

# 基于光纤布拉格光栅偏振相关损耗的温度与侧向力的同时测量

王启宇 励强华

(哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150025)

**摘要** 由耦合模理论分析得出, 光纤布拉格光栅反射偏振相关损耗峰值位置对于温度和侧向力的作用有不同的响应特性。可通过相关灵敏度系数矩阵, 用单根光纤光栅实现对温度和侧向力的同时测量, 此方法解决了温度应力交叉敏感问题。实验测得反射偏振相关损耗左峰和右峰的温度灵敏度分别为  $0.0101 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  和  $0.0100 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , 侧向力灵敏度分别为  $0.0071 \text{ nm}/\text{N}$  和  $0.0005 \text{ nm}/\text{N}$ , 温度和侧向力测量精度分别为  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $\pm 0.6 \text{ N}$ 。此方法具有核心传感元件简单、稳定性好、易于埋入被测材料内部进行实时监测等优点, 是一种检测材料内部结构和环境温度变化的新方法。

**关键词** 光纤光学; 光栅; 反射偏振相关损耗; 温度; 侧向力

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1205003

## Simultaneous Measurement of Temperature and Lateral Force Based on Polarization Dependent Loss of Fiber Bragg Grating

Wang Qiyu Li Qianghua

(Institute of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin, Heilongjiang 150025, China)

**Abstract** According to the coupled-mode theory, different properties of reflected polarization dependent loss (RPDL) of fiber Bragg grating to temperature and lateral force are analyzed. Based on the relevant sensitivity coefficient matrix, the temperature and lateral force can be demodulated by a single fiber Bragg grating simultaneously, by which the problems induced by the cross sensitivity of temperature and lateral force can be avoided in the test progress. The experimental temperature sensitivity coefficients of left peak and right peak of RPDL are  $0.0101 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  and  $0.0100 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , respectively. Lateral force sensitivity coefficients achieve  $0.0071 \text{ nm}/\text{N}$  and  $0.0005 \text{ nm}/\text{N}$ , respectively. The accuracy of temperature and lateral force can reach  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $\pm 0.6 \text{ N}$ , respectively. The key sensing component of the method has advantages of simplicity, high sensitivity and easy to be buried into interior of material tested to conduct monitoring. It provides a new method to test the changes of temperature and internal structure information.

**Key words** fiber optics; gratings; reflected polarization dependent loss; temperature; lateral force

**OCIS codes** 060.3735; 060.2340; 260.5430

## 1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)因其具有尺寸小、质量轻、波长编码以及便于埋入被测材料内部进行实时监测等优点, 较适合测量材料结构内部的应变、温度等信息<sup>[1~3]</sup>, 被广泛应用于工程环境信息监测过程, 方便进行结构体质量整体评估。但是在工程结构中温度与应变相互影响、交叉敏感, 其中光纤光栅测量

过程中交叉敏感问题的解决尤其重要。目前已提出了多种解决轴向力与温度的交叉敏感问题的方法<sup>[4,5]</sup>。但对侧向力与温度传感应用中的交叉敏感问题研究很少。

本文在理论上分析了布拉格光纤光栅的反射偏振相关损耗(RPDL)峰值位置对于温度和侧向力共同作用下的灵敏度差异特性, 计算得出相关灵敏度

收稿日期: 2012-07-13; 收到修改稿日期: 2012-08-19

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12521154)资助课题。

作者简介: 王启宇(1981—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事光纤光栅偏振特性方面的研究。E-mail: qiyu2007@yahoo.cn

系数矩阵,利用单根 FBG 实现温度和侧向力的同时测量<sup>[6]</sup>。该方法结构简单,并且具有较高的灵敏度和测量精度。

## 2 RPDL 理论模型

偏振相关损耗(PDL)是描述光学系统对于传输

光偏振态损耗敏感程度的物理量,RPDL 可以表示成<sup>[7]</sup>

$$L_{\text{RPDL}}(\lambda) = \left| 10 \lg \frac{r_x(\lambda)}{r_y(\lambda)} \right|, \quad (1)$$

式中  $r = |\rho|^2$ ,  $\rho$  是反射系数,  $\lambda$  是波长。

根据耦合模理论,反射系数  $\rho$  可以表示成

$$\rho_{x(y)} = \frac{-k_{x(y)} \sinh[\sqrt{k_{x(y)}^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2} L]}{\hat{\sigma}_{x(y)} \sinh[\sqrt{k_{x(y)}^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2} L] + i \sqrt{k_{x(y)}^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2} \cosh[\sqrt{k_{x(y)}^2 - \hat{\sigma}_{x(y)}^2} L]}, \quad (2)$$

其中,  $k_{x(y)} = \frac{\pi v \overline{\delta n_{\text{eff},x(y)}}}{\lambda}$ ,

$\hat{\sigma}_{x(y)} = 2\pi n_{\text{eff}} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\text{B},x(y)}} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{\text{eff},x(y)}}$ 。  $n_{\text{eff}}$  是纤芯有效折射率,  $\overline{\delta n_{\text{eff},x(y)}}$  是平均有效折射率,  $L$  是光栅长度,  $\lambda_{\text{B}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda$  是布拉格波长,  $\Lambda$  为光栅周期,  $v$  是调制深度。

室温条件下(24 °C),无侧向力作用时,对 FBG 的反射功率谱和 RPDL 谱进行数值模拟,如图 1 所示。模拟图中 RPDL 出现多处峰值,峰值位置出现在反射功率谱某一偏振模( $x$  或  $y$  偏振模)的极小值处;RPDL 半峰全宽极小,采用波长解调可以精确定位。由于反射能量主要集中在布拉格波长附近,在以下讨论中仅考虑反射功率谱主峰两侧 RPDL 的两个峰值(分别定义为左峰和右峰)位置的变化,受外界环境作用时左峰和右峰漂移量分别对应  $x$  偏振模和  $y$  偏振模漂移量。

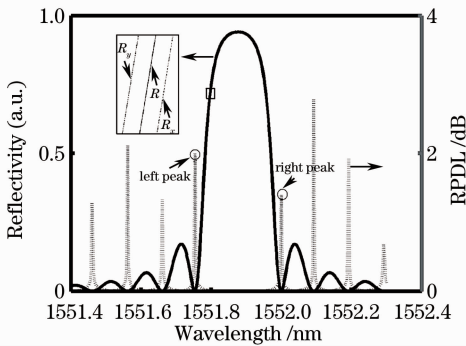


图 1 光纤光栅反射谱及对应的偏振相关损耗  
Fig.1 Reflective spectrum and corresponding RPDL of a FBG

光纤光栅受外界环境作用时两相互正交的  $x$  偏振模和  $y$  偏振模波长漂移为

$$\Delta\lambda_{\text{B},x(y)} = 2\Delta n_{\text{eff},x(y)}\Lambda + 2n_{\text{eff},x(y)}\Delta\Lambda. \quad (3)$$

由于两偏振模功率谱的各自漂移,导致 RPDL 峰值位置和峰间距的变化。

### 2.1 温度对 RPDL 的影响

当 FBG 外界温度发生变化时,  $\Delta n_{\text{eff}}$  和  $\Delta\Lambda$  均发生变化,变化量分别为<sup>[8,9]</sup>

$$\Delta n_{\text{eff}} = \xi n_{\text{eff}} \Delta T, \quad (4)$$

$$\Delta\Lambda = \alpha \Lambda \Delta T, \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为热膨胀系数,  $\xi$  是光纤热光系数,  $\Delta T$  为温度变量。

将(4)、(5)式代入(3)式可得  $\lambda_{\text{B}}$  位置随温度变化的方程,由于 FBG 横截面各个方向受温度的影响相同,相互垂直的两偏振模方向有效折射率变化相同,两偏振模波长漂移量相同,有  $\Delta\lambda_x^T = \Delta\lambda_y^T = \Delta\lambda_{\text{B}}^T$ , 表示为

$$\Delta\lambda_{\text{B}}^T = \left[ \zeta - \frac{1}{2} n_{\text{eff}}^2 (p_{11} + p_{12}) \alpha + \alpha \right] \lambda_{\text{B}} \Delta T, \quad (6)$$

式中  $p_{11}$  和  $p_{12}$  分别为弹光系数,通常情况下,  $\alpha$  是常数,其近似值为  $1.83 \times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$ 。

### 2.2 侧向力对 RPDL 的影响

当光纤光栅只受到均匀侧向压力作用时,光栅周期和有效折射率均发生变化,由于侧向力作用破坏了 FBG 截面对称性,光纤光栅出现双折射,有效折射率沿  $x, y$  方向变化不再一致,  $\Delta n_{\text{eff}}$  和  $\Delta\Lambda$  变化量分别为<sup>[10]</sup>

$$\Delta n_{\text{eff},x} = \frac{-(n_{\text{eff},0})^3}{2} [p_{11}\epsilon_x + p_{12}(\epsilon_y + \epsilon_z)], \quad (7)$$

$$\Delta n_{\text{eff},y} = \frac{-(n_{\text{eff},0})^3}{2} [p_{11}\epsilon_y + p_{12}(\epsilon_x + \epsilon_z)], \quad (8)$$

$$\Delta\Lambda = \Lambda \epsilon_z, \quad (9)$$

式中  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  分别是侧向力作用下  $x, y, z$  方向应变变量,依据胡克定理有  $\epsilon_x = (\sigma_x - u\sigma_y)/E, \epsilon_y = (\sigma_y - u\sigma_x)/E, \epsilon_z = -u(\sigma_x + \sigma_y)/E, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  分别为  $x, y, z$  方向的应力分量,  $u$  为光纤材料的泊松比,  $E$  为杨氏模量。

将(7)~(9)式代入(3)式可得光纤光栅两偏振模波长漂移量  $\Delta\lambda_x^F, \Delta\lambda_y^F$  ( $\Delta\lambda^F$  为侧向力引起的波长

漂移量)与侧向力  $F$  的关系分别为

$$\Delta\lambda_x^F = -\frac{n_{\text{eff}}^3 \{[(1+3u)p_{11} + (u-3)p_{12}] + 4un_{\text{eff}}\} \Delta}{\pi L b E} \Delta F, \quad (10)$$

$$\Delta\lambda_y^F = -\frac{n_{\text{eff}}^3 \{[-(3+u)p_{11} + (1+5u)p_{12}] + 4un_{\text{eff}}\} \Delta}{\pi L b E} \Delta F, \quad (11)$$

式中  $b$  为 FBG 半径。

### 2.3 温度和侧向力同时作用

RPDL 左峰波长漂移:

$$\Delta\lambda_x = -\frac{(n_{\text{eff}})^3 \{[(1+3u)p_{11} + (u-3)p_{12}] + 4un_{\text{eff}}\} \Delta}{\pi L b E} \Delta F + \left[ \zeta - \frac{1}{2} n_{\text{eff}}^2 (p_{11} + p_{12}) \alpha + \alpha \right] \lambda_B \Delta T, \quad (12)$$

RPDL 右峰波长漂移:

$$\Delta\lambda_y = -\frac{(n_{\text{eff}})^3 \{[-(3+u)p_{11} + (1+5u)p_{12}] + 4un_{\text{eff}}\} \Delta}{\pi L b E} \Delta F + \left[ \zeta - \frac{1}{2} n_{\text{eff}}^2 (p_{11} + p_{12}) \alpha + \alpha \right] \lambda_B \Delta T. \quad (13)$$

由(12)、(13)式可知,RPDL 左峰和右峰漂移量对于温度和侧向力变化具有不同的灵敏度系数,从而可以通过敏感矩阵实现对温度和侧向力的同时测量。

## 3 实验部分

实验装置如图 2 所示,实验中采用可调谐激光光源(Agilent 81980A),输入光通过偏振特性分析仪(Agilent A2000),进入环形器和光纤光栅,光纤光栅反射信号进入测量装置,可以得到关于 RPDL 的相关信息,实验中采用的 FBG 中心波长为 1553.45 nm,光栅长度为 8 mm,偏振特性分析仪最小分辨率为 1 pm。实验中采用温控炉对光纤光栅进行加热,采用抛光钢板固定光栅部分,然后通过砝码对其施加侧向压力。

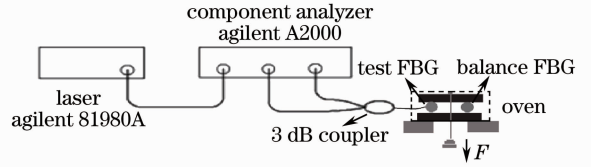


图 2 实验装置

Fig. 2 Setup of experiment

### 3.1 温度变化实验曲线

改变环境温度,在 24 °C~94 °C 区间内每隔 10 °C 记录一次左峰和右峰的位置,RPDL 峰值位置随温度变化如图 3(a)所示,两峰间距基本不发生变化,且两峰均向长波方向漂移,由 3(b)可以看出,左右峰漂移量和温度变化之间呈很好的线性关系,灵敏度分别为 0.0101 nm/°C 和 0.0100 nm/°C。

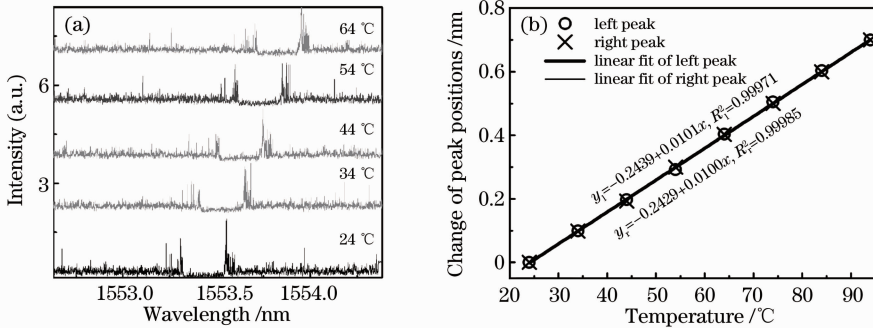


图 3 (a)不同温度下 RPDL 谱;(b)不同温度作用下的 RPDL 响应曲线

Fig. 3 (a) RPDL spectra at different temperatures; (b) response curves of RPDL at different temperatures

### 3.2 RPDL 对侧向压力的测量

在 24 °C 室温下,对光纤光栅施加侧向压力,每隔 2.5 N 记录一次两波峰位置,不同侧向压力下的 RPDL 图谱如图 4(a)所示,其两峰位置漂移量不同,其中左峰较为灵敏,两峰间距随压力的增加逐渐

缩小。由图 4(b)可得,RPDL 两峰位置随侧向压力变化呈较好的线性关系,侧向压力灵敏度分别为 0.0071 nm/N 和 0.0005 nm/N。当侧向压力达到 35 N 时,两峰基本重合,难以分辨,如需增大测量范围可在两钢板间加入多根平衡光纤。

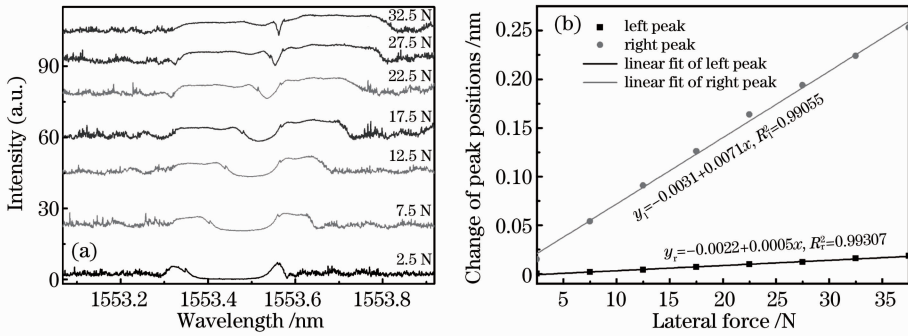


图 4 (a)不同侧向力作用下 RPD 谱;(b)侧向力作用下的 RPD 响应曲线

Fig. 4 (a) RPD spectra at different lateral forces; (b) response curves of RPDL at different lateral forces

### 3.3 温度和侧向压力同时作用时矩阵表示

当温度和侧向压力同时变化时,RPDL 两峰波长漂移量可表示为

$$\Delta\lambda_i = K_i^T \Delta T + K_i^F \Delta F, \quad (14)$$

式中  $\Delta T$  和  $\Delta F$  分别为温度和侧向压力变化,  $i = x, y$  分别对应左峰和右峰,由此可得敏感矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_x \\ \Delta\lambda_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x^T & K_x^F \\ K_y^T & K_y^F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta F \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中  $K_x^T$  和  $K_y^T$  分别为 RPD 左峰和右峰位置变化温度灵敏度系数,  $K_x^F, K_y^F$  分别 RPD 左峰和右峰位置变化侧向力灵敏度系数,可分别由图 3(b) 和图 4(b) 的曲线斜率求得。将(12)式转置并代入灵敏度系数得

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta F \end{bmatrix} = \frac{1}{0.00007} \begin{bmatrix} -0.0005 & 0.0071 \\ 0.0100 & -0.0101 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_x \\ \Delta\lambda_y \end{bmatrix}, \quad (16)$$

据(16)式由 RPD 左右两峰位置变化可以得到温度和侧向力的变化,实现对温度和侧向压力的同时测量。

温度和侧向压力同时测量的结果如图 5 所示,图中给出了温度  $24\text{ }^\circ\text{C} \sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ ,侧向压力  $4 \sim 32\text{ N}$

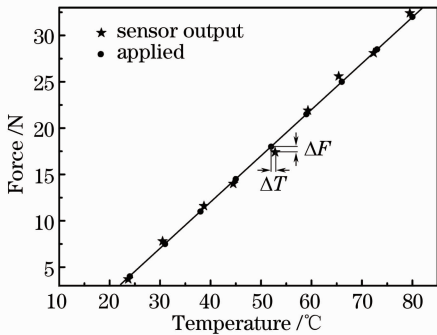


图 5 温度和侧向压力同时测量实验结果

Fig. 5 Simultaneous measurement results of temperature and lateral force

范围内同时作用的传感特性。通过 Agilent A2000 得到左峰和右峰波长漂移量,利用(16)式,得到温度和侧向压力的变化量。重复测量 5 次取均值,温度和侧向压力的最大误差分别为  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$  和  $\pm 0.6\text{ N}$ ,重复性误差分别为  $2.3\%$  和  $2.0\%$ 。由于采用峰值位置解调,避免了由于光源抖动带来的误差,实验误差主要来源于实验中光纤光栅受力的不均匀使得其内部产生啁啾现象。

## 4 结 论

设计了一种同时检测温度和侧向力的传感方法,理论分析了温度和侧向力对 FBG 的 RPD 的影响,实验结果表明 RPD 的左右主峰对温度和侧向压力有不同的响应灵敏度,因此可以通过敏感矩阵实现对温度和侧向压力的同时测量。该传感方法采用波长解调,重复性好,测量精度高,并且结构简单,便于埋入测试物体内部,为精确测量材料全方位信息提供了一种新的方法。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Qiyu, Li Qianghua, Guo Bingxia *et al.*. Effect of lateral force on reflected polarization properties of low-birefringence fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Laser*, 2012, **39**(3): 0305003  
王启宇, 励强华, 郭炳霞等. 横向压力对弱双折射光纤光栅偏振相关损耗特性的影响[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0305003
- 2 A. D. Kerdey, M. A. Davis, H. J. Patrick. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1643
- 3 S. J. Chang, N. S. Kim. Estimation of displacement response form FBG strain sensors using empirical mode decomposition technique[J]. *Experimental Mechanics*, 2012, **52**(6): 573~589
- 4 Tong Zhengrong, Guo Yang, Yang Xiufeng. Simultaneous measurement of temperature and strain based on a long-period fiber grating combined with a Lyot fiber filter in a linear configuration[J]. *Chinese J. Laser*, 2012, **39**(3): 0305002  
童峥嵘, 郭 阳, 杨秀峰. 基于 Lyot 滤波器和长周期光纤光栅的温度与应变的同时测量[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0305002
- 5 Zhang Jinlong, Yu Chongxiu, Wang Kuiru. A fiber grating dualparameter sensor of ditrignon cantilever beam for measurement of strain and temperature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009,

- 38**(4): 770~774  
张锦龙, 余重秀, 王葵如. 双三角形结构的光纤光栅压力和温度双参量传感器[J]. 光子学报, 2009, **38**(4): 770~774
- 6 Miao Fei, Chen Xiao, Zhang Ling *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and strain using LPFG and HBF loop mirror[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(7): 1042~1045  
苗飞, 陈霄, 张玲. 基于 LPFG 和 HBF 环镜的温度和应变同时测量[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(7): 1042~1045
- 7 Gao Shecheng, Li Qianghua. Characterization of polarization dependent loss in reflection in uniform fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0306004  
高社成, 励强华. 均匀光纤布拉格光栅的反射偏振相关损耗特性[J]. 光学学报, 2011, **31**(3): 0306004
- 8 Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, Fu Haiwei. Theory and experiment about in-fiber Bragg grating temperature sensing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(2): 494~497  
乔学光, 贾振安, 傅海威. 光纤光栅温度传感理论与实验[J]. 物理学报, 2004, **53**(2): 494~497
- 9 Tian Chunhua, Li Qianghua, Guo Bingxia. Reflected polarization properties of low-birefringence fiber Bragg gratings based on temperature effect [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 139~143  
田春华, 励强华, 郭炳霞. 弱双折射光纤布拉格光栅反射偏振对温度响应特性的研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(2): 139~143
- 10 Yiping Wang, Xiaoqin Huang, Yang Wang. Temperature-insensitive transverse load sensing with improved accuracy using stress induced birefringence effects of fiber Bragg grating [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2011, **122**(21): 1914~1917

栏目编辑: 王晓球