

# 全内反射型光子晶体光纤横向负荷及扭曲特性研究\*

杨晓辰<sup>1</sup>, 饶云江<sup>1,2</sup>, 朱涛<sup>1,2</sup>, 唐庆涛<sup>1</sup>

(1 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

(2 电子科技大学 宽带光纤传输与通信系统技术教育部重点实验室, 成都 610054)

**摘 要:**用 M-Z 干涉仪的精确干涉特性来测量光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)横向负荷特性及扭曲特性, 并应用等效折射率模型对其做了简单的理论分析. 实验结果表明: 光纤 M-Z 干涉仪传感臂(即 PCF 臂)受到外界应力作用时, 在固定输入光波长处, PCF 的有效折射率  $n$  会随外界应力的变化有规律的变化, 在横向负荷实验和扭曲实验中表现为干涉条纹的相位与外界应力的变化呈近似线性变化; 在横向负荷实验中干涉条纹幅值随所加负载的变化呈近似三角函数变化.

**关键词:**光子晶体光纤; 光纤 M-Z 干涉仪; 白光干涉; 等效折射率模型; 横向负荷特性; 扭曲特性

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)02-0292-5

## 0 引言

光子晶体光纤的概念最早由 ST. J. Russell 等人于 1992 年提出<sup>[1]</sup>, 英国南安普敦大学的 J. C. Knight 等人于 1996 年研制出世界上第一根 PCF<sup>[2]</sup>之后, PCF 因其所具有的特殊色散特性、非线性特性以及无截至的单模特性在光通信领域具有广泛的应用前景, 激起了人们浓厚的兴趣. 近年来, 有关光子晶体光纤的模式特性<sup>[3-4]</sup>、色散补偿特性<sup>[5-6]</sup>、有效面积<sup>[7-8]</sup>、及其应用于光器件<sup>[9]</sup>等方面的报道很多, 很少有关于光子晶体光纤机械特性的报道. 本文首次研究了光子晶体光纤的横向负荷特性及扭曲特性, 报道了一种利用 M-Z 干涉仪精确干涉特性来测量光子晶体光纤机械特性的方法. 在输入光源为宽带光源, 传感臂(即 PCF 臂)所受外界应力在一定范围内变化的情况下对光纤 M-Z 干涉仪产生的干涉条纹的相位和幅值的变化规律作了实验研究, 并应用等效折射率模型对其进行了简单的理论分析, 理论分析和实验结果具有一致性. 实验结果表明, PCF 的这些特性具有应用于光纤通信及传感领域的前景. 实验中关于 PCF 横向负荷及扭曲特性的研究为 PCF 的施工、安装以及光纤通信及传感领域 PCF 器件的制作及集成提供了简单的理论指导和实验数据.

## 1 实验装置与结果

图 1 和图 2 分别为 PCF 横向负荷及扭曲特性实验装置图. 实验所用的光耦合器是  $2 \times 2$  的单模 WDM 耦合器, 工作波长为 1 310 nm 或 1 550 nm.

实验选取的 PCF 为 CRYSTAL FIBER 公司生产的全内反射型光子晶体光纤, 模场直径  $6.4 \mu\text{m}$ , 衰减度  $< 1.0 \text{ dB/km}$ , 气孔之间的间隙  $\Lambda = 8.0 \mu\text{m}$ , 气孔直径  $d/\Lambda = 0.46$ . 实验所用光谱仪是 Micron Optics 公司生产的 Si720 光谱分析仪. PCF 与普通光纤的焊接均采用手动调节光纤融接机对准焊接的方法.

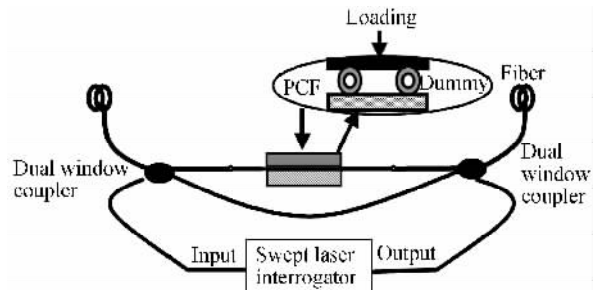


图 1 PCF 横向负荷实验装置

Fig. 1 Experimental setup for load test of PCF

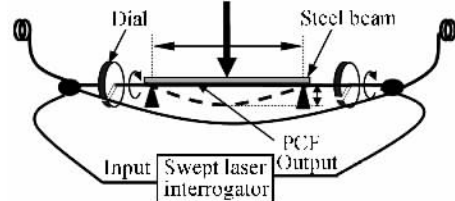


图 2 PCF 扭曲实验装置

Fig. 2 Experimental set-up for twist test of PCF

实验过程中, 选取光谱中心波长  $\lambda_0 = 1 550 \text{ nm}$  处的一个波峰, 在光谱仪 Si720 上做标记. 记录当每次外加应力改变后标记波峰和相邻波谷的幅值  $A(\text{dB})$  以及标记波峰较前一个稳定状态的位移  $X(\text{nm})$ , 代入公式可得相位变化  $\Delta\Phi = X/T \times 2\pi$  ( $T$  为干涉条纹的周期, 单位:  $\text{nm}$ ). 在外部条件改变的过程中, 干涉条纹的周期变化十分微小, 可近似认为在外部条件改变的过程中干涉条纹的周期  $T$  不变, 幅值的变化  $\Delta A = A_{\text{Peak}} - A_{\text{Trough}}$  (单位:  $\text{dB}$ ).

对于横向负荷特性实验, 为了使光纤纤芯受力

\* 国家自然科学基金(60537040)、教育部重点基金(104210)和重庆市自然科学基金(8415)资助

Tel: 023-65106917 Email: ytt614@163.com

收稿日期: 2006-09-19

均匀,在平行平板上放置了一段同种型号 PCF 的裸纤.改变平板上所加砝码的重量,稳定一段时间,待干涉条纹稳定后,记录干涉条纹幅值和相位的变化.图 3 和图 4 分别为干涉条纹的相位和幅值随砝码重量变化关系图.在室温 25℃ 时,在薄平板上每次增加 400 g 的砝码,总计加砝码重量为 5 100 g,然后依次减少砝码,同时观察干涉条纹变化.实验结果表明,干涉条纹的相位随着砝码重量的增加呈近似线性变化,干涉条纹的幅值随着砝码重量的增加呈近似三角函数变化;并且在增减砝码过程中实验重复性较好.

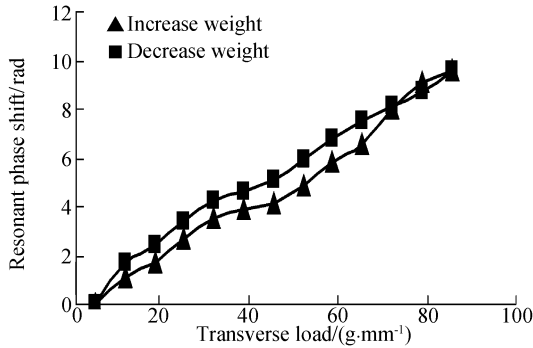


图 3 干涉条纹相位随砝码重量变化关系  
Fig. 3 The curve of phase-shift varies with the transverse load

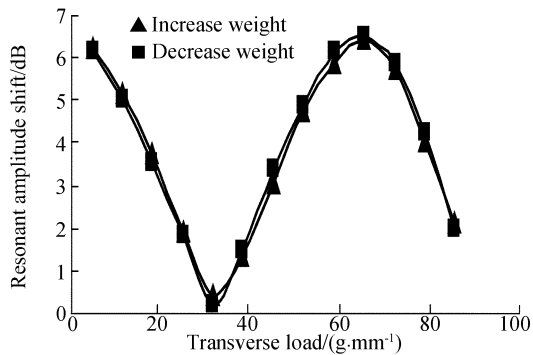


图 4 干涉条纹幅值随砝码重量变化关系  
Fig. 4 The curve of amplitude varies with the transverse load

对于扭曲特性实验,保持一个分度盘不动,转动另外一个分度盘,使光纤在自由状态下扭曲.图 5 为干涉条纹的相位随扭转角度变化关系图,图 6 为干

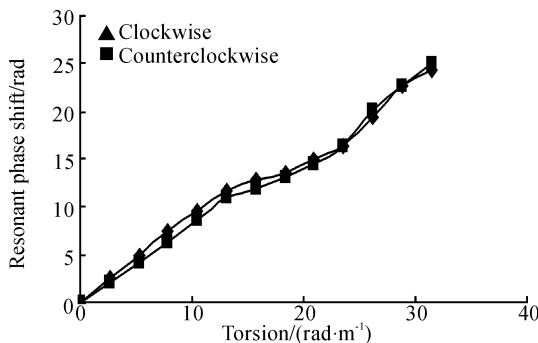


图 5 干涉条纹相位随扭转角度变化关系  
Fig. 5 The curve of phase-shift varies with the torsion

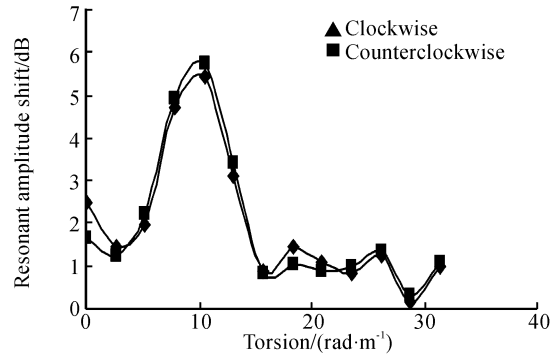


图 6 干涉条纹幅值随扭转角度变化关系  
Fig. 6 The curve of amplitude varies with the torsion

涉条纹的幅值随扭转角度变化关系图.在室温 25℃,扭转角度范围为 ±31.4 rad · m<sup>-1</sup>,每次扭转 π/6.在实验中观察到干涉条纹的相位随着扭曲曲率的变化呈近似线性变化,干涉条纹的幅值随着曲率的变化先增大后减小.

## 2 讨论

对于 Si720 所带的宽带光源,光谱分布可以近似用一个矩形函数进行描述

$$G(k) = G_0 \frac{L_c}{\sqrt{2\pi\xi}} \text{rect}\left\{\frac{k - k_0}{b}\right\} \quad (1)$$

式中  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ ,  $\lambda_0$  是光谱中心波长,  $G_0$  是  $\lambda = \lambda_0$  处强度值,  $\xi$  是光谱仪光源自身的光谱系数,  $L_c = \lambda_0^2 / \Delta\lambda$  是光源相干长度,其中  $\Delta\lambda$  是光源半谱宽度 (FWHM),  $x$  为参考臂和传感臂之间的光程差,  $b$  为光源的光谱宽度<sup>[10]</sup>.

以 Si720 型光谱仪光源作为输入光源的光纤 M-Z 白光干涉仪干涉条纹的光强为

$$I(x) = aG(0) \frac{L_c}{\sqrt{2\pi\xi}} \left[ b + 2\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}x\right) \sin\left(\frac{b}{2}x\right) \right] \quad (2)$$

光谱中心波长  $\lambda_0$  处干涉条纹的相位变化为

$$\Delta\phi_0 = 2\pi(n_R l_R - n_S l_S) / \lambda_0 \quad (3)$$

对于光子晶体光纤的横向负荷特性,考虑在波长  $\lambda = \lambda_0$  时,  $l_R$  上未施加应力,故可认为  $n_R l_R$  为常量.同时在光纤 M-Z 干涉仪传感臂(即 PCF 段)受到横向负荷作用时,  $l_S$  为沿轴向的长度变化,改变十分微小,由于  $l_S$  的变化而引起的干涉条纹相位变化  $\Delta\phi$  也很小,所以我们可以近似认为  $l_S$  是一个常量,此时干涉条纹相位变化  $\Delta\phi$  主要是由于  $n_S$  的变化所引起的.

图 7 为全内反射型光子晶体光纤的横截面,截面可以分为包层区和纤芯区,在包层区,均匀的圆空气柱在石英衬底上按三角排列形成周期性结构,芯层为一个石英圆柱.光子晶体光纤的结构参量可以由孔距  $\Lambda$ ,孔径  $d$  来表征.定义相对孔径(孔径孔距

比)  $P = d/\Lambda$ . 由于包层区由周期性排列的圆空气柱组成, 而芯层由纯石英构成, 包层区的平均折射率较芯层低. 和传统光纤一样, 光子晶体光纤就可以通过全内反射导光. 等效折射率方法将光子晶体光纤等效为一个阶跃折射率光纤, 求出包层的有效折射率后就可以用阶跃型折射率光纤的方法加以分析. 利用等效折射率模型分析的具体思路是考虑在包层区的一个周期性单元中, 其矢量场  $\Psi$  可作标量近似, 边界条件为  $d\Psi/dr = 0$ ,  $d\Psi/dr$ 、 $\Psi$  保持连续. 通过在一个周期性单元结构中解标量波动方程 (Bessel 方程) 可以计算得到基空间填充模 (Fundamental Space-Filling Mode) 即包层基模的传输常量  $\beta_{\text{FSM}}$ , 纤芯区由纯石英构成, 其折射率为  $n_0$ , 这样光子晶体光纤中的传播常量  $\beta$  就满足条件  $\beta_{\text{FSM}} < \beta < k_0 n_0$ ,  $k_0$  为自由空间波矢量<sup>[11]</sup>. 图 8 中左侧是包层区中的一个周期性单元, 在空气孔的直径  $d$  不是很大的情况下, 可以将分布规则的包层六边形单元包等效为与其面积相等的圆形单元包, 则此圆形单元包的半径为  $b = \Lambda(3^{1/2}/2\pi)^{1/2}$ <sup>[12,15]</sup>, 由光子晶体光纤  $\beta_{\text{FSM}}$  的对称性得电场和磁场的分量在圆形单元包上任一点为 0<sup>[16]</sup>. 将  $\beta_{\text{FSM}}$  近似为无限大周期性结构的基模传输常量, 由  $\beta_{\text{FSM}}$  可以得到包层区的有效折射率  $n_{\text{eff}} = \beta_{\text{FSM}}/k_0$ ,  $k_0$  为自由空间波矢量. 有了包层区的等效折射率  $n_{\text{eff}}$ , 就可以用普通光纤的理论来研究 PCF 的各种特性. 对于等效芯径的选取, 不同的文献选择了不同的值, 这里考虑到芯层是由包层区的一个周期性单元被替代而形成的, 从包层区的周期性出发, 选取芯径为  $R = \Lambda/2$ , 如图 7 中心的圆<sup>[12-16]</sup>.

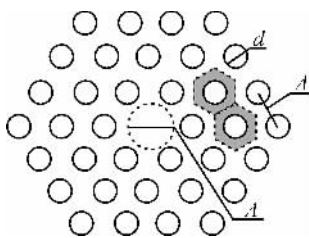


图 7 折射率导光型光子晶体光纤横截面  
Fig. 7 Schematic diagram of TIR PCF

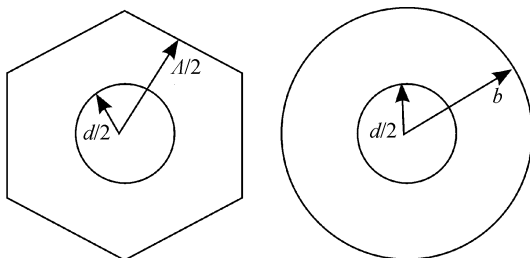


图 8 包层中的单元与其近似单元  
Fig. 8 Actual unit cell and its approximation in PCF cladding

应用等效折射率模型, 推导可知当  $P = d/\Lambda$  一定时, 在确定的波长  $\lambda = \lambda_0$ ,  $\Lambda$  越小, 空气孔中场分布加强, 从而等效折射率  $n_s$  是逐渐逼近包层等效折射率的一条渐进线<sup>[15]</sup>, 又由式 (3) 可定性得出光纤 M-Z 干涉仪干涉条纹相位变化即相移与  $n_s$  呈近似线性关系, 与实验结果基本相符.

对于光子晶体光纤的扭曲特性, 假设扭曲过程中 PCF 的长度不发生变化, 光弹效应对折射率的影响可表示为<sup>[17]</sup>

$$n - n_0 = c_1 \xi_x + c_2 (\xi_y + \xi_z) \quad (4)$$

式中  $n$  为施加应力后的折射率,  $n_0$  为施加应力前的折射率,  $\xi_x, \xi_y, \xi_z$  分别为应力在三轴的分量,  $c_1, c_2$  为系数. 沿光纤轴扭曲 PCF 时, 在光纤横切面上将产生沿圆周方向上的剪应力  $\xi$  ( $\xi = \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2}$ ), 大小与半径  $r$  和扭曲率  $\tau = 2\pi N/L$  成正比<sup>[18]</sup>,  $L$  为被扭曲的 PCF 的长度,  $N$  为扭曲的转数. 轴向应力  $\xi_z$  几乎为 0. 对于实验用 PCF, 包层的横切面积比纤芯要大, 因此包层中的剪应力  $\xi_{\text{clad}}$  要比纤芯中的剪应力  $\xi_{\text{core}}$  大得多. 又由式 (4) 可知, 光弹效应引起的折射率变化与剪应力  $\xi$  成比例, 所以剪应力  $\xi$  引起的包层有效折射率变化  $dn_{\text{clad}}^m$  比纤芯有效折射率  $dn_{\text{core}}$  变化大得多, 且光弹效应引起的折射率变化是增加还是减小与剪应力的方向有关, 故剪应力  $\xi$  的方向不同,  $dn_{\text{clad}}^m$  可能大于 0 也可能小于 0. 故当扭曲 PCF 时, 可定性认为干涉条纹相位随扭曲率的变化呈近似线性趋势变化. 扭曲时, 当两个干涉臂中光强近似相等时, 干涉条纹的对比度达到最大值, 而后干涉条纹的对比度逐渐减小, 与实验结果基本相符.

当扭曲使 PCF 长度发生改变时, 由式 (3) 可知, 此时 PCF 的长度  $l$  为光程差改变的主要因素, 干涉条纹相位的变化随 PCF 长度  $l$  成比例变化, 与实验结果也是相符的.

### 3 结论

实验及理论分析表明, PCF 的有效折射率  $n$  会随外界应力的变化有规律的变化, 在横向负荷实验中表现为干涉条纹的相位与所加负载的变化呈近似线性的关系, 其幅值随着所加负载的变化呈近似正弦的关系; 在扭曲特性实验中表现为, 干涉条纹的相位与扭转角度呈近似线性的关系. 利用 PCF 的这些特性, 可方便地实现压力、扭曲、应变等参量的测量. 如: 加载在光纤 M-Z 干涉仪传感臂上应力变化与干涉条纹幅值变化之间的线性关系, 可用简单的强度解调方法来实现应力传感; 而干涉条纹相位的变化具有很高的灵敏度, 则可应用在高准确度的光纤传感领域. 由于实验用光源为宽带光源, 其相干长度很

小,干涉条纹中主干干涉中央条纹的位置可由光谱仪精确的判定,因此可实现理论上的绝对测量.

#### 参考文献

- [1] RUSSELL P St J, KNIGHT J C, BIRKS T A, *et al.* Recent progress in photonic crystal fibers[C]. *Proc OFC 2000*, 3: 98-100.
- [2] KNIGHT J C, BIRKS T A, RUSSELL P St J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(19): 1547-1549.
- [3] REN Guo-bin, WANG Zhi, LOU Shu-qin, *et al.* Study on mode degeneracy in photonic crystal fibers[J]. *Electr Lett*, 2004, **53**(6): 1856-1861.  
任国斌, 王智, 娄淑琴, 等. 光子晶体光纤模式截止特性研究[J]. 电子学报, 2004, **53**(6): 1856-1861.
- [4] LI Chun-lei, SHENG Qiu-qin. The relation between the nonlinear coefficient of PCF and its geometry parameters and the optical wavelength[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 734-737.  
李春雷, 盛秋琴. 光子晶体光纤非线性系数与其结构参量及光波长的关系[J]. 光子学报, 2006, **35**(5): 734-737.
- [5] LI Shu-guang, LIU Xiao-dong. Numerical study on dispersion compensating property in photonic crystal fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(6): 1880-1886.  
李曙光, 刘晓东. 光子晶体光纤色散补偿特性的数值研究[J]. 物理学报, 2004, **53**(6): 1880-1886.
- [6] WU Wei-qing, CHEN Xiong-wen, ZHOU Hui, *et al.* Investigation of the ultra flattened dispersion in photonic crystal fibers with hybrid cores[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 110-113.  
吴维庆, 陈雄文, 周辉, 等. 混和纤芯光子晶体光纤超平坦色散研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(1): 110-113.
- [7] JIA Jun-ming, CHEN Ming-yang, XIANG Yang, *et al.* Study of equivalent core radius of photonic crystal fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **35**(1): 102-105.  
贾俊明, 陈明阳, 向阳, 等. 光子晶体光纤的纤芯等效半径分析[J]. 光子学报, 2005, **35**(1): 102-105.
- [8] REN Guo-bin, WANG Zhi, LOU Shu-qin, *et al.* The effective area of photonic crystal fiber [J]. *Chinese J of Lasers*, 2004, **32**(5): 723-726.  
任国斌, 王智, 娄淑琴, 等. 光子晶体光纤的有效面积[J]. 中国激光, 2004, **32**(5): 723-726.
- [9] REN Guo-bin, WANG Zhi, LOU Shu-qin, *et al.* Investigating the fiber bragg grating in the scope of the photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1291-1295.  
任国斌, 王智, 娄淑琴, 等. 光子晶体理论应用于光纤布拉格光栅的研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(11): 1291-1295.
- [10] YUAN Li-bo. White-light interferometric fiber-optic strain sensor with three-peak-wavelength broadband LED source [J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(25): 6246-6250.
- [11] KNIGHT J C, BIRKS T A, RUSSELL P J. Properties of photonic crystal fiber and the effective index model[J]. *J O S A A*, 1998, **15**: 748-75.
- [12] BIRKS T A, NIGHT J C, RUSSELL P St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt Lett*, 1997, **22**(13): 961-963.
- [13] BJARKLEV A, BROENG J, DRIDI K. Dispersion properties of photonic crystal fiber[C]. *ECOC'98*. 1998: 135-136.
- [14] BIRKS T A, MOGILEVTSEV D, NIGHT J C. The analogy between photonic crystal fibers and step index fibers [C]. *OFC'1999*. 1999: FG421-FG423.
- [15] REN Guo-bin, WANG Zhi, LOU Shu-qin, *et al.* Study on photonic crystal fibers by effective index model[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(6): 724-727.  
任国斌, 王智, 娄淑琴, 等. 应用等效折射率模型研究光子晶体光纤[J]. 中国激光, 2004, **31**(6): 724-727.
- [16] MIDRIO M, SINGH M P, SOMEDA C G. The space filling mode of holey fibers: an analytical vectorial solution[J]. *J Light Wave Technol*, 2000, **18**(7): 1031-1037.
- [17] WU Chong-qing. Optical waveguide theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 111-114.  
吴崇庆. 光波导理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 111-114.
- [18] LIU Hong-wen. Material mechanics [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1982: 97-108.  
刘宏文. 材料力学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 1982: 97-108.

## Transverse Load and Torsion Characteristics of Total Internal Reflection Photonic Crystal Fiber

YANG Xiao-chen<sup>1</sup>, RAO Yun-jiang<sup>1,2</sup>, ZHU Tao<sup>1,2</sup>, TANG Qing-tao<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of Ministry of Education,

Chongqing University, Chongqing 400044, China)

(2 Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks Technologies of (Ministry of Education), University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

Received date: 2006-09-19

**Abstract:** Utilizing the exact interferential characteristic of M-Z interferometer, the transverse load characteristic and torsion characteristic of Photonic Crystal Fiber (PCF) were generally studied by experiments. The experiment results show that in a definite wavelength, the effective refracting index of PCF presents a regular movement with the change of the transverse load. The phase of interferential stripes made by the M-Z interferometer will make an approximately line curve with the change of the load that put on the interferential arm, and the value of the interferential stripes presents a approximately sine curve movement; the phase of interferential stripes make a approximately line curve with the change of torsion angle of the interferential arm. The experiments results are explained by using the equivalent-index model.

**Key words:** Photonic crystal fiber; Fiber-M-Z interferometer; White light interferometer; Effective index model; Transverse load characteristic; Torsion characteristic



**YANG Xiao-chen** was born in 1981. He got his master degree in Chongqing University. His current research interests include in-fiber gratings and new fiber-optic sensors.