

# 局部横向压力条件下光纤光栅偏振相关损耗谱 次峰研究

苏 洋 周 华 朱 勇 李 建 华

解放军理工大学通信工程学院光电技术教研中心, 江苏 南京 210007

**摘要** 研究了局部压力条件下光纤光栅偏振相关损耗(PDL)的光谱表征。针对次峰现象,详细研究了压力幅度、受压长度和受压位置对次峰产生条件的影响。采用传输矩阵法进行了数值模拟,理论分析和数值仿真显示,受压长度对次峰随压力变化的幅度和波长位移灵敏度有重要影响。在不同的受力长度下,产生次峰需要的受力幅度不同。该研究对利用PDL次峰进行传感具有很好的理论指导意义。

**关键词** 光栅;光纤光栅;传感;局部压力;偏振相关损耗;次峰

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0305001

## Study of Secondary Peak of Polarization Dependent Loss of Locally Pressed Fiber Bragg Grating

Su Yang Zhou Hua Zhu Yong Li Jianhua

Photoelectric Technology Research Center, Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China

**Abstract** The spectral characterization of polarization dependent loss (PDL) of locally pressed fiber Bragg grating is analyzed. Aimed at secondary peak phenomenon, the effects of the load magnitude, loaded length and loaded position of the grating on the amplitude and position of the created secondary peak are investigated in detail. The numerical simulation based on the modified transfer matrix method is carried on. The theoretical analysis and numerical simulation demonstrate that the loaded length has significant effect on the amplitude and sensitivity of wavelength shifting as function of loaded amplitude of the secondary peak. The load amplitude of creating secondary peak changes under the different loaded lengths. These studies have a good theoretical guidance meaning for sensing using secondary peak of PDL.

**Key words** gratings; fiber Bragg grating; sensor; local pressure; polarization dependent loss; secondary peak

**OCIS codes** 050.2770; 280.4788; 260.1440; 260.5430

### 1 引 言

光纤光栅(FBG)是近些年来迅速发展光纤无源器件之一,它具有许多独特的优点,因此在光纤通信和波分复用技术中扮演着十分重要的角色,光纤光栅传感器则是FBG在通信领域之外的另一个重要应用<sup>[1-3]</sup>,已经实现了对多种电量或非电量的测量,如应变、位移、温度、电流、磁场等。利用FBG进行传感,主要集中在利用谱特性对波长位移进行检测方面。

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,对于FBG用于横向压力传感的研究相对较少,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,FBG的反射光谱变化不明显<sup>[4]</sup>,因此不太适合用于横向应力传感。针对这一问题,研究者们提出利用FBG的偏振相关损耗(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

收稿日期: 2014-09-15; 收到修改稿日期: 2014-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(61107074)、江苏省自然科学基金(BK2012508, BK2012509)

作者简介: 苏 洋(1980—),女,博士,副教授,主要从事光传感技术方面的研究。E-mail: qieziyangyang@163.com

敏度,因此该方法具有较大的潜力<sup>[5-6]</sup>。

当光栅处于局部压力之下时,其特性会有所不同。有一些研究已经展开,比如文献[7-8]指出,当受力部分小于 1% 光栅长度时,FBG 频谱将产生分裂,分裂点波长随受力大小而周期性地移动。这些工作表明,在局部压力下,被压部分将会产生一个相移,这样就会在 FBG 的谱中打开一个透射窗口,作用就像相移光栅一样。当相移为  $\pi$  时,透射窗口位于带宽中心,并随压力增加向长波长移动,直至开始下一个周期。

而目前对 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 特性的研究不多。针对这一问题,Wang 等<sup>[9]</sup>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方法。

但是在多个文献中均提到了次峰现象。文献[10]中报道受压长度为 20% 时,在更长波长区域产生了第二峰值。文献[11]中受压长度为光栅长度的 8%,观察到比原始峰值更长的区域出现峰值。文献[12]中提到了在受压区域大于 10% 时,观察到除了主峰之外,在更长的波长上出现了第二个峰值。但是对次峰产生条件以及其幅度和位置与受压长度、受压力大小、受压位置的关系没有详细的研究,基于研究 PDL 的种种潜在优势,FBG 的 PDL 特性也值得深入探讨。因此,本文将对局部压力下受力长度、受力大小以及受力位置对光栅谱以及 PDL 谱的影响进行研究,讨论次峰产生的条件,为利用次峰进行分布式传感打下理论基础。

## 2 理论模型

在仿真中,假设受力方向为  $y$ ,另一方向为  $x$ ,光栅轴向为  $z$ ,如图 1 所示。均匀布拉格光栅总长度为  $L$ ,受力区域长度为  $l$ 。

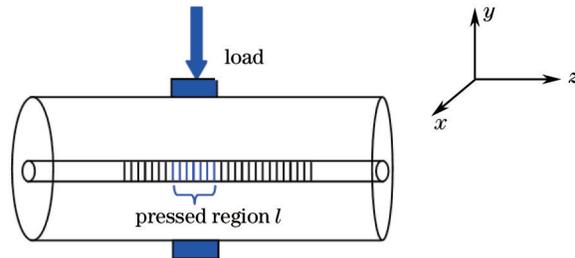


图 1 局部横向压力作用示意图

Fig.1 Schematic diagram of local transverse pressure

当光纤布拉格光栅受到横向均匀分布的压力时,由于光纤的变形导致折射率发生变化,并产生双折射,横截面两个不同方向上的折射率变化会因为光弹系数的不同而有所差异。折射率变化可表示为<sup>[13]</sup>

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

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

式中  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率,  $E$  和  $\nu$  分别是光纤的杨氏模量和泊松系数,  $p_{11}$  和  $p_{12}$  是光弹系数(典型值  $E=74.52 \text{ GPa}$ ,  $\nu=0.17$ ,  $p_{11}=0.121$ ,  $p_{12}=0.270$ ),  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和  $\sigma_z$  分别是  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向上作用于光纤布拉格光栅的应力分量。当光纤布拉格光栅两端固定时,  $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$ ,若光纤布拉格光栅两端为自由端,则  $\sigma_z = 0$ <sup>[14]</sup>,这里只考虑轴向应变为 0 的情况。横向负载作用于光纤时,所受应力可表示为<sup>[14]</sup>

$$\sigma_x = \frac{2F}{\pi DL}, \sigma_y = -\frac{6F}{\pi Dl}, \sigma_z = 0, \quad (3)$$

式中  $D$  为光纤的直径,  $F$  为横向负载,  $l$  为光纤布拉格光栅受力长度。

由于双折射的存在,光纤光栅的复传输系数  $t$ <sup>[15]</sup>就会演变成两个传输系数  $t_x$  和  $t_y$ 。在笛卡尔坐标系中,出射光的琼斯矩阵为

$$\begin{bmatrix} E_{o,x} \\ E_{o,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x & 0 \\ 0 & t_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x E_{i,x} \\ t_y E_{i,y} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$(E_{ix}, E_{iy})^T$  是入射光的琼斯矩阵:

$$\begin{bmatrix} E_{i,x} \\ E_{i,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $\varphi$  为入射光的起偏角。总传输谱为

$$T = \frac{(t_x E_{i,x})^2 + (t_y E_{i,y})^2}{(E_{i,x})^2 + (E_{i,y})^2} = T_x (\cos \varphi)^2 + T_y (\sin \varphi)^2. \quad (6)$$

在局部应力下,将光栅分成  $m$  (足够大)段,每段 FBG 的横向受力情况可看作平面应变,作用在其上的压力可以看成是均匀的。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  $m$  个  $2 \times 2$  阶矩阵相乘来表示整个光栅的传输矩阵。

PDL 的定义是输入信号在所有偏振态下传输功率的最大变化。在 FBG 中,PDL 主要是由于光纤中的双折射产生,本征 PDL 多是由于光纤刻制中激光曝光过程产生。而施加在光栅上的横向压力也会产生双折射,从而引起 PDL 变化。其表达式为

$$X_{\text{PDL}} = 10 \lg \left( \frac{|t_{\max}|^2}{|t_{\min}|^2} \right), \quad (7)$$

式中  $|t_{\max}|^2$  和  $|t_{\min}|^2$  分别表示经过 FBG 的最大、最小传输光功率。在这种情况下,最终的表达式为

$$X_{\text{PDL}} = 10 \left| \lg(T_x/T_y) \right|. \quad (8)$$

### 3 数值仿真和讨论

在仿真中,主要参数有:无压力前的中心波长为 1546.15 nm, FBG 长度  $L=2$  cm,  $n_{\text{eff}}=1.445$ ,起偏角为  $20^\circ$ 。

多篇文献的实验表明,长度超过一定比例后,在长波长区域会出现第二个峰值,第二个峰值对应于压力部分产生的内光栅结构,它的位置与施加力的大小有关。然而在文献[9]中讨论了当  $F=5$  N 时的不同压力长度下的谱特性,可以看到随着透射长度的增加,PDL 谱形没有发生重大改变,其 PDL 光谱的基本形状近似相同,而且不管在什么长度上,都没有出现次峰。因此将重点研究次峰产生的条件。对于足够大的压力致双折射,不管是透射谱还是 PDL 谱,长波长部分主要是由光波中的  $x$  偏振分量决定,因此产生的次峰也是由于  $x$  偏振分量的作用。

#### 3.1 不同受力幅度下受力长度的影响

选取  $F=55$  N 时,不同受力长度下的透射谱和 PDL 谱如图 2 所示,受压位置在中间,观察次峰的波长和幅度谱。在这样的受力幅度下,出现了次峰。因此,次峰的产生需要一定的受压幅度。可以看出,受力长度越短的光栅其次峰波长越长,幅度越小。仿真图中可以观察到,大约在 2 mm 受力长度下(总长的 10%)出现了次峰的波动,波长为 1547 nm 左右。

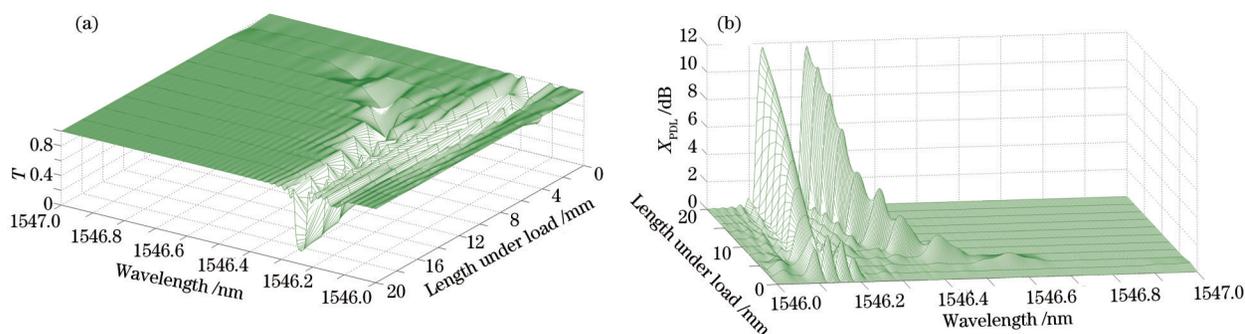


图 2  $F=55$  N 时,不同长度下(a)透射谱和(b)PDL 谱

Fig.2 (a) Transmission spectrum and (b) PDL spectrum under different lengths, when  $F=55$  N

次峰与受力幅度也有关系,在不同受力下其变化趋势也不同,同样对  $F=30$  N 和  $F=80$  N 的情况进行仿真,并对次峰幅度和相应波长进行比较,如图 3 所示,可以观察到几个规律:1)次峰的波长都是随受力长度的

增加向短波长方向移动,移动幅度逐渐放缓;2)同等受力长度下,压力越大,次峰波长向长波长移动;3)次峰的幅度都是随受力长度的增加而逐渐增加的。

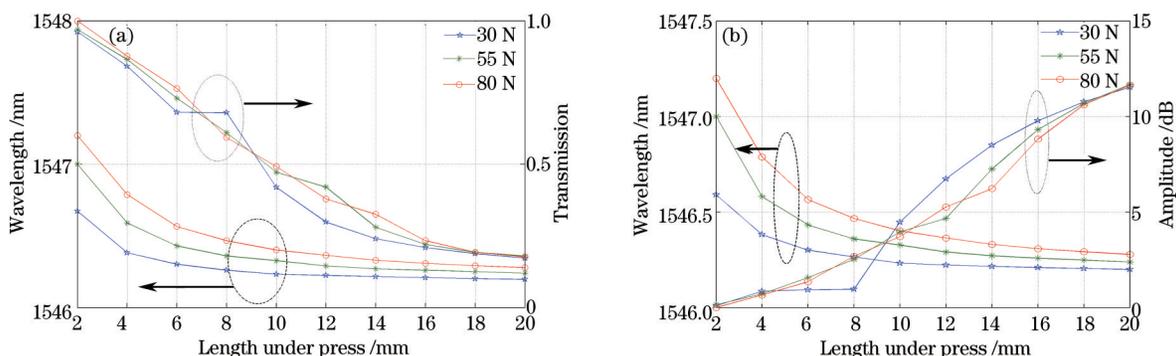


图3 不同作用力下(a)传输谱和(b)PDL谱的次峰最大幅度和波长随施压长度的变化。

Fig.3 Maximum amplitude and wavelength of secondary peak for (a) transmission spectrum and (b) PDL spectrum under different load magnitudes

### 3.2 不同受力长度下受力幅度的影响

图4~7的(a)分别是受压长度为 $L$ ,  $3/5L$ ,  $2/5L$ 和  $1/5L$ 时PDL谱随压力大小的变化特性,这里将受压位置固定在整个光栅的中心位置。只讨论 $x$ 偏振分量对应峰值的变化,在图4~7的(b)中描绘了峰值幅度和对应波长随压力幅度的变化。

图4(a)中, $x$ 偏振峰的变化是幅度值随压力达到饱和值之后,对应的峰值波长随压力向长波长移动,幅度不变。图4(b)描述了 $x$ 偏振分量峰值以及相对应的波长,可以看到PDL峰值幅度随压力线性增加,峰值波长几乎不变,在峰值达到饱和后,其对应波长随压力线性增加,波长位移变化率约为 $1.53 \text{ pm/N}$ 。

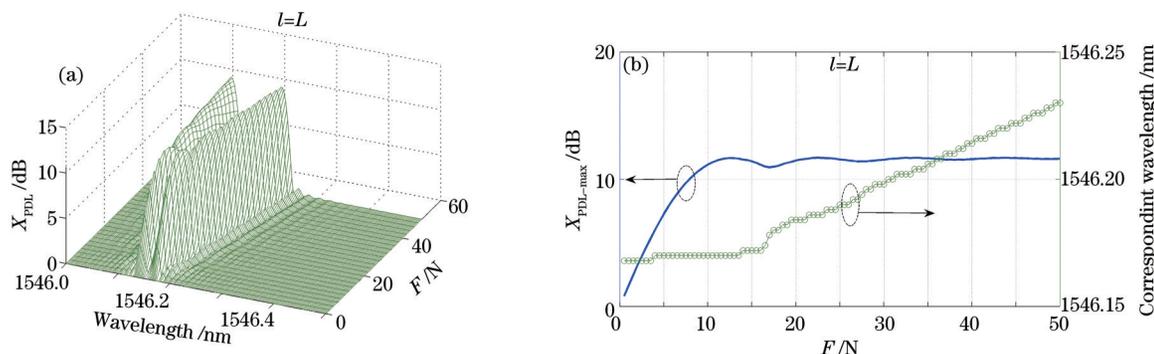


图4  $l=L$ 时,(a)PDL谱特性和(b)峰值幅度和对应波长随施加力变化

Fig.4 (a) PDL spectrum and (b) maximum amplitude and corresponding wavelength change with pressure, when  $l=L$

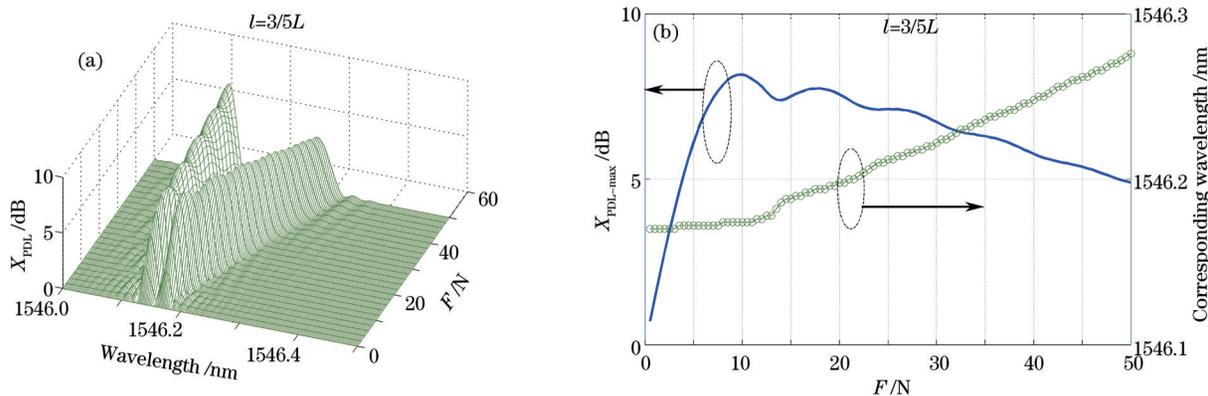


图5  $l=3/5L$ 时,(a)PDL谱特性和(b)峰值幅度和对应波长随施加力变化

Fig.5 (a) PDL spectrum and (b) maximum amplitude and corresponding wavelength change with pressure, when  $l=3/5L$

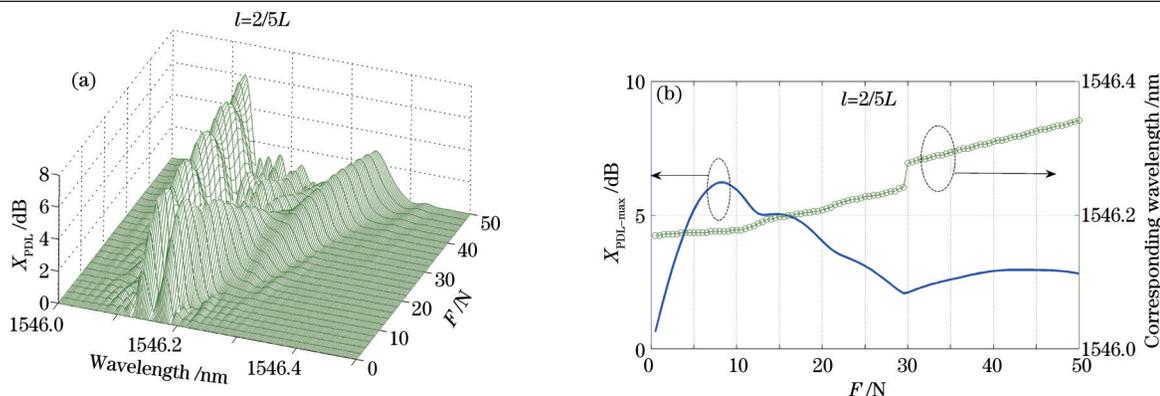


图6  $l=2/5L$ 时, (a)PDL谱特性和(b)峰值幅度和对应波长随施加力变化

Fig.6 (a) PDL spectrum and (b) maximum amplitude and corresponding wavelength change with pressure, when  $l=2/5L$

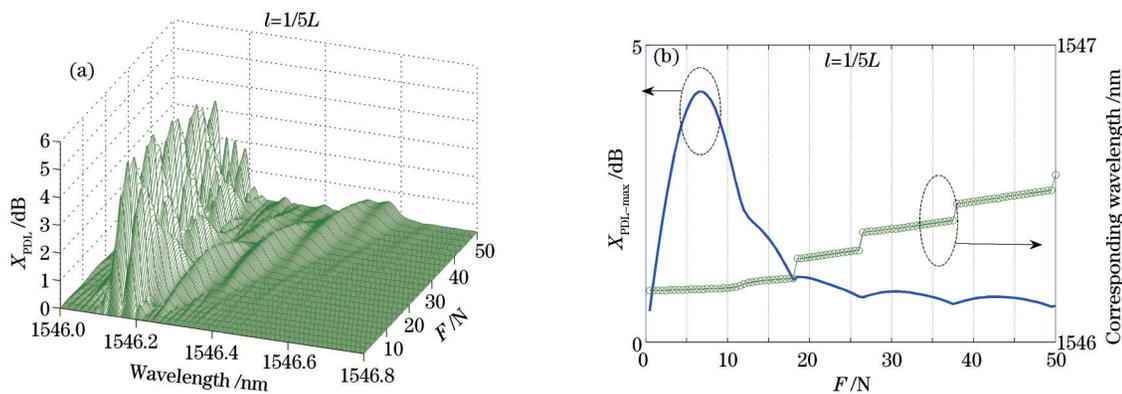


图7  $l=1/5L$ 时, (a)PDL谱特性和(b)峰值幅度和对应波长随施加力变化

Fig.7 (a) PDL spectrum and (b) maximum amplitude and corresponding wavelength change with pressure, when  $l=1/5L$

降低受压长度至  $3/5L$ , 图 5(a) 中观察到幅度值随压力达到最大值之后, 峰值波长随压力向长波长移动, 但幅度逐渐减小。由图 5(b) 可知, PDL 峰值随压力线性增加, 峰值波长也略有增加, 在峰值达到最大后随施加力逐渐降低, 其对应波长则随压力线性增加, 变化率约为  $2.6 \text{ pm/N}$ 。

继续降低受压长度至  $2/5L$ , 图 6(a) 中观察到在  $x$  分量峰值向长波长移动的过程中出现了不连续性, 峰值在线性增加到最大值后逐渐降低, 此波瓣逐渐消失的同时, 在更长波长区域另一波瓣逐渐形成。由图 6(b) 可知, PDL 峰值达到顶峰后下降, 其对应波长则随压力线性增加, 变化率约为  $3.03 \text{ pm/N}$ , 在压力约  $30 \text{ N}$  处, 次峰波瓣幅度反超, 对应波长从  $1546.24 \text{ nm}$  突变为  $1546.28 \text{ nm}$ , 位移量再次随压力呈线性关系, 变化率约为  $3.2 \text{ pm/N}$ , 比前一段略有增加。

最后将受压长度降低至  $1/5L$ , 图 7(a) 中观察到长波长区域逐渐显示出具有一定周期性变化的不连续波动, 这些波动形成了相对于原波长的次峰。比如在  $F=50 \text{ N}$  时, 明显的次峰波长在  $1546.53 \text{ nm}$  左右。由图 7(b) 可知, PDL 峰值达到顶峰后迅速下降, 在  $F=18 \text{ N}$  时峰值对应波长从  $1546.215 \text{ nm}$  跳跃到  $1546.282 \text{ nm}$  (变化  $0.067 \text{ nm}$ ), 波长位移量随压力线性增加, 之后重复这种跳变。在  $F=26 \text{ N}$  时从  $1546.308 \text{ nm}$  跳变到  $1546.37 \text{ nm}$  (变化  $0.062 \text{ nm}$ ), 在  $F=37.5 \text{ N}$  时, 从  $1546.41 \text{ nm}$  跳变到  $1546.466 \text{ nm}$  (变化  $0.056 \text{ nm}$ )。三段线性变化的变化率分别为  $3.47, 3.64, 4 \text{ pm/N}$ 。可以看出波长突变量逐渐减小, 线性区变化率逐渐增加。随着受力长度的降低, 这种变化会越来越频繁, 但幅度也会越来越低, 最终慢慢平复。当受压长度小于  $1\%$  时, 次峰已经微弱到可以忽视了, 而主瓣逐渐集中, 逐渐呈周期性变化, 这与文献[9]记载一致。可见次峰的形成要有一定的受压长度和受压力度。

### 3.3 受压位置的影响

受压长度固定为  $2/5L$ , 即  $8 \text{ mm}$ 。将整个光栅分成 100 段, 研究四种位置情况: A 受压段为  $1\sim 40$ ; B 受压段为  $21\sim 60$ ; C 受压段为  $31\sim 70$ ; D 受压段为  $51\sim 90$ 。按照受力位置与中心位置的距离远近, 从近到远排序依次是: C, D, B, A。情况 A, B, D 的仿真如图 8~10 所示。情况 C 即中心位置如图 6 所示。

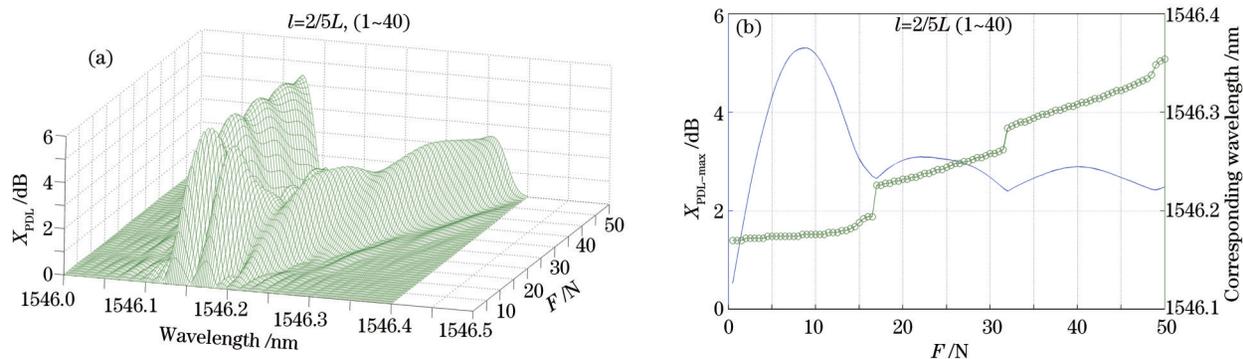


图 8 在位置 A 时, (a)PDL 谱特性和 (b)峰值幅度和对应波长随施加力变化

Fig.8 (a) PDL spectrum and (b) maximum amplitude and corresponding wavelength change with pressure, at position A

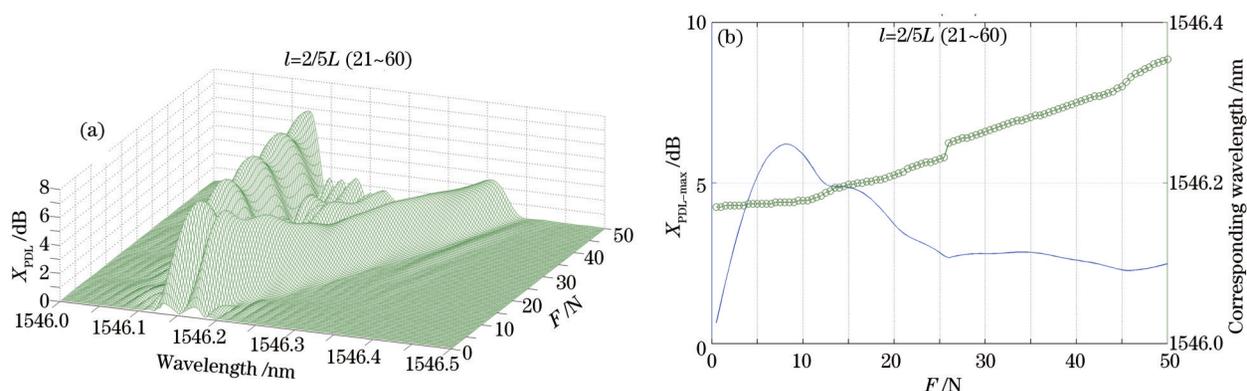


图 9 在位置 B 时, (a)PDL 谱特性和 (b)峰值幅度和对应波长随施加力变化

Fig.9 (a) PDL spectrum and (b) maximum amplitude and corresponding wavelength change with pressure, at position B

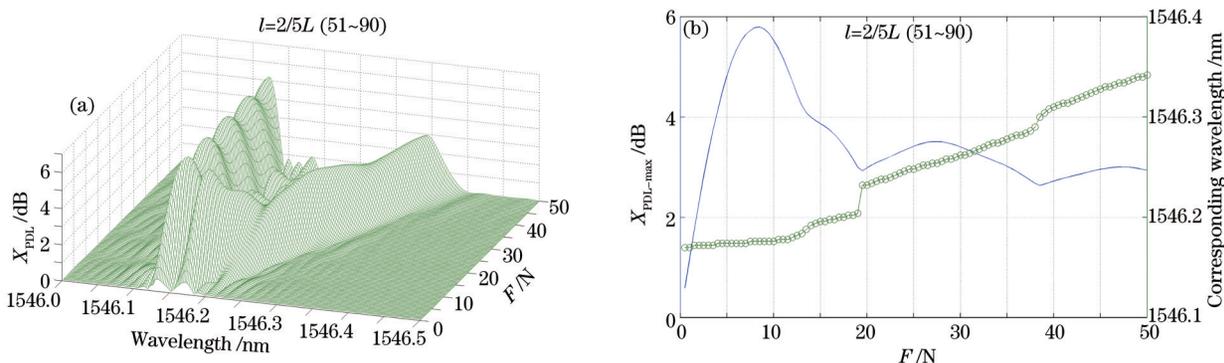


图 10 在位置 D 时, (a)PDL 谱特性和 (b)峰值幅度和对应波长随施加力变化

Fig.10 (a) PDL spectrum and (b) maximum amplitude and corresponding wavelength change with pressure, at position D

可以看到总体波长的走势一致,变化率相差不大,距离中心越远,越早出现波长突变,波长突变也越频繁。而幅度衰减趋势相似,所有的曲线都是先随压力线性增加,到达顶峰后,幅度衰减,然后出现起伏。中心位置的光栅,起伏前的幅度最高。距离中心越远,越早出现幅度波动,波动的也越频繁,这与波长突变规律是一致的。这个仿真的结果表明,施加力位置对次峰峰值波长位移灵敏度影响不大。

## 4 结 论

分析了在局部受力情况下次峰产生的条件,主要讨论了受力幅度、受力长度以及受力位置对次峰的影响。研究表明,产生明显的次峰需要合适的受力长度和受力幅度。在不同的受力长度下,产生次峰需要的受力幅度不同,并且受力长度影响次峰的幅度和波长位移灵敏度。而受力位置对次峰的波长位移走向影响

不大。该研究对利用次峰的峰值和波长进行局部压力传感具有新的借鉴意义。

## 参 考 文 献

- 1 Tian Shizhu, Cao Changcheng, Wang Dapeng. Experimental study on fiber grating sensor monitoring the crack of concrete [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0114001.  
田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土简支梁裂缝的实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0114001.
- 2 Liu Hongyue, Liang Dakai, Han Xiaolin. Long-period fiber grating transverse load effect-based sensors for rebar corrosion in concrete [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0406003.  
刘宏月, 梁大开, 韩晓林. 基于长周期光纤光栅横向负载特性的混凝土结构钢筋锈蚀监测[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0406003.
- 3 Zhang Guihua, Chai Jing, Li Xujuan, *et al.*. Research on strain transfer of surface fiber grating sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 010601.  
张桂花, 柴敬, 李旭娟, 等. 基片式光纤光栅应变传感器的应变传递研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 010601.
- 4 R B Wagreich, W A Altia, H Singh, *et al.*. Effects of diametric load on fibre Bragg gratings in low birefringence fibre [J]. Electron Lett, 1996, 32(13): 1223-1224.
- 5 C Caucheteur, S Bette, R Garcia-Olcina, *et al.*. Transverse strain measurements using the birefringence effect in fiber Bragg gratings [J]. IEEE Photonic Tech Lett, 2007, 19(13): 966-968.
- 6 C Caucheteur, S Bette, R Garcia-Olcina, *et al.*. Influence of the grating parameters on the polarization properties of fiber Bragg gratings [J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(8): 1000-1010.
- 7 Cai Lulu, Yin Wenwen, Wu Fei. Study of fiber Bragg grating characteristics under local transverse force [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(12): 7737-7746.  
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): 7737-7746.
- 8 C J S de Matos, P Torres, L C G Valente, *et al.*. Fiber Bragg grating (FBG) characterization and shaping by local pressure [J]. J Lightwave Technol, 2001, 19(8): 1206.
- 9 Y Wang, M Wang, X Huang. Spectral characterization of polarization dependent loss of locally pressed fiber Bragg grating [J]. Opt Express, 2011, 19(25): 25535.
- 10 B Ortega, J L Cruz, J Capmany, *et al.*. Analysis of a microwave time delay line based on a perturbed uniform fiber Bragg grating operating at constant wavelength [J]. J Lightwave Technol, 2000, 18(3): 430-436.
- 11 N Roussel, S Magne, C Martinez, *et al.*. Measurement of index modulation along fiber Bragg gratings by side scattering and local heating techniques [J]. Opt Fiber Technol, 1999, 5(1): 119-132.
- 12 P Torres, L C G Valente. Spectral response of locally pressed fiber Bragg grating [J]. Opt Commun, 2002, 208(4): 285-291.
- 13 R Gafsi, M A E Sherif. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings [J]. Opt Fiber Technol, 2000, 6(3): 299-323.
- 14 R J Espejo, S D Dyer. Transverse-stress fiber Bragg grating sensor with high spatial resolution and temperature stability [J]. J Lightwave Technol, 2007, 25(7): 1777-1785.
- 15 T Erdogan. Fiber grating spectra[J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1277-1294.

栏目编辑: 苏 岑