

# 长周期光纤光栅谐振波长的横向负载特性分析

曾祥楷<sup>1</sup> 饶云江<sup>2</sup> 梁 快<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 重庆理工大学汽车零部件制造及检测技术教育部重点实验室, 重庆 400050

<sup>2</sup> 重庆大学光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044

<sup>3</sup> 重庆理工大学电子信息与自动化学院, 重庆 400050

**摘要** 在考虑波导效应、弹光效应等因素后,详细地理论分析了长周期光纤光栅(LPFG)的横向负载传感特性,包括谐振波长漂移及谐振峰分化后的双峰间距与横向负载、光偏振的关系,模拟计算了单模光纤长周期光栅的横向负载传感特性。理论分析和计算结果表明,长周期光纤光栅谐振波长随横向负载的漂移量和方向与光源的偏振方向有关,加载方向偏振光的谐振波长向短波长漂移,加载正交方向偏振光的谐振波长向长波长漂移,后者的漂移量为前者的 2 倍以上。横向负载产生的双折射使谐振峰分化为两个子峰,两子峰谐振波长及其间距与横向负载成线性关系,可用于横向负载的高灵敏绝对测量。该结论与已有的长周期光纤光栅横向负载实验结果一致。

**关键词** 光纤器件;长周期光纤光栅;横向负载;谐振波长;传感特性

中图分类号 TN253; TN201

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201131.0106002

## Characteristic Analysis of LPFG Resonance Wavelength Shift Owing to Transverse Load

Zeng Xiangkai<sup>1</sup> Rao Yunjiang<sup>2</sup> Liang Kuai<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Manufacture and Test Techniques for Automobile Parts, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

<sup>3</sup> School of Electronic Information and Automation, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China

**Abstract** The sensing characteristics of long-period fiber grating (LPFG) resonance wavelength shift owing to transverse load are theoretically analyzed, by considering influential factors such as strain-optic effect and the change of wave guide structure. The characteristics include the resonant wavelength shift and the interval between two resonant sub-peaks (namely transmission sub-pits) split in LPFG spectrum. According to the analytical properties, the sensitivity coefficients of the resonant wavelength shifts and the sub-peak wavelength interval, which are due to transverse load for a long-period fiber grating in single-mode fiber, are numerically calculated. The simulation results show that the shift directions and sensitivity coefficients of resonant wavelengths are dependent on the polarizations of light source. The resonant wavelength of linear polarization source in the direction of forcing transverse load shifts to shorter wavelength (blue shift), and the resonant wavelength corresponding to the polarization in the orthogonal direction of forcing shifts to longer wavelength (red-shift). The shift ratio of resonant wavelength to longer wavelength is over 2 times larger than that to shorter wavelength. The birefringence caused by transverse load splits the resonant peak (transmission pit) into two resonant sub-peaks in LPFG spectrum. The sub-peak shifts and the interval between two resonant sub-peaks are well linear with the transverse load, which can be used for highly sensitive measurement or absolute measurement of transverse load. These conclusions are in good agreement with the published results of the transverse load experiments.

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-06-21

作者简介: 曾祥楷(1965—),男,博士,教授,主要从事光纤传感与通信、光信息获取等方面的研究。

E-mail: zxkai@cqut.edu.cn

**Key words** optical fiber device; long-period fiber grating; transverse load; resonance wavelength; sensing characteristics

**OCIS codes** 060.2340; 050.2770; 060.2270; 120.5475

# 1 引 言

近 20 年来,人们对布拉格(Bragg)光纤光栅(FBG)和长周期光纤光栅(LPFG)<sup>[1,2]</sup>的传感特性进行了广泛的研究。光纤光栅传感特性研究主要是谐振波长特性的传感实验和理论分析。人们研究了 FBG 和 LPFG 的温度、轴向应变、弯曲、压力、电流和外界折射率等传感特性<sup>[3~6]</sup>。在横向负载特性的实验和理论方面,R. B. Wagleich 等<sup>[7]</sup>于 1996 年用低双折射光纤上的 FBG 进行了横向负载传感实验,其灵敏度为 3.26 pm/N,当负载大于 40 N 时出现双折射分化子峰;Gafsi 等<sup>[8]</sup>于 2000 年对 FBG 的横向负载传感特性进行了详细的理论分析,其理论分析符合 R. B. Wagleich 等<sup>[7]</sup>的实验结果,并能很好地解释 FBG 反射峰的子峰分化现象。1999 年 Y. Liu 等<sup>[9]</sup>用 B/Ge 共掺的 LPFG 进行了横向负载传感实验,其灵敏度为 500 nm/(kg·mm),比 FBG 的灵敏度高 800 倍。近年来,国内也开展了长周期和 Bragg 光纤光栅横向负载传感方面的一些实验研究<sup>[10~13]</sup>。

在长周期光纤光栅横向负载传感特性的理论分析方面还未见详细的公开报道。本文在考虑横向负载导致的波导效应、弹光效应及色散等因素后,对长

周期光纤光栅的横向负载传感特性进行了详细的理论分析。该理论分析与现有的 LPFG 横向负载传感实验结果一致,可解释长周期光纤光栅横向负载传感实验中的高灵敏性、偏振相关性和谐振峰分化为子峰等现象。

# 2 LPFG 横向负载的谐振波长特性

根据耦合模理论,低双折射光纤上长周期光纤光栅的谐振波长  $\lambda_s$  为

$$\lambda_s = \Lambda(n_0 - n_s), \quad (1)$$

式中  $n_0$  为光纤芯导模的有效折射率,  $n_s$  为光纤包层  $s$  阶导模的有效折射率,  $\Lambda$  为长周期光纤光栅周期。

在光纤的 LPFG 区域施加横向负载时,横向负载将改变 LPFG 的光栅周期、纤芯和包层材料的折射率,导致纤芯与包层导模的有效折射率差及光栅周期分别变化  $\Delta(n_0 - n_s)$  和  $\Delta\Lambda$ , 则 LPFG 谐振波长的漂移量  $\Delta\lambda_s$  为

$$\Delta\lambda_s = \Lambda\Delta(n_0 - n_s) + (n_0 - n_s)\Delta\Lambda, \quad (2)$$

同时,横向负载使受载区域的光纤横截面由圆形变为椭圆形,椭圆的长短轴不等,且椭圆长短轴方向的折射率也不同,如图 1 所示。椭圆长短轴方向的折射率及半径的不同将产生双折射现象。

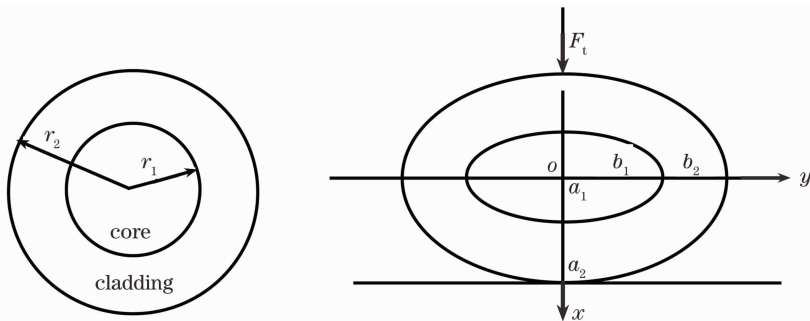


图 1 受横向负载前后光纤横截面的变化

Fig. 1 Change of cross section of LPFG fiber due to transverse load

设对 LPFG 施加横向负载  $F_t$  前的纤芯和包层半径分别为  $r_1$  和  $r_2$ , 折射率横截面为阶跃式分布, 纤芯和包层材料的折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$ ,  $x$  为横向负载的作用方向(即短轴),  $y$  为变形后的长轴方向,  $z$  为光纤纤心轴线;在  $x$  方向施加横向负载后,  $x$  方向将产生压应力,其纤芯和包层半径分别减至  $a_1$  和  $a_2$ ;  $y$  方向将产生拉应力,纤芯和包层半径分别增至  $b_1$  和  $b_2$ 。纤芯导模和包层  $s$  阶导模的有效折射率由

对应模式的色散特征方程求得。

设横向负载  $F_t$  均匀作用在光纤包层表面的  $x$  方向,并产生应力  $\sigma_x$ 。在光纤弹性范围内,应力与所施加的横向负载成正比,方向相同。由虎克定理知  $x$  方向的应变  $\epsilon_x = \sigma_x/E$ ,  $E$  为材料的弹性模量,故用  $x$  方向的应变  $\epsilon_x$  表示所施加的横向负载。 $x, y, z$  方向的主应变张量  $[\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z]^T = \epsilon_x [1, -\nu, -\nu]^T$ , 式中  $\nu$  为光纤材料的泊松比,  $T$  表示矩阵转置。纤

芯和包层材料的组成相近,其弹性张量近似相同且各向同性。应变导致的  $x, y, z$  方向介电不渗透性张量的变化量  $[\Delta\gamma_x, \Delta\gamma_y, \Delta\gamma_z]^T$  为光纤材料弹性张量矩阵与主应变张量之积,则

$$\begin{bmatrix} \Delta\gamma_x \\ \Delta\gamma_y \\ \Delta\gamma_z \end{bmatrix} = \epsilon_x \begin{bmatrix} p_{11} - 2\nu p_{12} \\ p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12}) \\ p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12}) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $p_{11}$  和  $p_{12}$  为光纤材料的光弹张量。由上述分析和(3)式可知,横向负载使不同方向上的弹光效应及波导效应不同。

## 2.1 $x$ 方向线偏振光的谐振波长漂移

设光纤中传播的是  $x$  方向线偏振光,用下标  $x$  表示其对应各参量。

由(3)式和弹光效应<sup>[14,15]</sup>知,在  $x$  方向应变的作用下,弹光效应导致纤芯和包层材料在  $x$  方向的折射率变化量  $\Delta n_1$  和  $\Delta n_2$  分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta n_1 &= -\frac{n_1^3}{2} (p_{11} - 2\nu p_{12}) \epsilon_x \\ \Delta n_2 &= -\frac{n_2^3}{2} (p_{11} - 2\nu p_{12}) \epsilon_x \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

根据(4)式并考虑色散、波导效应和包层折射率等因素后,在  $x$  方向应变作用下, $x$  方向纤芯导模与包层  $s$  阶导模的有效折射率差的变化量  $\Delta(n_0 - n_s)_x$  为

$$\Delta(n_0 - n_s)_x = \frac{\partial(n_0 - n_s)}{\partial\lambda} \Delta\lambda_{sx} + \epsilon_x (r_1 k_{1w} - r_2 k_{2w}) - p_{Lx} \epsilon_x (k_{10} n_1^3 - k_{20} n_2^3 + k_{12} n_2^3), \quad (5)$$

式中  $p_{Lx} = (p_{11} - 2\nu p_{12})/2$ ;  $\Delta\lambda_{sx}$  是谐振波长的漂移量,与  $x$  方向线偏振光的包层模式有关; $\lambda$  是光波长,  $k_{1w}$  为纤芯波导效应系数,  $k_{2w}$  为包层波导效应系数,  $k_{10}$  为纤芯折射率对纤芯导模有效折射率的传递系

数,  $k_{20}$  为包层折射率对包层导模有效折射率的系数,  $k_{12}$  为包层折射率对纤芯导模有效折射率的影响系数。

(5)式中第一项是波长漂移的色散影响项,第二项是波导效应项,第三项是弹光效应和包层折射率的影响项。对弱导单模光纤而言,包层波导效应系数  $k_{2w}$  的求解需用包层导模的特征方程通过数值方法计算得到;用 Gauss 场分布化简纤芯导模的本征方程,可得纤芯导模有效折射率  $n_0$  与纤芯折射率  $n_1$ 、半径  $r_1$  和包层折射率  $n_2$  的近似关系式<sup>[16]</sup>,再对纤芯折射率、半径和包层折射率求导可得传递系数  $k_{10}$ 、波导效应系数  $k_{1w}$  和  $k_{12}$  的解析式:

$$\begin{aligned} k_{10} &= \frac{n_1}{n_0} \left\{ 1 - \frac{(1 + \sqrt{2})^2 [1 + 4(4 + V^4)^{-3/4}]}{[1 + (4 + V^4)^{1/4}]^3} \right\}, \\ k_{1w} &= \frac{(1 + \sqrt{2})^2 V^4 (n_1^2 - n_2^2)}{r_1 n_0 (4 + V^4)^{3/4} [1 + (4 + V^4)^{1/4}]^3}, \\ k_{12} &= \frac{(1 + \sqrt{2})^2 n_2 [4 + (4 + V^4)^{3/4}]}{n_0 (4 + V^4)^{3/4} [1 + (4 + V^4)^{1/4}]^3}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $V = \frac{2\pi r_1}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$  为光纤的归一化频率。

横向负载导致的光栅周期的变化量  $\Delta\Lambda$  为

$$\Delta\Lambda = -\Delta\nu \epsilon_x, \quad (7)$$

施加横向负载之后,光纤光栅折射率微扰部分的  $x$  方向幅值  $n'_{ax}$  为

$$n'_{ax} = n_a \left[ 1 - \frac{3}{2} n_0^2 (p_{11} - 2\nu p_{12}) \epsilon_x \right], \quad (8)$$

式中  $n_a$  为横向负载前的光纤光栅折射率微扰幅值。

由(2),(5),(7)和(8)式可得 LPFG 中  $x$  方向线偏振光的谐振波长漂移量  $\Delta\lambda_{sx}$  为

$$\Delta\lambda_{sx} = \epsilon_x \Delta k_s \left[ -\nu + \frac{r_1 k_{1w} - r_2 k_{2w} - p_{Lx} (k_{10} n_1^3 - k_{20} n_2^3 + k_{12} n_2^3 + k_{La} n_a n_0^2)}{n_0 - n_s} \right], \quad (9)$$

式中  $k_{La} = 3b/\Lambda$ ,  $b$  为光栅曝光宽度;  $k_s = \partial\lambda_s/\partial\Lambda = (n_0 - n_s)/[1 - \Lambda\partial(n_0 - n_s)/\partial\Lambda]$  是 LPFG 谐振波长随光栅周期的变化率,其大小和正负与耦合的包层模式有关。

## 2.2 $y$ 方向线偏振光的谐振波长漂移

与负载方向正交的  $y$  方向线偏振光在长周期光纤光栅中传播时,其谐振波长漂移的分析过程和  $x$  方向的分析相似。设光纤中传播的是  $y$  方向线偏振光,用下标  $y$  表示  $y$  方向对应的各参量。

当横向负载在  $x$  方向产生应变  $\epsilon_x$  时,考虑色散,弹光效应,波导效应,包层折射率与纤芯导模折

射率等因素后, $y$  方向纤芯导模与包层  $s$  阶模的有效折射率差的变化量为

$$\begin{aligned} \Delta(n_0 - n_s)_y &= \frac{\partial(n_0 - n_s)}{\partial\lambda} \Delta\lambda_{sy} - \\ &\nu \epsilon_x (r_1 k_{1w} - r_2 k_{2w}) - p_{Ly} \epsilon_x (k_{10} n_1^3 - k_{20} n_2^3 + k_{12} n_2^3), \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $p_{Ly} = [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]/2$ , 是弹性张量的应变关联系数;  $\Delta\lambda_{sy}$  为横向负载产生的  $y$  方向线偏振光的谐振波长漂移量,与耦合的包层模式相关。

再考虑折射率微扰的波动因素后, $y$  方向线偏振光的谐振波长漂移量  $\Delta\lambda_{sy}$  为

$$\Delta\lambda_{sy} = \epsilon_x \Delta k_s \left[ -\nu + \frac{\nu(r_2 k_{2w} - r_1 k_{1w}) - p_{Ly}(k_{10} n_1^3 - k_{20} n_2^3 + k_{12} n_2^3 + k_{La} n_a n_0^2)}{n_0 - n_s} \right], \quad (11)$$

(11)式表明横向负载使长周期光纤光栅中  $y$  向线偏振光与  $x$  向线偏振光的谐振波长漂移是不同的。

### 2.3 $x$ 和 $y$ 方向偏振光谐振子峰的分化

比较(9)式和(11)式知, $x$ 方向和 $y$ 方向偏振光谐振波长的横向负载灵敏度系数是不同的。对于采用单模光纤制作的长周期光纤光栅,约9~10阶以下包层模的谐振波长随光栅周期的变化率 $k_s > 0$ 。光纤芯的波导效应大于包层的波导效应,且施加横向负载时 $\epsilon_x < 0$ ,故 $y$ 方向线偏振光的谐振波长向长波方向漂移(红移),且漂移率较大; $x$ 方向线偏振光谐振波长的漂移率较 $y$ 方向的小,其漂移方向还取决于波导效应与弹光效应的相对大小。若波导效应大于弹光效应,横向负载将使 $x$ 方向偏振光的谐

振波长向短波方向漂移(蓝移)。

任何偏振方向的光都可分解到 $x, y$ 两正交方向上。除用于偏振耦合的超长周期光纤光栅外,长周期光纤光栅中正交偏振光间难于产生耦合。若输入光源是在时间和偏振方向上等概率分布的随机光源,则该随机光源可认为在 $x, y$ 两正交方向上提供了功率相同的线光源。因此,横向负载使长周期光纤光栅中 $x, y$ 两方向谐振波长的漂移率和方向都不同,将致使无横向负载时的单个谐振峰分化为两个谐振子峰,其中一个子峰对应于 $x$ 方向线偏振光,另一个子峰对应于 $y$ 方向线偏振光。由(9)式和(11)式相减可得LPFG谐振峰分化后的两子峰波长间隔 $|\Delta\lambda_{sxy}|$ 为

$$|\Delta\lambda_{sxy}| = \left| \frac{\epsilon_x(1+\nu)\Delta k_s}{n_0 - n_s} [r_2 k_{2w} - r_1 k_{1w} - p_{xy}(k_{10} n_1^3 - k_{20} n_2^3 + k_{12} n_2^3 + k_{La} n_a n_0^2)] \right|. \quad (12)$$

式中 $p_{xy} = (p_{12} - p_{11})/2$ 。(12)式中的各参数是由光纤材料和结构决定的。这说明作为横向负载传感器的长周期光纤光栅在制作完毕并安装后,其谐振峰分化子峰的波长间隔与所施加的横向负载绝对值间有良好的线性关系。

## 3 分析讨论

从(9),(11)和(12)式知,当光纤及其上光栅的材料和结构确定后,偏振光谐振波长的漂移量或分化谐振子峰的间距与所加横向负载成线性关系。(9)式和(11)式分别是横向负载导致的负载方向及其正交方向偏振光的LPFG谐振波长漂移量。这两式说明 $x$ 及 $y$ 方向偏振光谐振波长的漂移由负载及其方向(压/拉)、光纤材料及其结构、光栅参数及其包层耦合模式等决定,不同偏振方向光有不同的谐振波长,有不同的漂移率(灵敏度)和方向。这就是长周期光纤光栅横向负载的偏振相关性。该两式右边的分母 $(n_0 - n_s)$ 很小,约 $10^{-3}$ 量级,放大了波导效应和弹光效应的作用,使LPFG的横向负载灵敏度比FBG的高得多。另外,一般光纤芯的波导效应大于包层的波导效应, $r_1 k_{1w} - r_2 k_{2w} > 0$ 。这样,(11)式中的弹光效应、波导效应及光栅周期变化对谐振波长漂移的作用是同符号的,即 $y$ 方向偏振光的谐振波长有较大的漂移率或灵敏度;而(9)式中的

波导效应与弹光效应、光栅周期变化对谐振波长漂移的作用是相反的,这降低了 $x$ 方向线偏振光谐振波长的灵敏度。所以加载方向偏振光谐振波长的灵敏度小于其正交方向偏振光的灵敏度。

从(12)式知,LPFG谐振峰分化后的子峰波长间隔与横向负载成正比,可用来进行横向负载的高灵敏绝对测量,对应的横向负载灵敏度主要取决于波导效应和弹光效应,而非光栅周期的变化。在LPFG谐振子峰波长间隔式中,因分母 $(n_0 - n_s)$ 很小,波导效应和弹光效应被放大了 $1/(n_0 - n_s)$ 倍,横向负载的灵敏度系数也较大。因此,分化谐振子峰间距对横向负载的灵敏度更高,同时可减小温度变化的影响,干扰因素较少,线性度更佳,更适于横向负载的高灵敏绝对测量。

## 4 仿真计算与对比

设在单模光纤上制作长周期光纤光栅,其光纤材料及结构参数是:材料为纯熔融石英及其掺杂, $p_{11} = 0.121$ , $p_{12} = 0.27$ , $\nu = 0.17$ ,纤芯半径 $r_1 = 4.5 \mu\text{m}$ ,纤芯折射率 $n_1 = 1.4648$ ,包层半径 $r_2 = 62.5 \mu\text{m}$ ,包层折射率 $n_2 = 1.4587$ ;长周期光纤光栅的参数为:光栅周期 $\Lambda = 490 \mu\text{m}$ ,折射率微扰幅值 $n_a = 4 \times 10^{-4}$ ,光栅曝光宽度为周期的一半。根据上述参数,用光纤三层结构模型的特征方程可计算得到

光纤芯基模 LP<sub>01</sub> 的有效折射率  $n_0 = 1.461751$ , 包层导模序号为 5 的包层模有效折射率  $n_s = 1.458659$ , 及系数  $k_{20} = 1$ 、波导效应系数  $k_{2w} = 2.99 \times 10^{-6} / \mu\text{m}$ , 长周期光纤光栅的耦合中心波长为 1515.08 nm; 根据 2 节公式和上述参数计算的相关系数为:  $k_s = 0.003092$ ,  $p_{Lx} = 0.0146$ ,  $p_{Ly} = 0.101765$ ,  $p_{xy} = 0.0745$ ,  $k_{1w} = 8.25147 \times 10^{-4} / \mu\text{m}$ ,  $k_{10} = 0.83429422$ ,  $k_{12} = 0.16885$ ,  $k_{1a} = 1.5$ 。把上述参数和计算的系数代入(9),(11)和(12)式, 可得  $x$  和  $y$  方向偏振光谐振波长的漂移量对于  $x$  方向横向负载应变的灵敏度系数分别为  $\Delta\lambda_{sx} / \epsilon_x = 1.15795 \text{ pm} / \mu\epsilon$ ,  $\Delta\lambda_{sy} / \epsilon_x = -2.72858 \text{ pm} / \mu\epsilon$ , 谐振峰分化子峰间距对横向负载应变的灵敏度系数为  $|\Delta\lambda_{sxy} / \epsilon_x| = 3.88653 \text{ pm} / \mu\epsilon$ 。从所计算出的 3 个灵敏度系数知, 当横向负载从  $x$  方向施加到光纤表面上时, 光纤光栅是受压,  $\epsilon_x$  为负值,  $x$  方向偏振光谐振波长的漂移  $\Delta\lambda_{sx}$  也为负值, 表明它向短波长漂移(蓝移);  $y$  向偏振光谐振波长的漂移量  $\Delta\lambda_{sy}$  为正值, 表明它向长波长漂移(红移), 其随负载的漂移速率是  $x$  方向偏振光谐振波长漂移速率的 2.356 倍,  $x$  和  $y$  向偏振光谐振波长的漂移方向相反。所计算的谐振波长漂移方向和漂移量(或灵敏度)随横向负载代表量(即  $x$  向应变)的关系如图 2 所示。若在上述相同光纤上制作布拉格光纤光栅(FBG), 用该布拉格光纤光栅传感横向负载, 用上述参数理论计算出的 LPFG 横向负载灵敏度是该 FBG 横向负载灵敏度的 27 倍以上。这说明长周期光纤光栅的横向负载灵敏度远大于相同光纤上短周期光纤光栅的灵敏度。

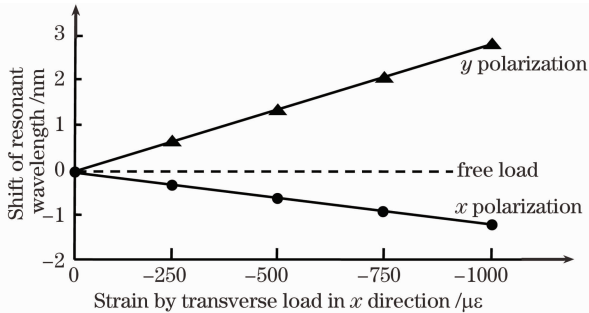


图 2  $x$  和  $y$  方向偏振光谐振波长的漂移方向

Fig. 2 Shift direction of LPFG resonance wavelength in different polarizations

图 3 是一单模光纤上长周期光栅的横向负载光谱曲线, 其中短波长方向的谐振子峰应对于加载方向线光源, 长波长方向的谐振子峰应对于加载正交方向线光源<sup>[9]</sup>。产生该光谱的 LPFG 是基于 B/Ge 共掺单模光纤、周期为  $490 \mu\text{m}$ 、长度为 3 cm 的

LPFG, 耦合纤芯基模到 LP<sub>05</sub> 包层导模。该长周期光纤光栅的参数与上述理论计算例中 LPFG 的参数基本一致。当光源是随机偏振光时, 无横向负载的谐振带是单耦合峰(如虚线所示); 在 LPFG 段 5 cm 长的光纤上施加 4 kg 负载时的谐振峰分化为两个谐振子峰, 其中一个子峰向短波长方向漂移, 另一子峰向长波长方向漂移。当光源是  $x$  加载方向的线光源时, 谐振峰蓝移; 当光源是加载正交  $y$  方向的线光源时, 谐振峰红移, 其红移量约为加载方向光蓝移量的 2.2 倍; LPFG 谐振波长的横向负载灵敏度远大于短周期光纤光栅灵敏度(具体值与光纤材料及结构有关)。

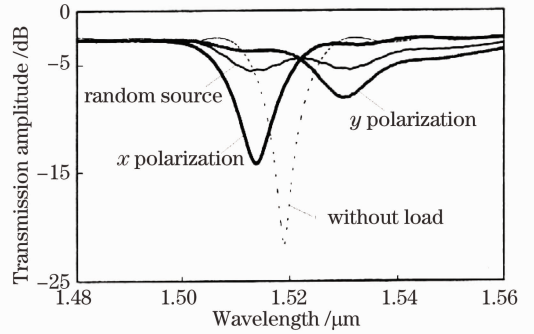


图 3 横向负载导致的谐振峰分化现象

Fig. 3 Splitting of LPFG resonance peak (or pit) owing to transverse load

在图 2, 3 中, 比较谐振波长分裂度、漂移大小及方向的实际值与理论计算值知, LPFG 横向负载特性的理论结果与用紫外光振幅掩模法制作的单模光纤 LPFG 的横向负载特性实验结果是一致的。即横向负载使 LPFG 的谐振峰分化为两个谐振子峰, 其中一子峰向短波长方向漂移(蓝移)且其灵敏度较小; 另一子峰向长波长方向漂移(红移), 且其灵敏度较高, 约为蓝移方向灵敏度的 2 倍以上, 其横向负载灵敏度远大于短周期光纤光栅的灵敏度。

在用高频 CO<sub>2</sub> 激光器逐点写入法制作的长周期光纤光栅进行横向负载实验<sup>[12,13]</sup>时, 其偏振相关性与上述理论计算结论也是一致的。该 LPFG 是用高频 CO<sub>2</sub> 激光器在 Corning SMF-28 单模光纤上制作的, 周期为  $440 \mu\text{m}$ , 谐振波长为 1528.5 nm。对该 LPFG 施加 85 g/mm 的横向负载时, “红移”方向的谐振峰向长波方向漂移了约 3.4 nm, “蓝移”方向的谐振峰向短波方向漂移了约 0.6 nm, 两者的漂移方向相反, “红移”方向的灵敏度约为“蓝移”方向灵敏度的 5 倍; 横向负载的灵敏度是 FBG 横向负载灵敏度的数十倍。这与前述仿真及对比说明例中单

模光纤上 LPFG 横向负载偏振相关性的理论计算结论是基本一致的,只是对应两正交方向的“蓝移”和“红移”方向的灵敏度差异更大。该差异更大的原因是高频 CO<sub>2</sub> 激光器写入的 LPFG 在横截面上的折射率变化是不均匀的,这种不均匀性加大了横向负载偏振相关性的差异。

横向负载实验的加载是通过平板与光纤包层圆柱表面的一个微小接触面或线来施加的,而不是在  $x$  方向均匀施加到光纤圆柱表面上的,这样光纤横截面内的应力或应变分布是非均匀的。同时,实际中常用单位长度上的负载来表征横向负载量的大小,它与  $x$  向的应变代表量相对应,但在量值及其分布均匀性上不相同。为简化分析过程,已设横向负载在  $x$  方向均匀作用于光纤表面并产生应力/应变。这会带来一定的分析计算误差,但不影响本文理论分析的基本结论。

## 5 结 论

由上述分析讨论和计算对比,可得以下结论: LPFG 横向负载的灵敏度与光源的偏振态有关,不同偏振方向光的谐振波长漂移率及方向是不同的;当光源为随机偏振光时,横向负载产生的双折射效应使长周期光纤光栅的同一谐振峰分化为两个谐振子峰,分化后的两个谐振子峰对横向负载的灵敏度(漂移率)及漂移方向都不同,加载方向偏振光的谐振峰随横向负载的增大而向短波长方向漂移(蓝移)且其灵敏度较小;加载正交方向偏振光的谐振峰随横向负载的增大而向长波长方向漂移(红移),且其灵敏度较高,约为蓝移方向灵敏度的 2 倍以上;LPFG 的横向负载灵敏度是短周期光纤光栅灵敏度的数十倍以上;分化后的子峰波长间距对横向负载有更佳的线性性、灵敏度和抗干扰性,更适于横向负载的绝对测量。

## 参 考 文 献

- 1 K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguides; application to reflection filter fabrication [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(10): 647~649
- 2 A. M. Vengsarkar, J. R. Pedrazzani, J. B. Judkins *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[C]. Conf. of Optic Fiber Communications, San Diego, CA, 1995
- 3 Y. J. Rao. In-fiber Bragg grating sensors[J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 1997, **8**(4): 355~357

- 4 V. Bhatia, A. M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensors[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9): 692~694
- 5 Li Zhizhong, Yang Huayong, Cheng Yusheng *et al.*. Pressure sensing characteristics of panda fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 157~162  
李智忠, 杨华勇, 程玉胜等. 熊猫光纤光栅压力传感特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 157~162
- 6 Xiong Yanling, Zhao Hong, Zhang Jian *et al.*. Research on optical current transformer based on the fiber bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 949~953  
熊燕玲, 赵洪, 张剑等. 基于光纤光栅的光学电流互感器研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 949~953
- 7 R. B. Wagreich, W. A. Atia, H. Singh *et al.*. Effects of diametric load on fiber Bragg gratings fabricated in low birefringent fiber [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(13): 1223~1224
- 8 R. Gofsi, M. A. El-Sherif. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings[J]. *Optical Fiber Technol.*, 2000, **6**(3): 299~303
- 9 Y. Liu, L. Zhang, I. Bennion. Fiber optic load sensors with high transverse strain sensitivity based on long-period gratings in B/Ge co-doped fiber [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(8): 661~663
- 10 Tu Qinchang, Zhang Weigang, Sun Lei *et al.*. Study on transversal strain on fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1508~1512  
涂勤昌, 张伟刚, 孙磊等. 光纤布拉格光栅横向应变特性的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1508~1512
- 11 Qian Jingren, Liang Ming, Sun Jian. Optical fiber Bragg grating load sensing with high primary resolution[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 961~964  
钱景仁, 梁明, 孙箭. 高初始分辨率的光纤光栅横向负载传感[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 961~964
- 12 Wang Yiping. Study on Characteristics of Novel Long-Period Fiber Gratings [D]. Chongqing: Chongqing University, 2003, 128~147  
王义平. 新型长周期光纤光栅特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003, 128~147
- 13 Rao Yunjiang, Wang Yiping, Ran Zengling *et al.*. Simultaneous measurement of transverse load and temperature using a single longperiod fiber grating element[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1117~1120  
饶云江, 王义平, 冉曾令等. 单个长周期光纤光栅实现横向负载和温度的同时测量[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12): 1117~1120
- 14 A. Kuske, G. Robertson. Photoelastic Stress Analysis [M]. Wang Xieshan, Huang Jiefan *et al.*. Trans. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1979. 20-37, 426-443  
A. 柯斯克, G. 罗伯逊. 光弹性应力分析[M]. 王燮山, 黄杰藩等译. 上海: 上海科学技术出版社, 1979. 20-37, 426-443
- 15 Wu Yonghong, Qu Wenjun, Shao Changjiang *et al.*. Basic optical-mechanical transformation theoretical equation for FBG strain sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2067~2070  
吴永红, 屈文俊, 邵长江等. 光纤光栅应变传感器光-力转换的理论方程[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2067~2070
- 16 Liao Yanbiao. Fiber Optics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 199~201  
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 199~201