

角向二阶少模长周期光纤光栅的扭转响应特性

黄新成^{1,2}, 吴小文¹, 高社成^{1*}, 冯元华¹, 刘伟平¹

¹暨南大学信息科学与技术学院电子工程系, 广东 广州 510632;

²湖州师范学院求真学院电子与信息系, 浙江 湖州 313000

摘要 从理论和实验上研究了角向二阶少模长周期光纤光栅的扭转响应特性。理论分析发现角向高阶长周期光纤光栅的耦合谐振波长的扭转响应度依赖于光栅角向模式的阶数, 角向二阶模式的扭转波长响应度约是角向一阶的 2 倍; 同时, 光栅扭转引起的相位失配使得光栅谐振峰强度在小扭转率区间内随光栅扭转率增加呈准线性减小, 减小的快慢与相位失配量成反比。实验表明: 角向二阶少模长周期光纤光栅的谐振波长的扭转响应度约是一阶的 1.5 倍, 在顺时针扭转的情况下分别达到 $0.72 \text{ nm} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ 和 $0.82 \text{ nm} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$; 而谐振峰强度在小扭转率区间随扭转率的增加呈线性变化, 对应顺时针的线性灵敏度分别为 $0.81 \text{ dB} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ 和 $0.72 \text{ dB} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$, 在大扭转率状态下, 对应谐振强度变化幅度小且具有波动的特点, 实验结果与理论分析基本一致。角向二阶少模长周期光纤光栅的谐振峰波长和强度随扭转的响应特性在高精度的扭转力学量传感(例如扭转量、扭转速度和加速度), 以及多参量同时测量等方面有潜在的应用前景。

关键词 光通信; 角向二阶少模长周期光纤光栅; 扭转; 响应特性; 谐振峰

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1206001

Response Characteristic of Twisting Second-Azimuthal-Order Few-Mode Long-Period Fiber Grating

Huang Xincheng^{1,2}, Wu Xiaowen¹, Gao Shecheng^{1*}, Feng Yuanhua¹, Liu Weiping¹

¹Department of Electronics and Engineering, College of Information Science and Technology,

Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China;

²Department of Electronics and Information, Huzhou University Qiuzhen College,

Huzhou, Zhejiang 313000, China

Abstract This study experimentally and theoretically examines the response characteristic of twisting the second-azimuthal-order few-mode long-period fiber grating (FM-LPFG). The theoretical analysis shows that the twisting responsivity of the coupled resonant wavelength of the high-order FM-LPFG is closely related to the azimuthal order of the grating, i.e., the twisting responsivity of the resonant wavelength of the second-azimuthal-order FM-LPFG is almost two times larger than that of the first-azimuthal-order FM-LPFG; the twisting-induced phase mismatching leads to an almost linear decay of the intensity of the resonant peak in the transmission spectrum of the grating with the increase of grating twisting rate in a relatively small twisting-rate domain. This decay rate is inversely related to the value of the phase mismatch. Further, the experimental results show that the twisting responsivity of the resonant wavelength of the second-azimuthal-order FM-LPFG is approximately 1.5 times larger than that of the first-azimuthal-order FM-LPFG, which reaches $0.72 \text{ nm} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ and $0.82 \text{ nm} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ in the cases of clockwise and counter-clockwise twisting, respectively. The intensity of the resonant peak varies linearly with the increase of the twisting-rate in the small twisting-rate domain, and the linear sensitivities are $0.81 \text{ dB} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ and $0.72 \text{ dB} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ in the cases of clockwise and counter-clockwise twisting, respectively; however, the corresponding intensity of resonant peak has the characteristics of small variation amplitude and fluctuation in the large twisting-rate domain, indicating that experimental results are generally in agreement with the theoretical analysis. These twisting response characteristics of the wavelength and intensity of the resonant peak of the second-

收稿日期: 2019-05-21; 修回日期: 2019-07-15; 录用日期: 2019-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(61875076, 61775085, 61865014)、广东省科技计划项目(2017B010123005)

* E-mail: gaosc825@163.com

azimuthal-order FM-LPFG have potential applications in high-precision sensing of twisting mechanical parameters (such as twisting capacity, twisting speed, and acceleration) and simultaneous measurement of multiple parameters in the same monitoring twisting-rate domain.

Key words optical communications; second-azimuthal-order few-mode long-period fiber grating; twisting; response characteristic; resonant peak

OCIS codes 060.2270; 050.2770; 280.4788

1 引 言

少模长周期光纤光栅(FM-LPFG)能使光纤纤芯中的某一导模高效地耦合到另一导模上。本文将基模耦合到角向高阶模式(即 LP₀₁ 到 LP_{m1}, $m \neq 0$, m 为模式的角向阶数)的长周期光纤光栅称为角向高阶少模长周期光纤光栅,当 $m=2$ 时则称为角向二阶少模长周期光纤光栅。此类光栅在光纤通信和传感领域都有重要的应用,例如模式转换器(使纤芯基模耦合到高阶的纤芯模式)、模式滤波器、模式转换器^[1-5]、模式增益平坦器^[6-7]、以及传感器等^[8-13]。

通常用作传感器时,角向高阶少模长周期光纤光栅对外界的应力及温度变化更灵敏^[14-15]。Zhang 等^[15]在两模光纤上刻写长周期光纤光栅,实现了扭转灵敏度为 $0.47 \text{ nm} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ 和温度灵敏度为 $23.9 \text{ pm} \cdot \text{C}^{-1}$ 的测量,他们制作了手征长周期光纤光栅传感器,发现手征长周期光纤光栅传感器在温度和折射率变化的探测灵敏度方面与传统的长周期光纤光栅传感器一样,而在扭转率、弯曲和轴向应力的检测方面具有更高的灵敏度。Yang 等^[16]同样在两模光纤上刻写倾斜的长周期光纤光栅,实现了在扭转率区间 $-5.23 \sim 5.23 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ 内灵敏度为 $1.074 \text{ dB} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ 的扭转率测量。

以上对角向高阶少模长周期光纤光栅的扭转响应特性的研究主要集中在角向模式阶数为一阶的少模长周期光纤光栅上,目前对于角向阶数为二阶及以上的少模长周期光栅的扭转响应特性研究相对较少。本文从理论和实验两方面研究了角向二阶少模长周期光纤光栅的扭转响应特性,以及其在传感或其他方面应用的可行性。

2 基本原理

2.1 长周期光纤的模式耦合理论

少模长周期光纤光栅内的两个模式(模式 1 和模式 2)相互耦合,根据耦合模理论^[17-18],耦合方程可写为

$$\begin{cases} \frac{dA_1}{dz} = -i\kappa_{12}A_2 \exp[i(\beta_1 - \beta_2)z] - i\kappa_{11}A_1 \\ \frac{dA_2}{dz} = -i\kappa_{21}A_1 \exp[-i(\beta_1 - \beta_2)z] - i\kappa_{22}A_2 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: A_1 和 A_2 分别为模式 1 和模式 2 的电场幅度; β_1 和 β_2 分别为模式 1 和模式 2 的有效传播常数; κ_{12} 和 κ_{21} 分别为模式 1 到模式 2 以及模式 2 到模式 1 的耦合系数;而 κ_{11} 和 κ_{22} 分别为模式 1 和模式 2 的自耦合系数; z 为模式的传播距离。模式间的耦合系数为

$$\kappa_{ij} = \frac{\omega}{4} \epsilon_0 \iint E_i^*(\rho, \varphi) \Delta\epsilon(\rho, \varphi) E_j(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi, \quad (2)$$

式中: $\omega = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为角频率; λ 为光波波长; ϵ_0 为真空介电常数; E_i 和 E_j 为模式 i 和模式 j 的电场(*号表示复共轭); ρ 和 φ 分别为光纤横截面上的径向和角向坐标; $\Delta\epsilon$ 为光纤纤芯的介电常数的调制函数。模式编号 i 和 j 可取值为 1 和 2。

2.2 角向高阶少模长周期光栅的谐振峰波长漂移与扭转效应

通常长周期光纤光栅的介电常数的调制函数可以描述为^[12]

$$\Delta\epsilon(\rho, \varphi, z) = \Delta\epsilon(\rho, \varphi) \exp\left(i \frac{2\pi}{\Lambda} z\right), \quad (3)$$

式中: $\Delta\epsilon(\rho, \varphi)$ 代表横向部分的调制; Λ 为光栅的周期。考虑扭转效应,设光纤沿 z 方向发生扭转,扭转率为 τ ,则沿光纤的总微扰变为^[12]

$$\Delta\epsilon(\rho, \varphi, z) = \Delta\epsilon'(\rho, \varphi) \exp(i\tau z) \exp\left(i \frac{2\pi}{\Lambda} z\right), \quad (4)$$

式中: $\Delta\epsilon'$ 为扭转调制过的折射率调制函数。

将(4)式代入到(1)式中,可得相位匹配条件为

$$\beta_1 - \beta_2 - \frac{2\pi}{\Lambda} - \tau = 0, \quad (5)$$

式中: $\beta_1 = \beta_{0,1} + \Delta\beta_1$ 和 $\beta_2 = \beta_{0,2} + \Delta\beta_2$; β_1 和 β_2 分别表示模式 1 和模式 2 的有效传播常数; $\beta_{0,1}$ 与 $\beta_{0,2}$ 分别为未发生扭转时模式 1 和模式 2 的有效传播常

数; $\Delta\beta_1$ 与 $\Delta\beta_2$ 分别为模式 1 和模式 2 的有效传播常数中与扭转扰动相关的部分, 可写为^[19-20]

$$\Delta\beta_1 = \frac{\tau |p_{44}| n_{co}^2 l_1}{2}, \Delta\beta_2 = \frac{\tau |p_{44}| n_{co}^2 l_2}{2}, \quad (6)$$

式中: l_1 为模式 1 (角向阶数为 0 的模式, 即 LP_{01} 模式) 的角向阶数; l_2 为模式 2 的角向阶数 (本文中为角向阶数为 2 的模式, 即 LP_{21} 模式); n_{co} 为纤芯平均折射率; $p_{44} \approx -0.075$, 为光纤纤芯的弹光系数^[21]。

对(5)式两边进行微分, 注意到 $\beta_1 = \beta_{0,1} + \delta\beta_1$ 和 $\beta_2 = \beta_{0,2} + \delta\beta_2$ 后有

$$\frac{\delta\beta_{0,1}}{\delta\lambda} \Delta\lambda - \frac{\delta\beta_{0,2}}{\delta\lambda} \Delta\lambda + \Delta\beta_1 - \Delta\beta_2 = -(\beta_{0,1} - \beta_{0,2}) + \frac{2\pi}{\Lambda} + \tau. \quad (7)$$

再注意到在光栅的中心波长附近有 $(\beta_{0,1} - \beta_{0,2}) - \frac{2\pi}{\Lambda} = 0$, 再将(6)式代入(7)式后可得

$$\Delta\lambda = \frac{[|p_{44}| n_{co}^2 (l_2 - l_1) / 2 + 1] \tau}{\delta\beta_{0,1} / \delta\lambda - \delta\beta_{0,2} / \delta\lambda}, \quad (8)$$

式中: $\delta\beta_{0,1} / \delta\lambda$ 和 $\delta\beta_{0,2} / \delta\lambda$ 分别为模式 1 和模式 2 的一阶色散关系, 通常为常数且与少模光纤的几何和物理参数有关。表 1 给出了本文所用 4 模光纤的 4 个最低阶模式 (支持 LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02} 这 4 个模式的传播, 纤芯直径为 $19 \mu\text{m}$, 纤芯和包层的折射率分别为 1.449 和 1.444, 即纤芯和包层折射率差 $\Delta \approx 5 \times 10^{-3}$) 的一阶色散的 COMSOL 模拟值。

表 1 COMSOL 仿真的最低阶 4 个光纤传导模式在不同波长下的一阶色散值

Table 1 Values of first-order dispersion of four fiber propagation modes with lowest order at different wavelengths in COMSOL simulation

Wavelength / nm	First-order dispersion / (ps · nm ⁻¹ · km ⁻¹)			
nm	LP ₀₁	LP ₁₁	LP ₂₁	LP ₀₂
1250	5.824250	5.820407	5.815476	5.813929
1350	4.993056	4.989323	4.984572	4.983146
1410	4.576987	4.573320	4.568679	4.567334
1450	4.327838	4.324215	4.319649	4.318363
1510	3.990585	3.987027	3.982576	3.981387
1550	3.787179	3.783665	3.779292	3.778175
1610	3.510027	3.506579	3.502327	3.501332
1650	3.341819	3.338413	3.334245	3.333345

定义长周期光纤光栅的扭转响应度为谐振峰波长漂移量与扭转率的变化率, 即 $\chi = \frac{d\Delta\lambda}{d\tau}$, 根据(8)式可得

$$\chi = \frac{[|p_{44}| n_{co}^2 (l_2 - l_1) / 2 + 1]}{\delta\beta_{0,1} / \delta\lambda - \delta\beta_{0,2} / \delta\lambda}. \quad (9)$$

图 1 给出了不同角向阶长周期光纤光栅的扭转响应度 χ 随扭转率的变化关系。从图 1 可以看出, 不同角向阶长周期光纤光栅的扭转响应度不同, 在相同的谐振波长情况下, 角向二阶长周期光纤光栅的扭转响应度的绝对值要大于角向一阶长周期光纤光栅的, 意味着在相同的扭转率下, 角向二阶长周期光纤光栅的扭转灵敏度要大于角向一阶的 (前者平均约为后者的 2 倍以上)。

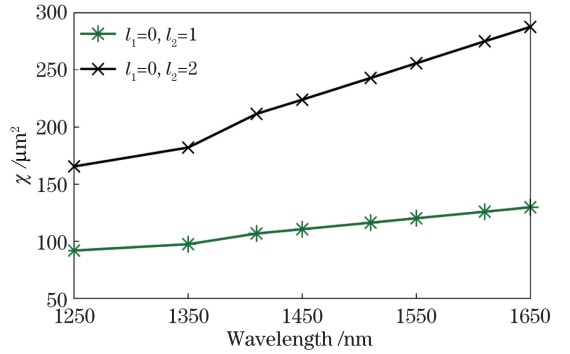


图 1 角向一阶和二阶长周期光纤光栅的扭转响应度 χ 的色散曲线

Fig. 1 Dispersion curves of twisting responsivity χ of first- and second-azimuthal-order LPFGs

2.3 角向高阶少模长周期光纤的谐振峰强度与扭转效应

模式 1 光束在 $z=0$ 入射到某一长周期光纤光栅, 根据(6)式和(2)式可得, 在光栅的出口 $z=L$ 处 (L 为光栅栅区长度), 模式 1 和模式 2 的振幅为^[22]

$$\begin{cases} A_1(L) = \exp(-i\Delta\beta L/2) \cdot \left[\cos(sL) - i \frac{\Delta\beta}{2} \frac{\sin(sL)}{s} \right] A_1(0), \\ A_2(L) = \exp(-i\Delta\beta L/2) \left[-i\kappa_{21}^* \frac{\sin(sL)}{s} \right] A_1(0) \end{cases}, \quad (10)$$

式中: κ_{21} 为模式 2 到模式 1 的耦合系数; * 表示复共轭; $A_1(0)$ 为模式 1 的模场振幅在 $z=0$ 处的值; $s^2 = |\kappa_{21}^*|^2 + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2$; $\Delta\beta$ 可表示为

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 - \frac{2\pi}{\Lambda} - \tau = [p_{44}n_{co}^2(l_1 - l_2) - 1]\tau. \quad (11)$$

根据(11)式可得模式 1 到模式 2 的耦合效率 η 为

$$\eta = \left| \frac{A_2(L)}{A_1(0)} \right|^2 = \frac{|\kappa_{21}^*|^2}{|\kappa_{21}^*|^2 + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2} \cdot \sin|\kappa_{21}^*|L \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta\beta}{2\kappa_{21}^*}\right)^2}. \quad (12)$$

注意到(11)式中长周期光纤光栅的中心波长附近的 $\Delta\beta$ 与 τ 成正比,定义 $\xi = 4|\kappa_{21}^*|^2 / |\pi\zeta|^2$,其中 $\zeta = |p_{44}n_{co}^4(l_1 - l_2) - 1|$ 。图 2(a)和(b)分别给出了 $|\kappa_{21}^*|L = \pi/2$ 和 $|\kappa_{21}^*|L = 3\pi/2$ 时,模式 1 到模式 2 的耦合效率(本文中模式 1 到 2 分别指的是 LP₀₁ 模

式到 LP₂₁模式,因此 $l_1 = 0, l_2 = 2$)随扭转率的变化关系。从图 2(a)和图 2(b)中可以看出,在小扭转率区间内,模式间的耦合效应随着扭转率的增大而近似线性地减小,而当扭转率大到一定值时,耦合效率逐渐趋于平稳,即耦合效率存在一个快变的线性区。当 ξ 越小或者模式 1 与模式 2 的耦合系数模 $|\kappa_{21}^*|$ 越小时,耦合效率变化曲率越陡,原因在于小的耦合系数模 $|\kappa_{21}^*|$ 意味着相对较长的耦合区,从而导致扭转作用的区间相对较长,扭转效应相应增强。

此外,从图 2(a)和图 2(b)中还能看出,在不同耦合条件(相位失配条件)下,耦合效率随扭转率的变化斜率不同,相位失配量越大时,耦合效率随扭转率的变化斜率绝对值越小,变化越缓慢,反之则越快。

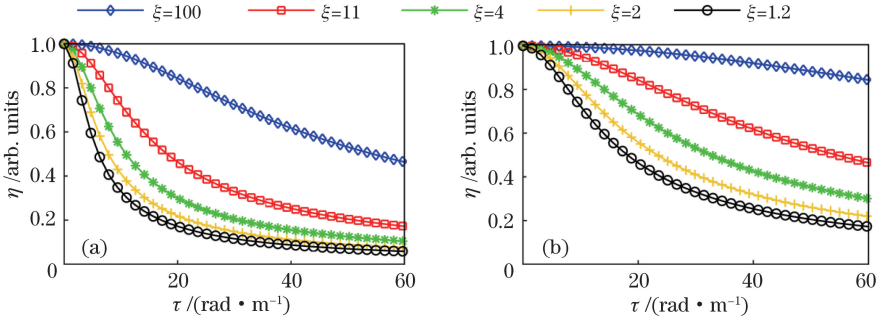


图 2 两种不同耦合条件下角向二阶少模长周期光纤光栅模式耦合效率随扭转率的变化。

(a) $|\kappa_{21}^*|L = \pi/2$; (b) $|\kappa_{21}^*|L = 3\pi/2$

Fig. 2 Mode coupling efficiency as a function of fiber twisting rate for second-order FM-LPFG under two different coupling conditions. (a) $|\kappa_{21}^*|L = \pi/2$; (b) $|\kappa_{21}^*|L = 3\pi/2$

3 实验与分析

3.1 实验装置

角向高阶少模长周期光纤光栅的扭转实验装置如图 3 所示,其中 SMF 为单模光纤,4MF 为少模光纤,即上文所述的 4 模光纤,SP 为少模光纤和 4 模光纤的熔接点(splice point),RC 为光纤旋转夹持器(rotating clamper),FM-LPFG 为少模长周期光纤

光栅(few mode-long period fiber grating),OSA 为光谱仪(optical spectra analyzer, 型号为 YOKOGAWA AQ6370, 精度为 0.02 nm); Supercontinuum Laser 为超连续光源(型号为 Fianium WL-Micro)。少模长周期光纤光栅 FM-LPFG 位于旋转夹持器 RC1 和 RC2 之间,其中 RC1 保持不动,RC2 能够绕光纤的轴线旋转,RC2 的旋转在 FM-LPFG 中会引起扭转效应。

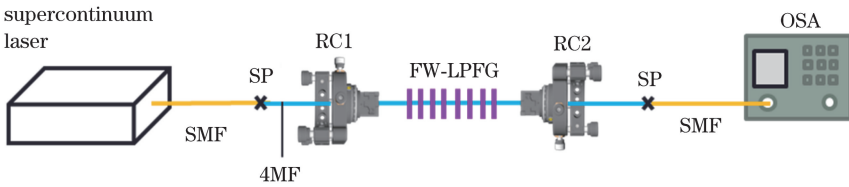


图 3 扭转实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of twisting

本文的少模长周期光纤光栅能够实现 LP₀₁ 模式到角向 2 阶模式(即 LP₂₁模式或 2 阶 OAM 模式或矢量模式)的直接转换,它的制备方法如文献[23]

所述:即采用 CO₂激光脉冲多次单侧曝光法在上述 4 模阶跃型光纤上刻写光栅。制备过程中为了在纤芯内实现 LP₀₁ 模到 LP₂₁ 模的高效耦合,不断改变

CO₂激光脉冲的曝光功率,多次在4模光纤的纤芯处进行刻写,最终在4模光纤的纤芯内形成一个近似90°的扇形强调制区。

在少模光纤后熔接一段单模光纤,再利用光谱仪观察从单模光纤中输出的少模长周期光纤光栅的透射谱,如图4所示。当超连续光源发出的光在左边一段单模光纤中以LP₀₁模式传播,传播到少模光纤中的长周期光纤光栅处被转换为LP₂₁模式。为了观察耦合到LP₂₁模式上的光场能量,在少模长周期光纤光栅后熔接上一段单模光纤。由于单模光纤不支持LP₂₁模式的传播,因此传播在LP₂₁模式的光场能量经过此段单模光纤后将被损耗掉,在光谱仪中观察

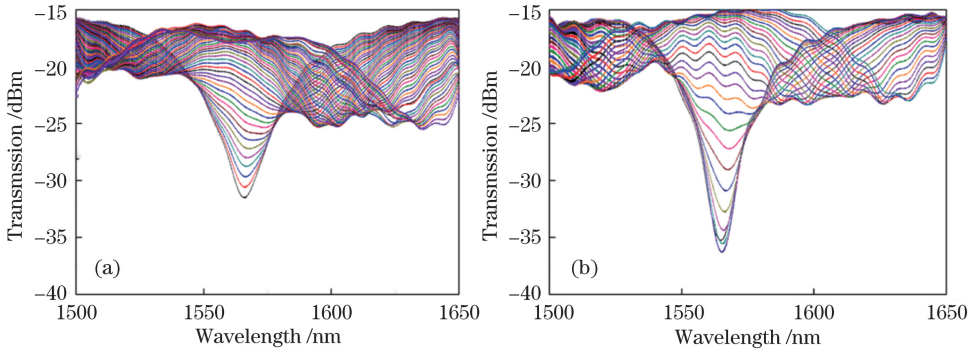


图4 少模长周期光纤光栅的透射光谱随光纤扭转率的变化。(a)顺时针方向扭转;(b)逆时针方向扭转
Fig. 4 Transmission spectra of second-azimuthal-order FM-LPPG as a function of fiber twisting rate.
(a) Clockwise twisting; (b) counter-clockwise twisting

少模长周期光纤光栅的谐振峰位置随光纤扭转率变化的关系如图5所示。在图5中,菱形块和方形块分别代表的是在顺时针方向和逆时针方向扭转时的数据。从图5中可以看出,无论是顺时针还是逆时针,当扭转率小于一定值时(顺时针时约20 rad·m⁻¹,逆时针时约23 rad·m⁻¹),光栅谐振峰

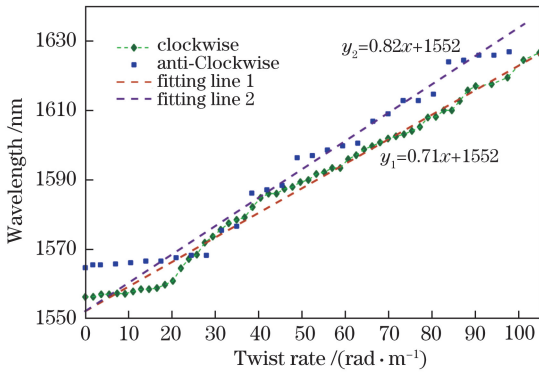


图5 角向二阶模式的长周期光纤光栅透射谱上的谐振峰位置随扭转率的变化

Fig. 5 Position of resonant peak in transmission spectrum of second-azimuthal-order FM-LPPG as a function of fiber twisting rate

时,其透射谱将出现一个与LP₂₁模式谐振峰对应的损耗峰。由于长周期光纤光栅有较大的谐振带宽,因此该谐振峰(损耗峰)也相应有较大的带宽。

3.2 实验结果

当少模长周期光纤光栅发生扭转时,它的透射谱对应的变化如图4所示。图4(a)和(b)分别为按顺时针方向和逆时针方向扭转时少模长周期光纤光栅的透射谱随扭转率变化而变化的情况。从图4中可以看出随着扭转率的变化,少模长周期光栅的透射谱上的谐振峰位置和强度均发生变化,且波长均向长波方向漂移。下面针对该透射谱位置和强度随光纤扭转率的变化特性进行深入的量化分析。

随扭转率变化的斜率较小,响应灵敏度低,但当扭转率大于该值时,光栅的谐振峰随扭转率变化的斜率显著变大,响应灵敏度显著提高。

少模长周期光纤光栅谐振峰强度随扭转率变化而变化的情况如图6所示。图6中菱形块对应的是顺时针扭转的情况,正方形块对应的是逆时针扭转

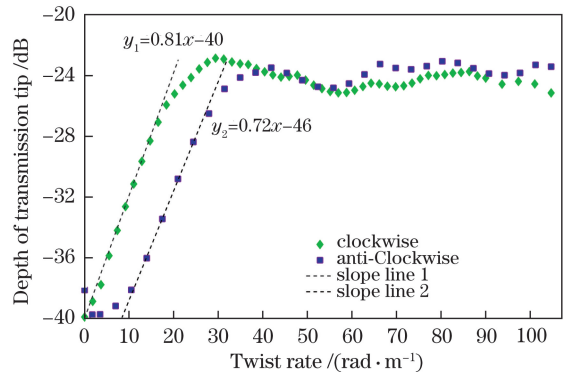


图6 角向二阶模式的少模长周期光纤光栅透射谱上的谐振峰的强度随扭转率的变化

Fig. 6 Intensity of resonant peak in transmission spectrum of second-azimuthal-order FM-LPPG as a function of fiber twisting rate

的情况。不难从图 6 中发现,不同扭转率下,该少模长周期光纤光栅的谐振峰强度(模式耦合效率)有不同的特性。与谐振峰位置随扭转率变化情况不同的是,在小扭转率区间(顺时针方向扭转的情况小于 $20 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$, 逆时针方向扭转的情况下小于 $25 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$),该少模长周期光纤光栅的谐振峰强度相对扭转率的变化斜率较大,响应灵敏度高,而在大扭转率的情况下(顺时针方向扭转的情况下大于 $20 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$, 逆时针方向扭转的情况下大于约 $25 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$)时,谐振峰强度随扭转率的变化斜率小,响应灵敏度低。

扭转方向对少模长周期光纤光栅谐振峰位置和强度的变化特性的影响如图 5 和图 6 所示。对于谐振峰位置,从图 5 中可以观察到,在扭转率大于 $20 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,在顺时针方向扭转情况下,响应曲线的斜率为 $0.71 \text{ nm} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$,而在逆时针的情况下为 $0.82 \text{ nm} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ 。类似地,如图 6 所示,对于谐振峰强度随扭转率变化曲线的线性区靠近零点的位置(扭转率为零的位置),在顺时针方向扭转的情况下,响应曲线斜率为 $0.81 \text{ dB} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$;在逆时针方向扭转的情况下为 $0.72 \text{ dB} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ 。

3.3 分析与讨论

在图 5 和图 6 中少模长周期光纤光栅透射谱的谐振峰位置和强度在不同扭转率下出现不同的反应特性的原因在于在少模长周期光纤光栅内存在不对称分布的预应力,当光栅沿其轴向不同方向发生扭转时,预应力释放的情况不同。

对于扭转导致的谐振峰位置的漂移情况:在小扭转率区间内,光纤内的预应力要大于外加的扭转力使得扭转效应减弱,导致由扭转导致的谐振峰位置的漂移并不明显(即此时不满足(8)式),因而出现了如图 5 所示的响应曲线在此种情况下响应灵敏度较低的情况;在大扭转率区间内,扭转力大于预应力使得扭转效应显现出来,因而出现了图 5 中的线性响应区。

表 2 几种不同的长周期光纤光栅谐振峰中心波长或强度的扭转灵敏度

Table 2 Twisting sensitivity of central wavelength or intensity of resonant peak of different types of LPFG

Mode type and order	Twisting sensitivity of central wavelength of the loss tip / $[\text{nm} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}]$	Twisting sensitivity of depth of the loss tip / $[\text{dB} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}]$	Linear response range / $(\text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$
LP ₁₁ core mode ^[12]	0.53	Weak	(-100, 100)
LP ₁₁ core mode ^[15]	0.21		(-40, 40)
LP ₁₄ cladding mode ^[16]		1.07	(-6, 6)
LP ₂₁ core mode (this paper)	0.72	0.81	(-100, -20) ∪ (20, 100) or (-20, 20)

对于图 6 所示的扭转导致的谐振峰强度的变化情况,预应力与外加扭转力的综合作用在一定程度上会影响到光栅内 LP₀₁ 模式与 LP₂₁ 模式的耦合系数,从而影响到参数 ξ ,使得随着扭转率变化出现类似于图 1 所示的谐振峰强度的响应特征,即在小扭转率区间内,曲线的变化斜率(绝对值)较大,而在较大扭转率区间内,曲线的变化斜率(绝对值)较小,特别是当扭转率较大时,根据文献[24]可知,LP₂₁ 模式的横场部分与 LP₀₁ 模式的纵场部分之间将发生耦合,耦合将导致 LP₀₁ 模式与 LP₂₁ 模式的耦合系数随扭转率变化而小幅地周期性振荡,此种趋势也反映到光栅透射谱中谐振峰的强度上。

此外,文中提出的角向二阶少模长周期光纤光栅的谐振峰中心波长位置的扭转响应率灵敏度[顺时针为 $0.71 \text{ nm} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$, 逆时针为 $0.82 \text{ nm} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$]是文献[12]中提出的角向一阶少模长周期光纤光栅的结果 $[0.53 \text{ nm} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}]$ 的 1.5~1.6 倍,小于理论分析的结果(约 2 倍)。出现这种情况的一个可能原因是理论分析中通过数值方法所计算出的 4 模光纤中模式的一阶色散值 $\delta\beta/\delta\lambda$ 存在误差,致使角向二阶少模长周期光纤光栅的扭转灵敏度过大或角向一阶的过小,另一个可能的原因是实验中存在的误差使得二阶情况下的灵敏度相对过小。除此而外,比较本研究的结果与文献[12]的结果也可以发现,当发生扭转时角向二阶的长周期光栅除了谐振峰位置会发生漂移以外,谐振峰的强度也发生改变,因而表现出更丰富的响应特性。

此外表 2 中还列举了其他几种不同类型光栅的谐振峰中心波长或强度的扭转灵敏度。从表 2 中可以看出,本文提出的角向二阶长周期光纤光栅芯层模的谐振峰中心波长扭转灵敏度相较角向一阶长周期光纤光栅的要大,而谐振峰强度扭转灵敏度相较包层模 LP₁₄ 的长周期光纤光栅的较小,但线性范围较大,理论上为 $-20 \sim 20 \text{ m}/\text{rad}$ 。

综合以上可以看出,角向二阶少模长周期光纤光栅有较高的扭转灵敏度,有更丰富的响应特性,即在不同扭转率区间内少模长周期光纤光栅透射谱的谐振峰位置和强度有不同的响应特性。角向二阶(包括高阶)模式的少模长周期光纤光栅这种特性在实际应用中有特殊的用处,利用它可以实现大范围内不同灵敏度的扭转率的探测和传感。

4 结 论

本文研究了二阶角向模式的少模长周期光纤光栅透射光谱的扭转响应特性。理论分析发现:角向二阶少模长周期光纤光栅相较角向一阶有更高的扭转灵敏度(约 2 倍);扭转引起的相位失配使得光栅透射谱的谐振峰强度在小扭转率区间内随光栅扭转率增加而呈近似线性地衰减,衰减的快慢与相位失配量成反比。在实验中发现其透射谱上的谐振峰位置和强度在小扭转率不同的情况下有不同的响应特征:谐振峰位置随扭转率变化的线性敏感区在较大扭转率区间,而其强度的线性敏感区在较小扭转率区间。且在各自的线性敏感区内,谐振峰位置和强度随扭转率变化的灵敏度均与扭转方向有关:在顺时针情况下,谐振峰位置和强度的灵敏度分别为 $0.72 \text{ nm} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ 和 $0.81 \text{ dB} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$,而在逆时针方向扭转情况下,分别为 $0.82 \text{ nm} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ 和 $0.72 \text{ dB} \cdot (\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})^{-1}$ 。

参 考 文 献

- [1] Ramachandran S, Ghalmi S, Wang Z Y, *et al.* Band-selection filters with concatenated long-period gratings in few-mode fibers [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(19): 1678-1680.
- [2] Motoyuki S, Kubota H, Ohashi M, *et al.* A broadband mode converter from LP₀₁ to LP₁₁ modes based on a long-period fiber grating using a two-mode fiber[C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE, 2018: 8355942.
- [3] Yang Y. Study on filtering characteristics of chirped long-period fiber grating [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(2): 173-176.
杨颖. 啾啾长周期光纤光栅的滤波特性研究[J]. *激光与红外*, 2011, 41(2): 173-176.
- [4] Zhang X H, Liu Y G, Wang Z, *et al.* LP₀₁-LP_{11a} mode converters based on long-period fiber gratings in a two-mode polarization-maintaining photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2018, 26(6):

7013-7021.

- [5] Xue Y R, Tian P F, Jin W, *et al.* Superimposed long period gratings based mode converter in few-mode fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(5): 054204.
薛艳茹, 田朋飞, 金娃, 等. 基于少模长周期光纤叠栅的模式转换器 [J]. *物理学报*, 2019, 68(5): 054204.
- [6] Cacciari I, Brenci M, Falciai R, *et al.* Reproducibility of splicer-based long-period fiber gratings for gain equalization [J]. *Optoelectronics Letters*, 2007, 3(3): 203-206.
- [7] Jiang J, Callender C L, Noad J P, *et al.* Hybrid silica/polymer long period gratings for wavelength filtering and power distribution [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(26): 4866-4873.
- [8] Ni W J, Lu P, Fu X, *et al.* Highly sensitive optical fiber curvature and acoustic sensor based on thin core ultralong period fiber grating [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 7100909.
- [9] Wu H, Tang M, Wang M, *et al.* Few-mode optical fiber based simultaneously distributed curvature and temperature sensing [J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12722-12732.
- [10] Lü R Q, Wang Q, Hu H F, *et al.* Fabrication and sensing characterization of thermally induced long period fiber gratings in few mode fibers [J]. *Optik*, 2018, 158: 71-77.
- [11] Guo Y C, Liu Y G, Wang Z, *et al.* Dual resonance and dual-parameter sensor of few-mode fiber long period grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0906003.
郭艳城, 刘艳格, 王志, 等. 少模光纤长周期光栅双峰谐振及双参量传感 [J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0906003.
- [12] Deng J, Feng Y H, Gao S C, *et al.* High sensitivity torsion sensors based on few-mode long-period fiber gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100602.
邓靖, 冯元华, 高社成, 等. 基于少模长周期光纤光栅的高灵敏度扭矩传感器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 100602.
- [13] Budinski V, Donlagic D. Fiber-optic sensors for measurements of torsion, twist and rotation: a review [J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 443.
- [14] Wang Q L, Sang M, Zhong C H, *et al.* Refractive index and curvature sensitivity of LPFG inscribed in few-modes fiber [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10464: 1046408.
- [15] Zhang L, Liu Y Q, Cao X B, *et al.* High sensitivity chiral long-period grating sensors written in the

- twisted fiber [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16 (11): 4253-4257.
- [16] Yang K, Liu Y G, Wang Z, *et al.* Twist sensor based on long period grating and tilted Bragg grating written in few-mode fibers [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 7102708.
- [17] Snyder A W. Coupled-mode theory for optical fibers [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, 62(11): 1267-1277.
- [18] Reichman D R, Charbonneau P. Mode-coupling theory [J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2005, 2005(5): P05013.
- [19] Alexeyev N, Volyar V, Yavorsky A. Optical vortices in twisted optical fibres with torsional stress [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2008, 10(9): 095007.
- [20] Ruan J, Zhang G, Zhang H, *et al.* Temperature and twist characteristics of cascaded long-period fiber gratings written in polarization-maintaining fibers [J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(10): 105403.
- [21] Ulrich R, Simon A. Polarization optics of twisted single-mode fibers [J]. *Applied Optics*, 1979, 18 (13): 2241-2251.
- [22] Yariv A, Yeh P. *Photonics: optical electronics in modern communications (the oxford series in electrical and computer engineering)* [M]. 6th ed. UK: Oxford University Press, 2006: 232.
- [23] Wu H, Gao S C, Huang B S, *et al.* All-fiber second-order optical vortex generation based on strong modulated long-period grating in a four-mode fiber [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5210-5213.
- [24] Ivanov O V. Propagation and coupling of hybrid modes in twisted fibers [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(4): 716-723.