

# 局部横向压力下光纤布拉格光栅的 偏振相关损耗特性研究

刘晓雪,汪弋平,黄晓琴

(南京师范大学物理科学与技术学院,光电技术省重点实验室,江苏 南京 210046)

[摘要] 对均匀光纤 Bragg 光栅(FBG)在局部横向作用力下透射信号的偏振相关损耗(PDL)特性进行了详细的理论分析和研究.建立了利用 PDL 实现横向应变传感的理论模型并采用传输矩阵法进行了数值模拟.分析表明,当 FBG 局部横向受力时,最大谐振峰随横向作用力大小呈周期变化,并且受力位置越接近 FBG 的中点,PDL 光谱中的旁瓣越少,谐振峰的峰值越大.随着光栅受压长度的增大,最大谐振峰从长波长向短波长移动.

[关键词] 光纤 Bragg 光栅,局部横向作用力,偏振相关损耗,传输矩阵法

[中图分类号] TN253 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2012)02-0045-05

## Study on Polarization-Dependent Loss Spectral Properties of Locally Pressed Fiber Bragg Grating

Liu Xiaoxue, Wang Yiping, Huang Xiaojin

(Opto-Electronic Technology Key Lab, School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** The theoretical analysis and studies are carried out to characterize the PDL spectral response of the transmitted light of the fiber Bragg grating (FBG) subjected to local transverse force. The theoretical model for transverse force measurements utilizing PDL of the FBG is built and the transfer matrix method is also employed to simulate the polarization-dependent loss (PDL) spectrum. The analysis indicates that the largest resonance wavelength is periodical to the applied force when the FBG is subjected to the transverse local force. Sidelobes in the PDL spectrum of FBG is the smallest and the resonance peak is the biggest when the action point of the load applied on the FBG is in the middle. The longer fiber length under force, the shorter the largest resonance wavelength.

**Key words:** fiber Bragg grating, local transverse force, polarization-dependent loss, transfer matrix method

光纤光栅是近些年来迅速发展光纤无源器件之一,由于它具有许多独特的优点,因此在光纤通信<sup>[1]</sup>中的掺铒光纤放大器和波分复用技术扮演着十分重要的角色,FBG 传感器<sup>[2]</sup>则是除了在通信领域之外的另一个重要应用,已经实现了多种电量或非电量的测量<sup>[3-4]</sup>,如应变、位移、温度、电流、磁场等等.对于应力和应变测量而言,目前大多数 FBG 传感器主要用于测量沿光纤轴向的力和应变的作用<sup>[5]</sup>,对于 FBG 用于横向压力传感的研究相对较少<sup>[6]</sup>.实验表明在 FBG 受到横向应力作用时,其横向应力致双折射效应很弱使得 FBG 的反射光谱变化不明显,因此不太适合用于横向应力传感<sup>[7-9]</sup>.针对这一问题,研究者们提出利用 FBG 的 PDL 特性来实现横向压力测量的新方法,由于 PDL 对横向压力的响应具有更高的灵敏度,因此该方法具有较大的潜力<sup>[10]</sup>.目前对 FBG 的 PDL 特性研究主要集中在均匀横向压力作用下,对于非均匀尤其是局部横向压力作用下的 PDL 特性的研究尚未有相关报道,针对这一问题,本文采用耦合模理论和传输矩阵法建立了局部横向压力作用下 FBG 的 PDL 的响应模型,数值仿真的结果给出了 FBG 的 PDL 随横向作用力的大小、位置及光纤受压长度的变化关系,并探讨了其用于横向压力传感的实现

收稿日期: 2011-12-28.

基金项目: 江苏省自然科学基金( BK 2010544)、教育部博士点基金( 20103207120004)、江苏省普通高校自然科学研究计划资助项目( 11KJA510003) .

通讯联系人: 刘晓雪, 硕士研究生, 研究方向: 光纤光栅的传感及应用. E-mail: 651950746@qq.com

方法.

## 1 理论分析

当长度为  $L$  的均匀 FBG 受到局部横向作用力时,可以把它均分为  $N$  (足够大) 段,每段 FBG 的横向受力情况可看作平面应变,即  $\varepsilon_z = 0$ .  $\sigma_{xi}$ 、 $\sigma_{yi}$ 、 $\sigma_{zi}$  分别为  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向上作用于第  $i$  段 FBG 的应力分量,  $x$  是与受力方向垂直的方向,  $y$  是与受力方向平行的方向,  $z$  是与 FBG 轴向平行的方向. 固定光栅的两端,采用传输矩阵方法建立均匀 FBG 局部横向受力的模型<sup>[11]</sup>,则第  $i$  段 FBG 所受的应力大小可表示为:

$$\sigma_{xi} = \frac{F_i}{\pi lb}, \quad \sigma_{yi} = \frac{-3F_i}{\pi lb}, \quad \sigma_{zi} = \nu(\sigma_{xi} + \sigma_{yi}), \quad (1)$$

式中  $l$  为每一小段 FBG 的长度,  $b$  为光纤的半径,  $F_i$  为第  $i$  段 FBG 所受的横向作用力,  $\nu$  为光纤的泊松比. 由胡克定理可得,第  $i$  段 FBG 的应变分别为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xi} &= (1 + \nu) [(1 + \nu) \sigma_{xi} - \nu \sigma_{yi}] / E, \\ \varepsilon_{yi} &= (1 + \nu) [(1 + \nu) \sigma_{yi} - \nu \sigma_{xi}] / E, \end{aligned} \quad (2)$$

$E$  为光纤的杨氏模量,由式(1)和(2)可知,当第  $i$  段 FBG 受到横向作用力时,  $x$ 、 $y$  方向上都受到应力的作用但力的大小不等,故光纤的折射率发生变化并产生了双折射,  $x$ 、 $y$  方向上的折射率变化分别为:

$$\begin{aligned} \Delta n_{xi} &= -0.5n_{\text{eff}}^3 [p_{11}\varepsilon_{xi} + p_{12}(\varepsilon_{yi} + \varepsilon_{zi})], \\ \Delta n_{yi} &= -0.5n_{\text{eff}}^3 [p_{11}\varepsilon_{yi} + p_{12}(\varepsilon_{xi} + \varepsilon_{zi})], \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $p_{11}$ 、 $p_{12}$  是光纤的光弹系数. 由传输矩阵法可知,每段 FBG 都由一个  $2 \times 2$  阶方阵表示,然后将  $N$  个  $2 \times 2$  阶矩阵相乘来表示整个 FBG. 设第  $i$  段 FBG 的传输矩阵记为  $M_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ B_i^* & A_i^* \end{bmatrix}$ ,入射光为  $\begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix}$ ,则经过

第一段 FBG 后的输出光为  $\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix}$ ,第一段 FBG 的输出光也可看作第二段 FBG 的入射光,由此类推整个 FBG 的输出光为:

$$\begin{bmatrix} a_N \\ b_N \end{bmatrix} = M_N M_{N-1} \cdots M_i \cdots M_2 M_1 \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中:

$$A_i = \cosh(\gamma_B l) - j \frac{\Delta\beta_i}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B l), \quad B_i = -j \frac{\kappa_i}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B l), \quad \gamma_B = \sqrt{\kappa_i^2 - \Delta\beta_i^2}, \quad (5)$$

第  $i$  段 FBG 的耦合系数及  $x$ 、 $y$  方向上的传播常数分别为:

$$\kappa_i = \frac{\pi}{\lambda} \delta n_{\text{eff}}, \quad \Delta\beta_{xi} = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda}, \quad \Delta\beta_{yi} = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda}, \quad (6)$$

$n_{\text{eff}}$ 、 $n_{\text{eff}2}$  分别是  $x$ 、 $y$  方向上的有效折射率,  $\delta n_{\text{eff}}$  为折射率调制值. 由(5)式可得,FBG 的反射率和透射率分别为:

$$R = \left| \frac{b_N}{a_N} \right|^2, \quad T = 1 - R. \quad (7)$$

由式(4)~(7)可得  $x$ 、 $y$  方向上的反射率和透射率  $R_x$ 、 $R_y$ 、 $T_x$ 、 $T_y$ . 根据测量 PDL 的确定性与非确定性两种方法,其反射信号和透射信号中 PDL 的解析公式分别为<sup>[12]</sup>:

$$\begin{aligned} \text{PDL}_r &= 10 \lg \left[ \frac{|T_x|^2}{|T_y|^2} \right], \\ \text{PDL}_t &= 10 \lg \left[ \frac{|R_x|^2}{|R_y|^2} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

光栅受到横向压力产生变形时,其折射率发生变化并产生双折射,反射光谱中的谐振峰由 1 个变为 2 个,所以透射信号中的 PDL 也产生分裂. 光栅局部受力时,由于每段光栅的长度  $l \ll L$ ,所以第  $i$  段受力光栅的传输矩阵可近似为:

$$\mathbf{M}_i \approx \begin{bmatrix} \exp(-j\Delta\beta_{xi}l) & 0 \\ 0 & \exp(j\Delta\beta_{xi}l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(-2j\Delta\beta_{xi}l) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \exp(j\Delta\beta_{xi}l) \quad (9)$$

式(9)中  $\exp(-2j\Delta\beta_{xi}l)$  项具有周期性,而第  $i$  段  $x$  方向的传播常数  $\Delta\beta_{xi}$  与横向力的大小成正比<sup>[13]</sup>,所以透射信号中 PDL 的分裂点与横向作用力成周期关系. 受力段光栅的谐振波长发生移动,未受力段光栅的谐振波长不变,故整个 FBG 的 PDL 光谱随受压长度和受力位置的变化而产生特殊的变化.

在横向压力作用下,应力致双折射很小的时候受力的 FBG 反射光谱与未受力的差异很小,但 PDL 光谱却有明显的变化. 所以,可以用 PDL 光谱来测量横向作用力的实际情况.

## 2 数值模拟

均匀 FBG 的 PDL 与光栅的周期及有效折射率有关,而这些量会随着横向作用力的变化而发生变化. 为了建立 FBG 的应变响应与被测横向作用力变化的关系,采用传输矩阵法分析横向作用力的位置、大小以及光纤受压长度与 PDL 之间的规律,数值模拟所用的参数如下:  $l = 10 \text{ mm}$   $b = 62.5 \text{ }\mu\text{m}$   $\nu = 0.17$   $E = 74.52 \times 10^9 \text{ pa}$   $p_{11} = 0.113$   $p_{12} = 0.252$   $n_{\text{eff}} = 1.5$   $n_{\text{eff}2} = 1.5$   $\delta n_{\text{eff}} = 10^{-4}$   $\Lambda = 519 \text{ nm}$ .

### 2.1 FBG 受力位置的影响

首先考虑 PDL 光谱对受力位置的相应关系. 把 FBG 均分为  $N$  段,让 FBG 的每一段依次受力,从而寻找透射信号中 PDL 与横向作用力位置的规律. 分别在 FBG 的  $1/5$  处、 $1/4$  处、 $1/2$  处、 $3/4$  处、 $4/5$  处施加横向作用力  $F$ ,模拟的 PDL 光谱图如图 1 所示.

从图 1 中可以看出,当 FBG 受到横向作用力的大小不变时,随着 FBG 受力位置的改变,透射信号中的 PDL 光谱也随之变化,但不管作用力施加在 FBG 的哪个位置,都有 3 个明显的谐振峰,而且这 3 个谐振峰所对应的波长几乎是同一个值. 最重要的一点是  $F$  作用在 FBG 的  $1/2$  处时,3 个谐振峰的峰值最大,旁瓣最小.

为了进一步验证  $F$  作用在 FBG 的中间时 3 个谐振峰的峰值最大,我们以最大的谐振峰为例,模拟了横向作用力的位置与透射信号中的 PDL 的最大谐振峰峰值之间的关系图(图 2). 从图 2 中不难看出,受力位置越接近 FBG 的中间,其谐振峰的峰值越大,又因为谐振波长与受力位置无关,故受力位置只影响 3 个谐振峰峰值的大小,这个规律可以用在分布式光纤传感器对空间受力分布状态的测量上.

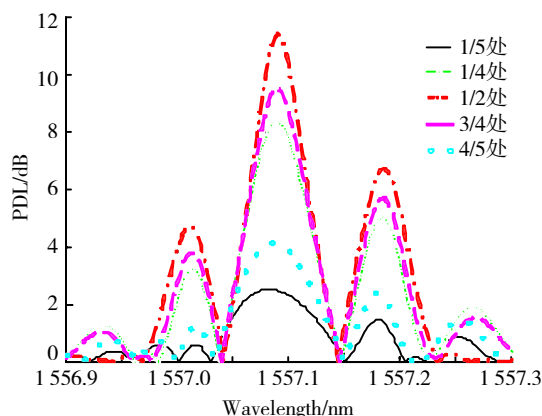


图 1 透射信号中的 PDL 光谱与受力位置的关系

Fig.1 PDL evolution of the transmitted light for different transverse force position

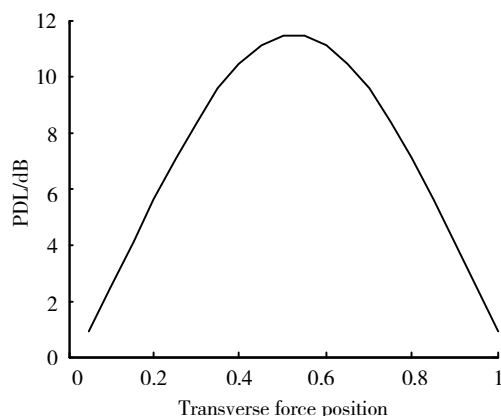


图 2 PDL 光谱中最大谐振峰与作用力位置的关系

Fig.2 PDL evolution of the biggest resonance peak with respect to transverse force position

### 2.2 FBG 受力大小的影响

其次,我们考虑作用力大小对 PDL 的影响. 假设只给 FBG 的正中间施加横向作用力  $F$  时,不同横向压力作用下透射信号中的 PDL 光谱图形如图 3 所示. 当 FBG 受到的横向作用力  $F$  较小时,其 PDL 光谱有 2 个谐振峰. 随着  $F$  的增加, PDL 光谱中的谐振峰分裂成 3 个,谐振峰的峰值随  $F$  的增大而增大;当  $F$  增大到一定值(6N)时,3 个谐振峰的峰值再随  $F$  的增大而减小,其中最大谐振峰从短波长向长波长漂移,其他的谐振峰所对应的波长基本不变. 谐振峰减小到一定程度后,又随  $F$  的增大而增大,如此循环往复,周期约为

10*N*.

由最大谐振波长与横向作用力的关系可知(如图 4),谐振峰波长的漂移与局部横向受力的大小同样成周期性关系(约为 10*N*),最大的谐振峰从短波长向长波长移动,当 *F* 达到一定值时,再从短波长开始向长波长移动,如此循环下去.图 3 和图 4 结合起来可知,*F* 越接近每一循环的中间值,3 个谐振峰的 PDL 值越大,反之则越小.

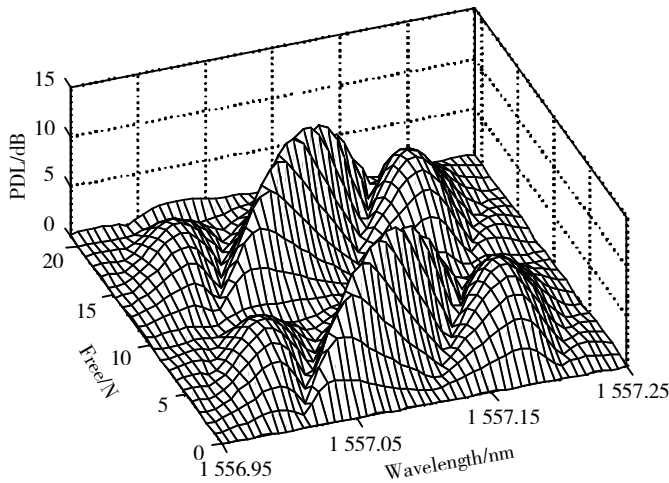


图 3 FBG 局部横向受力时透射信号中的 PDL 光谱  
Fig.3 PDL spectral response of the transmitted light with respect to transverse force

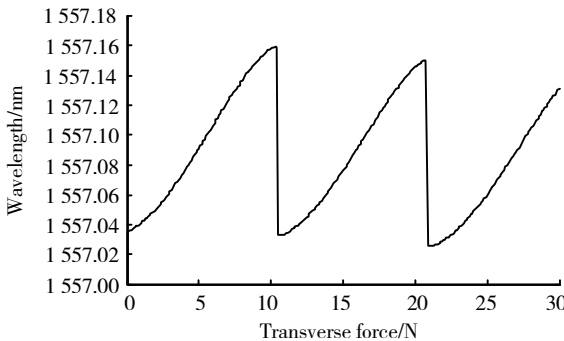


图 4 作用力大小与最大谐振波长的关系  
Fig.4 The peak wavelength of the PDL with respect to transverse force

2.3 光纤受压长度的影响

最后,考虑 FBG 受力长度对 PDL 的影响. FBG 受力长度与透射信号中 PDL 的关系图如图 5 所示.从图 5 可以看到,随着 FBG 受压长度的改变,其 PDL 光谱的基本形状近似相同,呈现出 3 个谐振峰,并且 FBG 受压长度越大, PDL 的最大值呈减小趋势,并且其旁瓣同样逐渐减小.图 6 给出了受压长度与其最大谐振波长的关系,随着 FBG 受压长度的增加,其谐振波长逐渐减小,并且当光栅从极小段受力变化到整个光栅受力时,谐振波长变化量小于 0.04 nm.

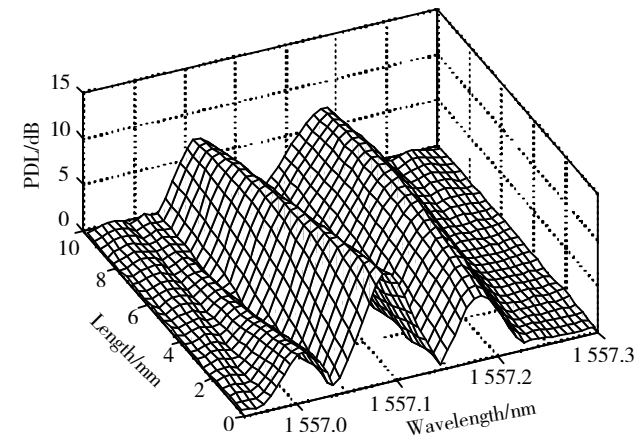


图 5 FBG 局部横向受力时透射信号中的 PDL 光谱  
Fig.5 PDL spectral response of the transmitted light with respect to transverse force

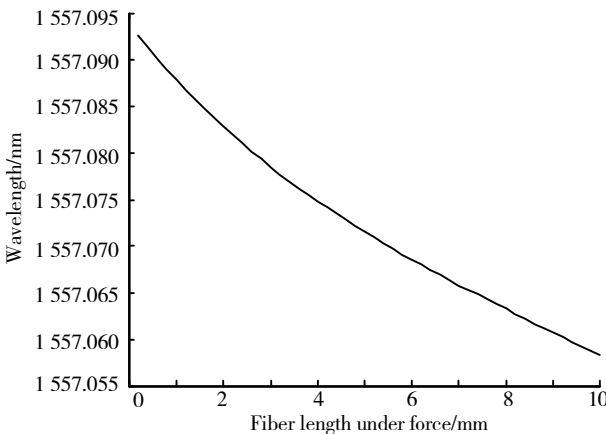


图 6 受压长度与最大谐振波长的关系  
Fig.6 The peak wavelength of the PDL with respect to transverse force position

以上所分析的 FBG 横向受力时透射信号中 PDL 与受力大小、受力位置和受压长度的关系适用于各种横向受力的情况.在实验研究中,可把 2 根直径较小的钢丝垂直放置在光栅上(其中一根放在光栅受力的位置,另一根的作用是使受力装置保持平衡),在钢丝上放 1 个铝板,通过改变铝板上的重物的质量来实现光栅局部受力大小的改变,通过增加受力位置钢丝的根数来改变光栅的受压长度<sup>[13]</sup>.

### 3 结论

本文对均匀 FBG 局部横向受力下的透射信号中的 PDL 光谱特性做了理论的研究,利用传输矩阵法对这些特性进行了分析和仿真.研究表明:当 FBG 局部横向受力时,受力位置越靠近 FBG 的中点,谐振峰的峰值越大,旁瓣越小,PDL 的光谱就越明显;PDL 光谱随受力大小呈周期性变化,在一个周期内,随作用力的增大,最大谐振峰从短波长向长波长漂移;受压长度越长,最大谐振峰的波长就越小.FBG 的这些特性可用于分布式传感器的空间测量或是与其轴向特性相结合,制作三维应变测量传感器.

### 〔参考文献〕

- [1] Rao Y J, Zhu T, Ran Z L, et al. Novel long-period fiber gratings written by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses and applications in optical fiber communication[J]. Optics Communications, 2004, 229: 209-221.
- [2] Byoung-ho Lee. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9: 57-79.
- [3] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection[J]. Electronics Letters, 1992, 28( 3): 236-238.
- [4] Du Weichong, Tao Xiaoming, Tam Hwayaw. Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11( 1): 105-107.
- [5] 彭仕玉, 元秀华, 张国云. 光纤光栅传感器温度与轴向应变灵敏度的研究[J]. 光通信研究, 2003, 116( 2): 46-49.
- [6] Torres P, Valente L C G. Spectral response of locally pressed fiber Bragg grating[J]. Optics Communications, 2002, 208: 285-291.
- [7] Gafsi R, El-Sherif M A. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings[J]. Optical Fiber Technology, 2000, 6: 299-323.
- [8] Botero-Cadavid J F, Causado-Buelvas J D, Torres P. OSA, Spectral properties of locally pressed fiber Bragg gratings written in polarization maintaining fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28( 9): 1 291-1 297.
- [9] 蔡璐璐, 尹闻闻, 吴飞. 均匀光纤 Bragg 光栅局部横向受力特性研究[J]. 物理学报, 2008, 57( 12): 7 737-7 747.
- [10] Wang Yiping, Wang Ming, Huang Xiaoqin. High-sensitivity fiber Bragg grating transverse force sensor based on centroid measurement of polarization-dependent loss[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21( 6): 1-6.
- [11] Eisenberg M A. Introduction to the Mechanics of Solids[M]. Menlo Park: Addison-Wesley, 1980.
- [12] 葛延武, 陆丹, 徐坤, 等. 光栅致双折射引起偏振相关损耗的理论分析[J]. 中国激光, 2008, 35( 7): 1 024-1 029.
- [13] 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, 33( 4): 472-476.

[责任编辑: 顾晓天]