

# 相移光纤光栅横向受力传感特性研究

孙永熙,汪弋平,黄晓琴

(南京师范大学物理科学与技术学院,江苏 南京 210023)

[摘要] 对相移光纤光栅(PS-FBG)的横向受力特性进行了理论和实验研究.采用传输矩阵法分析了 PS-FBG 的传输特性,并建立了光栅横向受力数学模型.理论分析表明,光栅透射谱阻带中的透射窗口在横向受力时会产生光谱分裂,且分裂距离与所受横向压力的大小成正比关系.实验在 0~1 N 的横向压力条件下,获得了  $1.4\times 10^{-3}$  N/mm 的灵敏度,实验结果与理论模拟相符.

[关键词] 相移光纤光栅,光纤传感,光谱特性

[中图分类号] TN253 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2014)01-0082-05

## Analysis of Phase-Shifted Fiber Bragg Grating Sensing Under Transverse Force

Sun Yongxi, Wang Yipin, Huang Xiaoqin

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The characteristic of phase-shifted fiber Bragg grating (PS-FBG) under transverse force was studied theoretically and experimentally. Based on the transfer matrix method, the transmission spectral characteristics of PS-FBG are analyzed, and the corresponding mechanical models for the PS-FBG under transverse force are established. The theoretical analysis suggests that the narrow central transmission window is split with splitting distance is linearly proportional to the applied transverse force. Under the transverse force conditions of 0–1 N, a force resolution of  $1.4\times 10^{-3}$  N/mm is obtained. The experiment results agree well with the simulation results.

**Key words:** phase-shifted fiber Bragg grating, fiber sensing, spectral character

光纤光栅(FBG)易于与其他光纤器件通过熔融连接到应用系统中,它有体积小、质量轻、耐腐蚀、抗干扰能力强、可重复使用等诸多优点,使得 FBG 在光通信及光纤传感领域起到重要作用.相对于普通 FBG,相移光纤光栅(PS-FBG)因为具有更高质量的波长选择性,从而在滤波器、波分复用、单频光纤激光器等领域的应用中有着普通 FBG 所不能替代的作用.而在光纤传感领域,目前大多数 FBG 传感器<sup>[1,2]</sup>主要用于测量沿光纤轴向应力和应变的作用,对于 FBG 用于横向压力传感<sup>[3-5]</sup>的研究相对较少. Gafsi 和 El-Sherif<sup>[6]</sup>讨论了光纤光栅基于有效折射率变化的横向负载特性.吴飞等<sup>[7]</sup>研究了 FBG 局部横向受力时反射光谱分裂,分裂点随受力大小而周期移动.但普通 FBG 的光谱特性对横向压力不敏感,不易于测量.针对这一问题,本文提出利用相移光纤光栅<sup>[8]</sup>来测量横向压力.相移光栅制作的传感器能够测量较小的横向压力,具有很高的灵敏度.本文首先采用耦合模理论和传输矩阵法对 PS-FBG 的透射谱作了详细的理论分析和数值模拟,随后建立了横向压力作用下光栅的受力模型.研究表明,横向压力的作用导致 PS-FBG 透射谱分裂,分裂波长差与应力大小成线性正比关系.最后,用简单的实验和结果证实了该方法的可行性和实用性.

### 1 理论分析

均匀 FBG 的折射率变化成正(余)弦分布且连续变化,中间没有相位跃变. PS-FBG 的折射率变化也是成正(余)弦分布,但相位在某个位置处产生跃变,也即折射率变化是不连续的,折射率不连续的点称为相移点<sup>[9]</sup>.

收稿日期:2013-08-06.  
基金项目:国家自然科学基金(61307108)、教育部博士点基金(20103207120004)、江苏省高校自然科学基金重点项目(11KJA510003).  
通讯联系人:黄晓琴,博士,教授,研究方向:光信息处理、非线性光学和电磁场理论. E-mail:06109@ njnu. edu. cn

相移  $\varphi = \pi$  将光栅分为两段长度分别为  $L_1$  和  $L_2$  的均匀光栅,如图 1 所示. 运用基于耦合模理论的传输矩阵方法分析 PS-FBG 的传输特性. 整个 FBG 的传输过程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ B_1^* & A_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-j\phi} & 0 \\ 0 & e^{j\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ B_2^* & A_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ S_1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中,  $A_i = \cosh(\gamma_B L_i) - j \frac{\Delta\beta_i}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B L_i)$ ;  $B_i = -j \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B L_i)$ ;  $\gamma_B = \sqrt{\kappa^2 - \Delta\beta_i^2}$ . 式中,  $\varphi$  是光栅相移的大小,

$\kappa = \frac{\pi}{\lambda} \delta n_{\text{eff}}$  是光栅的耦合系数,  $\Delta\beta_i = \frac{2n_{\text{eff}}\pi}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda}$  为光栅传播常数,  $\delta n_{\text{eff}}$  为折射率调制值. 代入初始条件  $\begin{bmatrix} R_1 \\ S_1 \end{bmatrix} =$

$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ , 可得到 PS-FBG 的透射率为<sup>[6]</sup>

$$T = 1 - \left| \frac{S_0}{R_0} \right|^2. \quad (2)$$

相对于均匀 FBG, PS-FBG 在透射谱阻带中打开一个带宽极窄的透射窗口. 通过计算发现, PS-FBG 的相移点处于光栅中点时,在透射窗口,当波长近中点处时,反射率为 1,而不在中点时,反射率小于 1. 其中考虑了在光纤光栅中点处有单个相移  $\varphi$  且取光纤纤芯的有效折射率  $n = 1.46$ , 光栅长度  $L = 20$  mm, 中心波长  $\lambda_B = 1550$  nm.

依次取相移  $\varphi = 0, \frac{1}{2}\pi, \pi, \frac{3}{2}\pi, 2\pi$ , 用传输矩阵法模拟透射光谱如图 2 所示. 由图 2 可知, 均匀 FBG 引入相移后, 透射谱中产生了一个窄带宽反射窗口, 反射峰值对应反射谱中的分裂点. 随着相移量的增大, 透射窗口逐渐向长波方向移动. 当  $\varphi = \pi$  时, 透射窗口正好对应布拉格波长  $\lambda_B$ , 且以  $\pi$  为基点, 相移量变大或变小相同的量时, 所对应的透射窗口位置关于  $\lambda_B$  对称. 透射窗口的峰值波长从全谱带宽的短波长处往长波长方向移动, 且峰值波长与相移量大小成线性关系<sup>[10]</sup>. 由上可知, 相移量为  $\pi$  的相移点位于光栅中点时, 相移光栅透射谱透射窗口反射率高, 易于分辨观测, 不易受光栅谱旁瓣的影响. 以下考虑相移量为  $\pi$  的相移光栅.

PS-FBG 横向受力状况如图 3 所示. 长度  $L$  的 PS-FBG 受到横向压力时, 光纤发生形变导致折射率变化, 并产生双折射, 即产生两个正交的偏振模式, 分别对应光纤的快慢轴. 假设压力沿  $y$  方向, 则慢轴  $x$  和

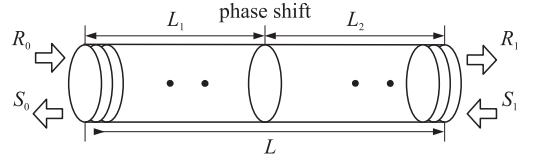


图 1 PS-FBG 的数学模型  
Fig. 1 Mechanical model for the PS-FBG

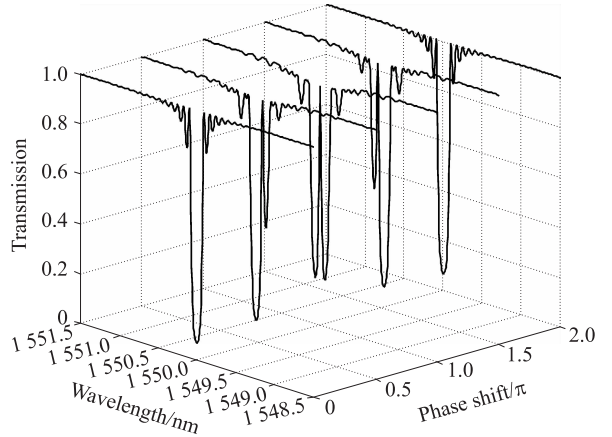


图 2 相移大小改变时 PS-FBG 透射光谱  
Fig. 2 Transmission spectrum of PS-FBG with different phase-shift

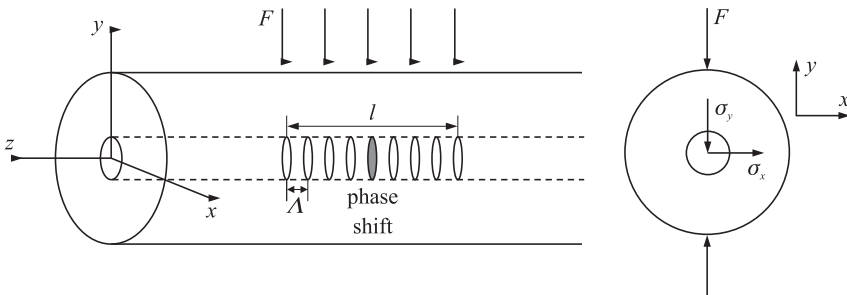


图 3 PS-FBG 横向压力受力示意图  
Fig. 3 View of the PS-FBG subjected to a transverse force

快轴  $y$  的折射率变化可由下式表示<sup>[11]</sup>：

$$\Delta n_x = -\frac{1}{2E}n_{\text{eff}}^3 \{ (p_{11}-2\nu p_{12})\sigma_x + [(1-\nu)p_{12}-\nu p_{11}](\sigma_x+\sigma_z) \}$$

(3)

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

(4)

式中,  $E$  是光纤的杨氏模量;  $p_{11}$  和  $p_{12}$  是光弹系数;  $\nu$  是泊松比;  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和  $\sigma_z$  分别是  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向上作用于光纤光栅的应力分量. 当 PS-FBG 两端固定时,  $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$ , 若两端为自由端, 则  $\sigma_z = 0$ , 这里只考虑轴向应变为 0 的情况.

光纤纤芯处  $x$  和  $y$  方向应力分量由弹性理论可得

$$\sigma_x = \frac{2F}{\pi l D},$$

$$\sigma_y = \frac{-6F}{\pi l D}.$$

(5)

式中,  $F$  为横向压力;  $l$  为光栅受力长度;  $D$  为光纤直径. 根据胡可定理, 可得出应变的大小和应力的关系为:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y),$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x),$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}[-\nu(\sigma_x + \sigma_y)].$$

(6)

而  $x$ 、 $y$  方向谐振峰之间的间距  $\Delta\lambda$  可以表示为<sup>[12]</sup>：

$$\Delta\lambda = \frac{1}{2}\lambda_0 n_0^2 (p_{11} - p_{12})(\varepsilon_x - \varepsilon_y).$$

(7)

综合式(5)~(7), 不考虑温度的影响, 可以计算得到:

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_y - \Delta\lambda_x = 4n_0^2\lambda_0 \frac{1+\nu}{E\pi l D}(p_{11} - p_{12})F.$$

(8)

由此可得出, 慢轴  $x$ 、快轴  $y$  方向谐振峰之间的间距  $\Delta\lambda$  和横向压力  $F$  成正比关系. 图 4 给出了 0 ~ 1.4 N 横向压力作用下  $\pi$ -PS-FBG 的透射光谱. 从图 4 可以看出, 在压力较小的情况下, 相移光栅的透射谱透射窗口发生分裂, 能清晰地分辨两个峰值, 随着压力的增大, 两个分裂的窗口逐渐展宽, 从而可以直接通过光谱分析获得横向压力信息. 因为透射窗口带宽很窄 (<1 pm), 较小的双折射量  $B = 5 \times 10^{-10}$  就可导致透射窗口分裂, 而普通的 FBG 则不会发生明显的光谱变化, 所以相移光栅制作的传感器能够测量较小的横向压力, 具有很高的灵敏度.

2 实验结果及讨论

实验装置如图 5(a) 所示, 可调谐激光光源 (TLS, Agilent 81949A) 耦合进  $\pi$ -PS-FBG, 反射光耦合进入光纤传感分析仪 (MOI SI-720), 该传感分析仪分辨率可达 1 pm. 横向应力装置如图 5(b) 所示, 该装置上下两层为 18 mm 宽的抛光铝板, 一根与待测 FBG 同直径同材质的光纤与 FBG 平行放置以保证受力平衡. 实验采用数字测力计直接对金属块试压, 施力过程尽量保持垂直方向以免产生剪切力.

实验所使用的 PS-FBG 在室温下测得中心波长为 1 552.856 nm, 光栅长度为 10 mm. 压力大小从 0 到

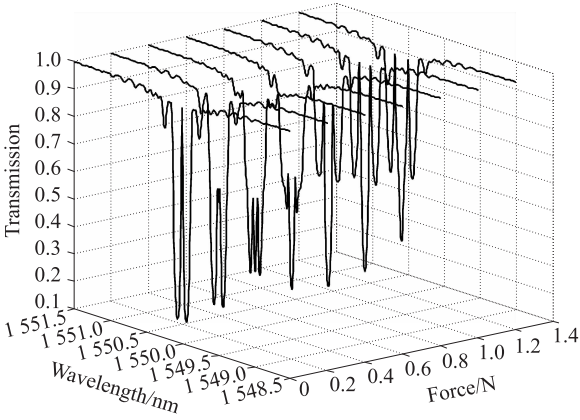


图 4 横向压力作用下 PS-FBG 透射谱

Fig.4 Transmission spectrum of PS-FBG under transverse force

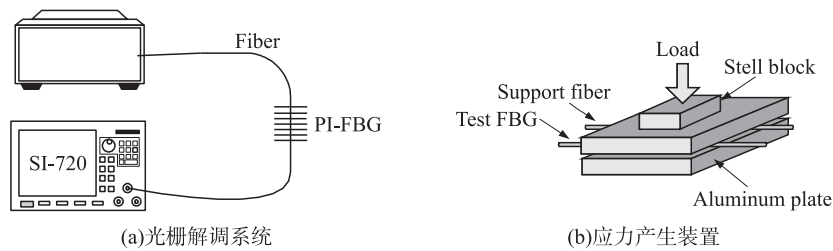


图 5 实验装置  
Fig. 5 Experimental setup

2 N 逐渐增大,起平衡作用、同直径同材质的光纤分担了一半压力,待测光纤光栅实际所受压力为 0 ~ 1 N,误差忽略不计. 实验结果如图 6 所示,对测量数据进行曲线拟合,可以看出两个透射窗口波峰波长差与横向压力具有较好的线性关系. 因为光纤存在固有双折射,压力为 0 时,两透射窗口波峰间距 6.0 pm,随着所施加的压力增大,光纤双折射逐渐增大,两透射窗口波峰间距逐渐增加,这与理论分析符合得很好. 分析实验数据得出直线部分斜率为  $74 \pm 2 \text{ pm}/(\text{N}/\text{mm})$ ,而理论计算值为  $78.5 \text{ pm}/(\text{N}/\text{mm})$ ,产生误差的主要原因是理论计算时采用平面应变的假设,即假设  $z$  方向应变为 0. 而实际光栅所处的受力状态虽然两端自由放置,但铝板虽经过抛光但仍然会对光栅造成摩擦力,因此造成了一定的误差. 实验中所用的光纤传感分析仪波长精确度为 1 pm,,对应  $1.4 \times 10^{-2} \text{ N}/\text{mm}$  的负载或者  $5 \mu\epsilon$  的横向应变. 透射窗口分裂间距最大约 100 pm,对应约 1.4 N/mm 的负载或者 500  $\mu\epsilon$  的横向应变. 此负载大小已能满足实际应用中的需求,通常情况下 FBG 横向应变比主体材料横向应变小 20 ~ 100 倍.

为了衡量温度对 PS-FBG 传感特性的影响,采用水浴法,在 20  $^{\circ}\text{C}$  ~ 50  $^{\circ}\text{C}$  范围之间,每隔 10  $^{\circ}\text{C}$  用光纤传感分析仪测一次光栅光谱的透射窗口波峰波长差. 实验分为 2 个阶段,第一阶段 FBG 不受横向压力作用,第二阶段 FBG 受 1 ~ 10 N 的横向压力. 实验结果如图 7 所示. 曲线  $a$  上各点表示在不同温度下,PS-FBG 不受横向压力时,波峰波长差的值(对应左侧纵坐标),可以看出随着温度逐渐升高,快、慢轴折射率变化几乎相同,透射窗口波峰波长差不变,PS-FBG 的双折射保持不变. 曲线  $b$  上各点表示在不同温度下,测得的波峰波长差与压力组成图像的斜率值(对应右侧纵坐标),可以看出在不同温度下,斜率值是恒定的. 由此可知,温度变化不会引起 PS-FBG 双折射变化,PS-FBG 的波长差变化对温度不敏感.

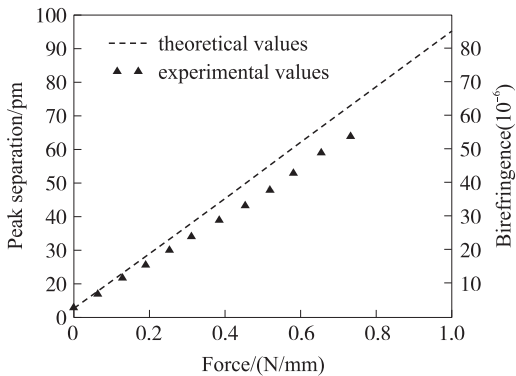


图 6  $\pi$ -PS-FBG 透射窗口波峰波长差与横向压力的  
理论模拟结果和实验结果

Fig. 6 Theoretical simulation and experimental results of  
transverse force on  $\pi$ -PS-FBG

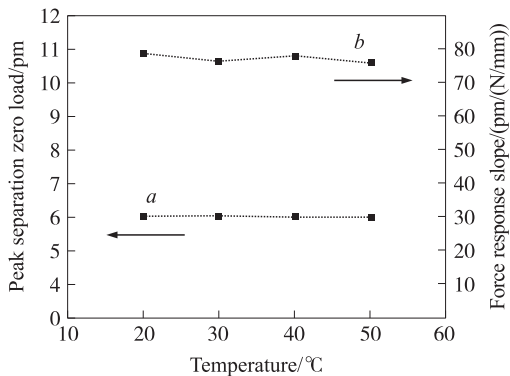


图 7 温度对 PS-FBG 传感特性影响曲线  
Fig. 7 The characteristic curve of PS-FBG  
versus temperature

### 3 结语

本文给出了 PS-FBG 受横向应力的理论模型并进行了数值模拟,设计了在较小压力(0 ~ 1 N)情况下通过测算光栅透射光谱透射窗口分裂距离实现测定光栅横向受力的方法. 实验中发现,在 0 ~ 1 N 的横向压力下测量结果与理论预测相吻合,透射窗口分裂距离与所受横向压力成正比关系,且 PS-FBG 的波长差对温度不敏感,进一步证实了该理论模型的正确性及该测量方法的可行性. 利用这一特性可与光纤光栅轴向应变特性相结合,制作的三维应变测量传感器对光纤光栅在复杂应变传感检测系统中的应用具有重要意义.

[参考文献](References)

- [1] Kersey Alan D,Davis Micheal A,Patrick Heather J,et al. Fiber grating sensors[J]. Journal of Lightwave Technology,1997,15(8):1442-1463.
- [2] Byoung-ho Lee. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology,2003(9):57-79.
- [3] Lawrence C M,Nelson D V,Udd E. Measurement of transverse strains with fiber gratings[C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers(SPIE) Conference Series,1997,3 042:218-228.
- [4] Torres P,Valente L C G. Spectral response of locally pressed fiber Bragg grating[J]. Optics Communications,2002,208:285-291.
- [5] Bosia F,Giacca P,Facchini M,et al. Characterization of embedded fiber Bragg grating sensors written in high-birefringent optical fibers subjected to transverse loading[C]//SPIE's 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. International Society for Optics and Photonics,2002,4 694:175-186.
- [6] Rachid Gafsi,Mahmoud A El-Sherif. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings[J]. Optical Fiber Technology,2000(6):299-323.
- [7] 吴飞,李立新,李志全. 均匀光纤布拉格光栅横向受力特性的理论分析[J]. 中国激光,2006(4):472-476.  
Wu Fei,Li Lixin,Li Zhiqian. Theoretical analysis of fiber Bragg grating characterization by applying transverse force[J]. Chinese Journal of Lasers,2006(4):472-476. (in Chinese)
- [8] Agrawal G P,Radic S. Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing[J]. IEEE Photonics Technology Letters,1994,6(8):965-967.
- [9] Melloni A,Chinello M,Martinelli M. All-optical switching in phase-shifted fiber Bragg grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters,2000,12(1):42-44.
- [10] Cai Lulu,Wu fei,Wang Yutian. Analysis for the reflective spectrum characteristics of phase-shifted fiber gratings[J]. Chinese Journal of Lasers,2009,36(8):2 070-2 075.
- [11] Cai Lulu,Yin Wenwen,Wu Fei. Study of fiber Bragg grating characteristics under local transverse force[J]. Acta Physica Sinica,2008(12):7 737-7 747.
- [12] J Zhao,Y Huang,X Ren. Experimental analysis of birefringence effects on fiber Bragg gratings induced by lateral compression[J]. Opt Commun,2004,229(1-6):203-207.

[责任编辑:严海琳]