两个反射峰的存在。测量结果表明,熊猫光纤光栅两个偏振反射峰的波长分别为  $\lambda_x=1549.6271\ \text{nm}, \lambda_y=1549.1054\ \text{nm}$ ,其双峰间距为  $\Delta\lambda=0.5217\ \text{nm}$ 。

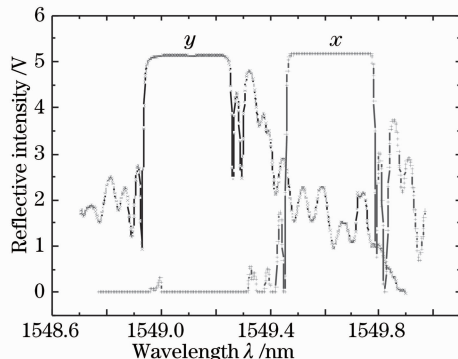


图 6 熊猫光纤光栅反射谱线

Fig. 6 Reflective spectrum of Panda fiber grating

$\lambda_x > \lambda_y$ , 说明两猫眼连线的方向 ( $x$  方向) 为熊猫光纤光栅的慢轴方向, 与前面结论一致。

将光纤光栅置于压力罐中, 控制压力变化范围为  $0 \sim 2.5$  MPa, 每隔  $0.5$  MPa 测量一个数据点; 对于每个压力点测量  $5$  次, 取平均值作为结果。其中  $0$  MPa 的情况实际是室压时的压力, 只会影响中心波长的基准值, 但对压力灵敏度的测量结果没有影响。图 7 为实验测得的不同压力 ( $0$  MPa 和  $2.5$  MPa) 时熊猫光纤光栅不同偏振方向上的反射谱线, 图 8 为两偏振方向中心波长及双峰间距的波长移位量随压力变化的

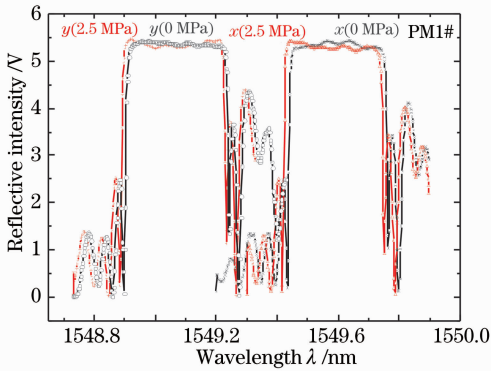


图 7 不同压力时的反射谱线

Fig. 7 Reflective spectrum at different pressure

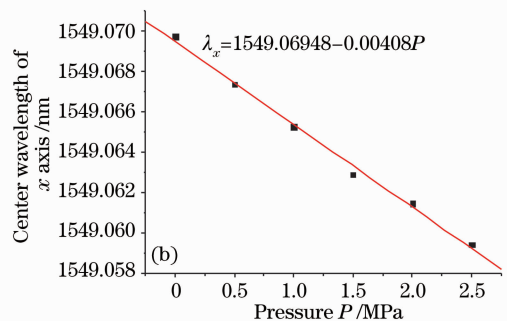
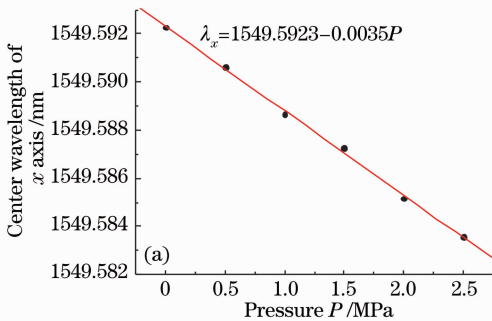


图 9 熊猫光纤光栅  $x$  方向 (a),  $y$  方向 (b) 的压力响应

Fig. 9 Pressure response along  $x$  axis (a) and  $y$  axis (b) of Panda fiber grating

为了进一步验证几何结构的影响, 我们对另一型号为 Sc0301 (pm47)-1B 的熊猫光纤 ( $r = 16 \mu\text{m}$ ,  $d = 23 \mu\text{m}$ ) 刻写了光纤光栅 (编号 PM2 #), 采用相同的实验方案对它的压力传感特性进行了测量, 拟合结果表明,  $K_{px} = -3.4$  pm/MPa,  $K_{py} = 4.15$  pm/MPa,  $K_{pd} = 0.75$ 。

编号 PM1 # 和 PM2 # 熊猫光纤的结果对比表明, 由于 PM2 # 的  $(r/d)^2$  的数值大于 PM1 # 的, 其  $x$  方向压力灵敏度系数的绝对值小于 PM1 # 的,  $y$  方向压力灵敏度系数的绝对值和双峰间距的压力灵敏度系数大于 PM1 # 的, 这与理论分析结论一致, 初步验证了几何结构与压力传感特性之间的关系。

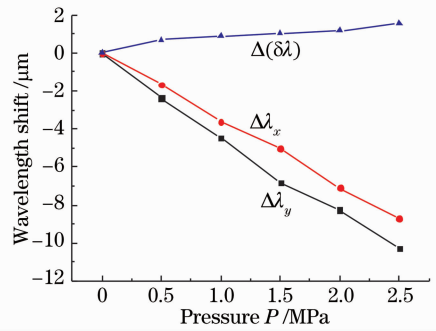


图 8 波长移位量的压力响应

Fig. 8 Dependence of wavelength shift on pressure

测量结果。

由图 7 可以看出, 随着压力的增加, 两个偏振方向的反射谱线都向短波方向移动, 谱线形状基本保持不变, 总体移动幅度不大, 表明熊猫光纤光栅的压力灵敏度相对较小。对图 8 中两个偏振方向中心波长随压力变化的测量数据进行了线性拟合, 如图 9 所示。拟合结果表明  $x$  方向的压力灵敏度系数  $K_{px} = -3.5$  pm/MPa,  $y$  方向的压力灵敏度系数  $K_{py} = -4.08$  pm/MPa, 双峰间距的压力灵敏度系数  $K_{pd} = 0.58$  pm/MPa, 与前面数值计算结果基本吻合, 验证了数值计算的可信度。

根据本文和文献 [8, 9] 的实验测量结果, 对熊猫光纤光栅和边孔光纤光栅的双峰间距随温度和压力变化的灵敏度系数进行总结对比, 结果表明, 熊猫光纤光栅双峰间距的压力传感系数仅为  $0.58$  pm/MPa, 比边孔光纤光栅  $4.62$  pm/MPa 小近一个数量级, 故其压力灵敏度较低。另外, 边孔光纤光栅具有相对较高的压力灵敏度和较低的温度灵敏度, 温度变化  $1^\circ\text{C}$  会对压力测量结果仅带来  $0.01$  MPa 的压力测量误差; 而对熊猫光纤光栅, 其对温度和压力的敏感能力相差不大, 温度变化  $1^\circ\text{C}$  对将会带来  $0.897$  MPa 的压力测量误差, 比边孔光纤光栅高近两个数量级, 因此其温度-压力耦合程度较为严重。由此不能采用熊猫



光纤光栅代替边孔光纤光栅来实现双峰间距对温度不敏感的压力传感测量。

## 4 结 论

对熊猫光纤光栅的压力传感特性进行了理论和实验研究。研究表明,熊猫光纤光栅双峰间距随压力增大而增大;熊猫光纤光栅快轴方向的压力响应能力大于慢轴方向;压力灵敏度系数与猫眼半径距离比的平方成线性关系。对熊猫光纤光栅温度和压力传感特性的对比结果表明,不能采用熊猫光纤光栅代替边孔光纤光栅以实现双峰间距对温度不敏感的压力传感测量。

## 参 考 文 献

- 1 Kenneth O. Hill, Gerald Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1263~1276
- 2 Jiang Desheng, He Wei. Review of applications for fiber grating sensors[J]. *J. Optoelectronics • Lasers*, 2002, **13**(4): 420~429  
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): 420~429
- 3 Liu Yunqi, Guo Zhuanyun, Liu Zhiguo *et al.*. The mechanism and solutions of cross-sensitivity of fiber grating sensor measurements[J]. *J. Optoelectronics • Lasers*, 1999, **10**(2): 179~182  
刘云启,郭转运,刘志国 等. 光纤光栅传感测量中的交叉敏感机制及其解决方案[J]. *光电子激光*, 1999, **10**(2): 179~182
- 4 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]. *Proc. SPIE*, 1999, **3475**: 42~45
- 5 Y. Tsutomu, T. R. Rogerio, J. S. Robert *et al.*. Thermally insensitive pressure measurement up to 300 °C using fiber Bragg gratings written onto side hole single mode fiber[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4185**: 628~631
- 6 C. Ewa, U. Waclaw, J. B. Wojtek. Measurement of pressure and temperature sensitivities of a Bragg grating imprinted in a highly birefringent side-hole fiber [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(31): 6284~6290
- 7 J. R. Clowes, S. Syngellakis, M. N. Zervas. Pressure sensitivity of side-hole optical fiber sensors[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6): 857~859
- 8 Li Zhizhong, Luo Hong, Yang Huayong *et al.*. Side-hole fiber grating sensing characteristics [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1081~1086  
李智忠,罗 洪,杨华勇 等. 边孔光纤光栅的传感特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1081~1086
- 9 Zhu Hai, Li Zhizhong, Cai Peng *et al.*. Theoretical and experimental research on temperature characteristics of PANDA fiber gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 709~715  
朱 海,李智忠,蔡 鹏 等. 熊猫光纤光栅温度传感特性的理论和实验研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 709~715
- 10 Nori Shibata, Masamitsu Kokuda. Measurement of stress profiles in the preform of a polarization-holding fiber with stress-applying parts[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1984, **LT-2**(3): 228~233
- 11 Li Zhizhong, Yang Huayong, Liu Yang *et al.*. Research on pressure sensing mechanism of fiber Bragg grating [J]. *J. Applied Optics*, 2005, **26**(3): 16~19  
李智忠,杨华勇,刘 阳 等. 光纤 Bragg 光栅压力传感机理研究 [J]. *应用光学*, 2005, **26**(3): 16~19
- 12 Zhengyong Li, Chongqing Wu, Hui Dong *et al.*. Stress distribution and induced birefringence analysis for pressure vector sensing based on single mode fibers[J]. *Opt. Exp.*, 2008, **16**(6): 3955~3960
- 13 Li Zhizhong, Zhu Hai, Tang Zhihong *et al.*. Research on fiber Bragg grating side-hole package technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 993~998  
李智忠,朱 海,汤志宏 等. 光纤光栅边孔封装技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 993~998
- 14 Li Bin, Liu Yan, Tan Zhongwei *et al.*. Linearly chirped fiber gratings using uniform phase mask [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 414~418  
李 彬,刘 艳,谭中伟 等. 利用均匀相位掩模板制作线性啁啾光纤光栅[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 414~418
- 15 Guo Tuan, Liu Bo, Zhang Weigang *et al.*. Research on optical fiber grating chirp-sensing technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 828~834  
郭 团,刘 波,张伟刚 等. 光纤光栅啁啾化传感研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 828~834