

文章编号:1001-5078(2015)09-1105-04

· 光纤及光通讯技术 ·

# 长周期手征光栅的光谱和传感特性研究

李娜, 陈磊, 黄晓琴, 汪弋平

(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 210023)

**摘要:**根据耦合模理论,分析了双螺旋型长周期手征光纤光栅(Chiral Long Period Fiber Gratings, CLPGs)的光谱特性和耦合特性,利用相位匹配条件,计算了特定谐振波长所对应的扭转周期及扭转率,模拟了相应的透射谱,并讨论了光栅的设计参数对透射谱的影响。最后分析了双螺旋型 CLPGs 的应变传感特性,研究表明其传感特性与传统的长周期光纤光栅类似,谐振波长受应变变化会发生偏移,并且波长的偏移量与应变呈线性关系,灵敏度为  $0.828 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

**关键词:**手征光纤光栅;光纤传感;应变特性

**中图分类号:**TN253 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2015.09.020

## Research on the spectral and sensing properties of chiral long period gratings

LI Na, CHEN Lei, HUANG Xiao-qin, WANG Yi-ping

(Jiangsu Key Lab on Opto-Electronic Technology, School of Physical Science  
and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** According to the coupled-mode theory, the spectral and coupling characteristics of the double-helix chiral long period fiber grating (CLPGs) were analyzed. Using the phase matching conditions, the rotational period and torsion ratio corresponding to the specific resonant wavelengths were calculated. The relevant transmission spectra were simulated and the influence of the design parameters of gratings on the transmission spectrum was discussed. Finally, the strain sensing features of the double-helix CLPGs were analyzed. The research results show that the sensing properties of this grating are similar to that of the traditional long-period fiber gratings, which means the resonance wavelength will shift with the change of the strain, moreover, the wavelength shift is almost linearly with the strain, and the strain sensitivity is  $0.828 \text{ pm}/\mu\epsilon$ .

**Key words:** chiral fiber grating; fiber sensing; strain characteristics

### 1 引言

光纤光栅在光通信、光传感、光测量等方面都有重要应用,尤其在航空航天和桥梁监测等结构健康监测领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。然而,传统的光纤光栅无法在强紫外、强辐射以及高温环境下长期工作,

原因是光栅结构会受到影响甚至破坏<sup>[2]</sup>。针对这一问题,近年来一种新型的螺旋型手征光纤光栅(Chiral Fiber Gratings, CFGs)逐渐受到了研究人员的重视,螺旋型 CFGs 在制作工艺、耦合特性、折射率调制等方面具有传统光纤光栅所没有的优点。通

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 61307108);江苏省普通高校自然科学研究计划项目(No. 11KJA510003, No. 13KJB510016)资助。

**作者简介:**李娜(1990-),女,硕士研究生,研究方向光纤光栅传感器原理及应用。

**通讯作者:**黄晓琴(1963-),女,教授,硕士生导师,研究方向光纤光栅传感器原理及应用。E-mail: huangxiaqin@njnu.edu.cn

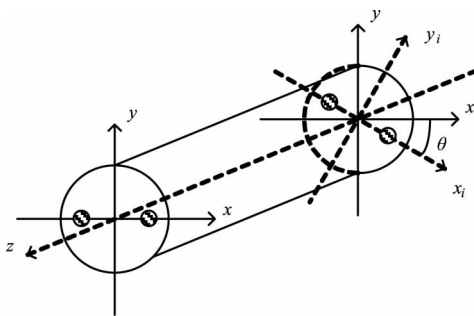
**收稿日期:**2014-12-30; **修订日期:**2015-02-05

过灵活地选择合适的纤芯和包层材料,手征光栅能够具有抗辐射性能,也可以在高温环境中稳定工作<sup>[3]</sup>,在圆起偏、电流互感器、光纤传感等方面已经取得了一定的成效。

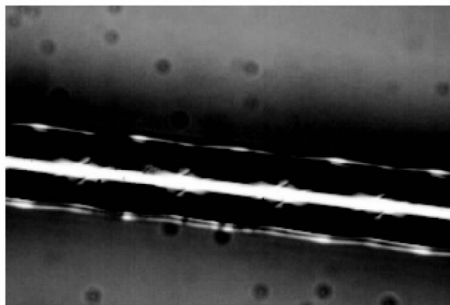
本文根据经典的耦合模理论,分析了双螺旋型 CLPGs 的耦合特性,利用相位匹配条件,确定了扭转周期及扭转率与谐振波长的关系,并通过计算机模拟了相应的透射谱特性,讨论了手征光栅的主要设计参数对透射谱的影响。最后在光谱分析的基础上,对双螺旋型 CLPGs 的应变传感特性进行了研究,分析表明 CLPGs 的传感特性与传统的长周期光纤光栅类似,谐振波长受应变变化会发生偏移,并且波长的偏移量与应变呈线性关系,灵敏度为  $0.828 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

## 2 双螺旋型 CLPGs 的理论及光谱分析

手征光栅因其结构特性与扭转的旋向相关(左手螺旋或右手螺旋),故被称为手征光纤光栅(CFGs)。它是通过熔融条件下高速扭转截面非圆对称光纤制作而成的。横截面具有  $360^\circ$  旋转对称的是单螺旋手征光纤光栅,横截面具有  $180^\circ$  旋转对称的是双螺旋手征光纤光栅。图1是基于熊猫光纤旋转而成的双螺旋型 CLPGs 的示意图及实物图,如图1(a)所示,  $(x, y, z)$ ,  $(x_i, y_i, z)$  分别为固定坐标系和旋转坐标系<sup>[4]</sup>。



(a) 示意图  
(a) Schematic diagram



(b) 显微镜下实物图  
(b) Optical microscopic image

图1 一段螺旋型熊猫光纤

Fig. 1 A twisted Panda fiber

以右手螺旋型旋转的手征光纤光栅为例,在满

足相位匹配条件的情况下,如公式(1)所示<sup>[5]</sup>:

$$\beta_{co} - \tau = \beta_{cl} + \tau \quad (1)$$

其中,  $\beta_{co}$ ,  $\beta_{cl}$  分别为芯层模和包层模式传播常数。此时,芯层右旋圆偏振模与包层左旋圆偏振模发生谐振耦合,且在某个光栅长度上能量完全转换到包层中去,而芯层左旋圆偏振模则自由的通过手征光纤光栅,在光栅的输出端就可以得到左旋圆偏振模式的光,这就是双螺旋型手征光纤光栅的圆偏振选择特性。其耦合模方程如公式2所示<sup>[6]</sup>:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} A_{co}^r \\ A_{cl}^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j(\beta_{co} - \tau) & C \\ -C & -j(\beta_{cl} + \tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{co}^r \\ A_{cl}^l \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $\tau$  为光纤扭转率;  $A_{co}^r$  为右旋圆偏振的芯层模幅值;  $A_{cl}^l$  为左旋圆偏振的包层模幅值;  $C$  为耦合系数。由公式(2)求得解析解为:

$$\begin{bmatrix} A_{co}^r(z) \\ A_{cl}^l(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(wz) + j\cos 2\phi \sin(wz) & \sin 2\phi \sin(wz) \\ -\sin 2\phi \sin(wz) & \cos(wz) - j\cos 2\phi \sin(wz) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{co}^r(0) \\ A_{cl}^l(0) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} w &= \sqrt{\delta^2 + C^2}, \delta = \frac{\beta_{co} - \beta_{cl} - 2\tau}{2}, \\ v &= \frac{\beta_{co} - \beta_{cl} - 2\tau}{2C}, \phi = \tan^{-1}(v + \sqrt{1 + v^2}) \end{aligned}$$

将  $\beta_{co} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff,co}$ ,  $\beta_{cl} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff,cl}$  代入式(1)可得

$$\pi \frac{\Delta n_{eff}(\lambda_D)}{\lambda_D} = \tau_D \quad (4)$$

上式即为满足相位匹配条件的设计谐振波长  $\lambda_D$  对应的扭转率  $\tau$  公式。

旋转周期  $P$  与扭转率  $\tau$  的关系式为  $P = 2\pi/\tau$ , 所以改变光纤光栅旋转周期  $P$  可以改变对应谐振波长。图2是基于耦合模方程模拟的基于熊猫光纤的螺旋型手征光纤光栅的透射谱,旋转周期选为  $371.9 \mu\text{m}$ ,光栅为右手螺旋旋转,其芯层右旋偏振模的透射谱如图2所示,图中选取的是芯层圆偏振模与一阶包层模的偏振耦合。从图2(a)可以看出,CLPGs 的透射谱与普通长周期光纤光栅相类似,所不同的是其带宽  $8 \text{ nm}$  相较于普通 LPGs 要窄得多,图2(b)是改变其旋转周期后得到的双螺旋型 CLPGs 的透射谱,可以看出当旋转周期从  $368 \mu\text{m}$  递增到  $371.9 \mu\text{m}$  和  $377 \mu\text{m}$  后,所对应的谐振波长也从  $1540 \text{ nm}$  分别随旋转周期的增加递增到

1550 nm和 1565 nm。

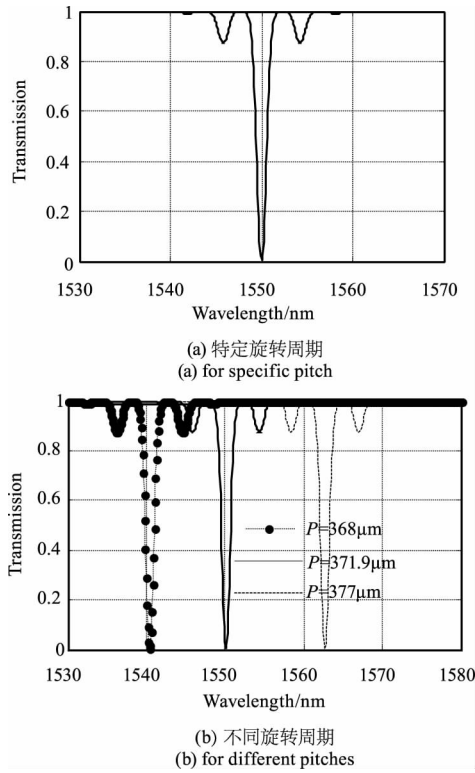


图2 CLPGs 透射谱

图3 描述了双螺旋型 CLPGs 长度的改变对其传输谱的影响,取光栅长度分别为  $L = 49.61$  mm、 $L = 49.62$  mm、 $L = 49.71$  mm、 $L = 50.11$  mm、 $L = 50.61$  mm,上述不同长度时光栅的透射光谱如图3(a)和图(b)所示。

从图3可以看出,双螺旋型 CLPGs 随着光栅长度的变化,其透射率会发生改变,光栅的长度越长,谐振波长处的透射峰值越小。

### 3 双螺旋型 CLPGs 的应变传感特性

从上一节可以看出,双螺旋型 CLPGs 与普通的长周期光纤光栅的谐振方程具有相似性,如公式(5)所示<sup>[7]</sup>:

$$\lambda_{res} = (n_{effco}(\lambda) - n_{effcl,1m}(\lambda))\Lambda \quad (5)$$

$n_{effco}$  和  $n_{effcl,1m}$  分别为芯层和1阶  $m$  次包层模式的有效折射率,当手征光纤光栅受到外界轴向应变作用时,其光栅周期会随之改变,而由于弹光效应,光栅的有效折射率也会发生变化。根据光纤光栅轴向传感模型,其波长偏移量可表示为:

$$\Delta\lambda = K_{L,\varepsilon} \times \Delta\varepsilon \quad (6)$$

这里只考虑一阶包层模的耦合,其应变灵敏度<sup>[7-9]</sup>为:

$$K_{L,\varepsilon} = \frac{d\lambda}{d\varepsilon} = \lambda_{res} \times \gamma \times (1 + \Gamma_{strain}) \quad (7)$$

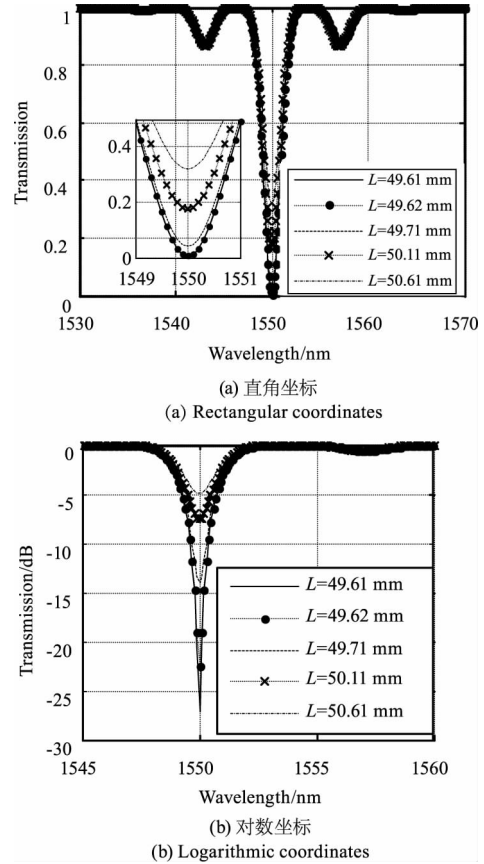


图3 不同光栅长度的 CLPG 透射谱

Fig.3 Transmission spectrum of CLPG for different gratings length

其中,

$$\gamma = \frac{1}{1 - \frac{\lambda_{res}}{n_{effco} - n_{effcl,1m}} \frac{d(n_{effco} - n_{effcl,1m})}{d\lambda}}$$

$$\Gamma_{strain} = \frac{1}{n_{effco} - n_{effcl,1m}} (\xi_{co} n_{effco} - \xi_{cl} n_{effcl,1m})$$

$K_{L,\varepsilon}$  为长周期光纤光栅应变灵敏度;  $\gamma$  为波导色散;  $\Gamma_{strain}$  为波导色散和应变的关系;  $\xi_{co}$  为纤芯模弹光系数;  $\xi_{cl}$  为包层模弹光系数。取轴向应变分别为  $\varepsilon = 16 \times 10^{-4}$ 、 $\varepsilon = 32 \times 10^{-4}$ 、 $\varepsilon = 64 \times 10^{-4}$ , 可以模拟出图4中从左向右的四条光谱。

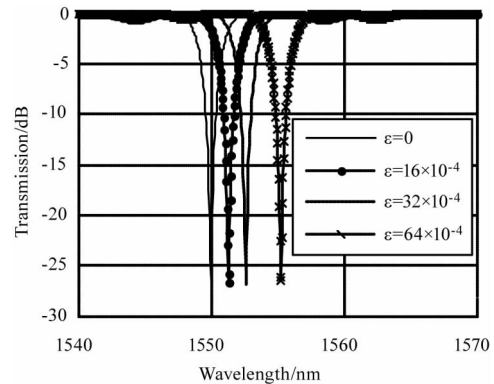


图4 CLPGs 的轴向应变光谱特性

Fig.4 The axial strain sensing features of CLPGs

从图中可以看出,随着轴向应变的逐渐增大,CLPGs的中心透射波长向右移动,而透射光谱的峰值透射率和透射带宽变化不大。轴向应变和中心透射波长漂移有很好的线性关系,如图5所示,灵敏度为 $0.828\text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

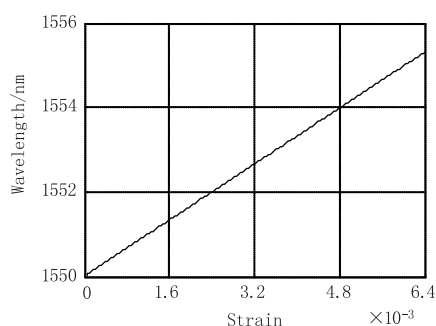


图5 透射波长漂移和轴向应变关系

Fig. 5 The wavelength shift to the axial strain

#### 4 结论

CLPGs的传感特性与传统的长周期光纤光栅类似,谐振波长受应变变化会发生偏移,并且波长的偏移量与应变呈线性关系,灵敏度为 $0.828\text{ pm}/\mu\epsilon$ 。根据实际需要,可以通过选择合适纤芯和包层弹光系数及材料的光纤来制作对应变高灵敏度,或不敏感的双螺旋型CLPGs,制作传感器。所以,CFGs的研究对航空航天等结构健康监测领域提供了广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] LIANG Wenbin, LIN Yuchi, ZHAO Meirong, et al. Applications of m-fiber Bragg grating in ship structural monitoring[J]. Laser & Infrared, 2012, 6(42): 682 – 684. (in Chinese)  
梁文彬, 林玉池, 赵美蓉, 等. 光纤光栅在船舶结构状态监测中的应用[J]. 激光与红外, 2012, 6(42): 682 – 684.
- [2] H Henschel, S K Hoeffgen, K Krebber, et al. Influence of fiber composition and grating fabrication on the radiation sensitivity of fiber Bragg gratings[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(4): pp1 – 8.
- [3] Victor IKopp, Jongchul Park, Mitchell Wlodawski, et al. Chiral fibers: microformed optical waveguides for polarization control, sensing, coupling, amplification, and switching[J]. Journal of Quantum Electronics, 2014, 34(4): 605.
- [4] YANG Li, LI Cheng, SU Jue, et al. Principle and theoretical analysis of all-fiber circular polarizers[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2010, 40(10): 1083 – 1086. (in Chinese)  
杨利, 李成, 苏觉, 等. 全光纤型圆偏振起偏器的工作原理及理论分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(10): 1083 – 1086.
- [5] Jingren Qian, Jue Su, Linlin Xue, et al. Coupled-mode analysis for chiral fiber long-period gratings using local mode approach[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(1): 49 – 54.
- [6] LI Cheng. The research of all-fiber circular polarizer based on chiral fiber grating[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010: 19 – 33. (in Chinese)  
李成. 基于手征光纤光栅的全光纤型圆偏振起偏器的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010: 19 – 33.
- [7] OU Qibiao, DAI Guoyong, PENG Yulin, et al. Influence of overlay thickness on the resonant wavelength of LPG[J]. Laser & Infrared, 2012, 6(42): 686 – 687. (in Chinese)  
欧启标, 代国勇, 彭宇林, 等. 膜层厚度对长周期光纤光栅谐振波长的影响[J]. 激光与红外, 2012, 6(42): 686 – 687.
- [8] Xuewen Shu, Lin Zhang, Ian Bennion. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 255 – 257.
- [9] ZHANG Zijia. Theory foundation of fiber bragg grating and sensing technology[M]. Beijing: Science Press, 2009: 177 – 180. (in Chinese)  
张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 177 – 180.