

文章编号:1004-4213(2011)09-1433-5

# 基于低双折射光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪的 超低温系数扭曲传感器

祖鹏<sup>1,2</sup>, 向望华<sup>1,2</sup>, 金永兴<sup>3</sup>

(1 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

(2 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(3 School of Chemical and Biomedical Engineering, Nanyang Technological University, Singapore, 637598)

**摘 要:**研究了低双折射光子晶体光纤中由光纤扭曲造成的圆双折射效应,并应用 Sagnac 干涉仪结构设计了扭曲传感器.在 Sagnac 环中的光子晶体光纤上施加机械压力引入初始线双折射并产生正弦干涉光谱,再扭曲光纤产生圆双折射使干涉光谱随扭曲角度移动.光谱峰值波长随扭曲角度变化符合 Sinc 函数关系,理论分析与实验相符.传感器灵敏度为 1.00 nm/°,分比率为 0.01°,并具有超低的温度系数-0.5 pm/°C.

**关键词:**光子晶体光纤传感器;扭曲传感器;低双折射光纤;Sagnac 干涉仪;双折射

中图分类号:O436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114009.1433

## 0 引言

基于 Sagnac 干涉仪的光纤传感器广泛应用在各种物理量测量中,包括应力<sup>[1]</sup>、压力<sup>[2]</sup>、温度<sup>[3]</sup>、电流<sup>[4]</sup>和扭曲<sup>[5]</sup>传感等<sup>[6]</sup>,因此受到广泛关注.近年来,随着光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)技术的迅速发展<sup>[7-8]</sup>,出现了基于光子晶体光纤的 Sagnac 干涉仪传感器,其灵敏度更高<sup>[3,5]</sup>,受环境温度影响小<sup>[1]</sup>,传感器结构更加灵活.通常,光纤 Sagnac 干涉仪传感器中会使用一段高双折射光纤或者保偏光纤使得光纤中互相垂直的偏振模之间产生相位差,进而使传感器产生正弦干涉光谱,再测量干涉光谱随外界物理量的移动,就实现了传感测量.在此类传感器中,大部分研究集中在光纤轴向应力<sup>[1]</sup>、横向压力<sup>[2]</sup>以及光纤非圆对称<sup>[9]</sup>造成的线双折射的影响,然而,圆双折射的影响也值得研究.扭曲是引起光纤圆双折射的一个主要原因.在光纤扭曲传感器中,文献[5,10]报导了基于高双折射光子晶体光纤的 Sagnac 扭曲传感器,其峰值波长与扭曲角度成线性关系;文献[11-14]报导了基于光纤光栅的扭曲传感器,包括长周期光栅<sup>[11-12]</sup>,布喇格光栅<sup>[13]</sup>和倾斜光栅<sup>[14]</sup>;此外,基于特殊光纤的扭曲传感器,包括双模运转的高双折射光纤<sup>[15]</sup>和空心带隙

光子晶体光纤等<sup>[16]</sup>也有许多报导.

但是,关于低双折射光子晶体光纤扭曲传感器实验研究的报导尚未发现.本文在 Sagnac 干涉仪中使用低双折射光子晶体光纤设计扭曲传感器,干涉光谱随扭曲角度变化关系符合 Sinc 函数.传感器灵敏度达到 1.00 nm/(°),比使用高双折射光子晶体光纤的扭曲传感器灵敏度提高 2 个数量级.传感器分辨率可达 0.01°,并具有超低温系数-0.5 pm/°C,对环境温度变化不敏感.

## 1 扭曲光纤的理论分析

在实际光纤中,由于光纤纤芯不是理想的圆形或者光纤制造过程中存在残余应力,往往会导致光纤存在固有的线双折射  $\Delta\beta$ .当光纤扭曲时,光纤纤芯变形和剪切应力会分别额外引起线双折射和圆双折射.因此,扭曲光纤可被认为是一个相位延迟器件和旋光器件<sup>[17]</sup>.如果固定光纤一端,扭曲光纤另一端,在两个互相垂直的偏振模式之间会产生相位延迟  $\Phi_R(\theta)$ ,它是扭转角度  $\theta$  的函数<sup>[17]</sup>

$$\Phi_R(\theta) = 2\arcsin\left(\frac{\rho}{\sqrt{1+\rho^2}}\sin\gamma z\right) \quad (1)$$

式中

$$\rho = \Delta\beta / [2(\theta - \alpha)] \quad (2)$$

第一作者:祖鹏(1982-),男,博士研究生,主要研究方向为光子晶体光纤传感器、光纤磁场传感器以及光纤光栅.

Email: xiaohaozi0716@hotmail.com

导师(通讯作者):向望华(1947-),男,教授,主要研究方向为光纤技术与光通信、超快激光等. Email: whxiang@tju.edu.cn

收稿日期:2011-03-08;修回日期:2011-06-01

$$\gamma = \sqrt{(\Delta\beta/2)^2 + (\theta - \alpha)^2} \quad (3)$$

$z$  是光纤扭曲的长度。 $\alpha$  是由应力引起的偏振态旋转角,与光纤扭曲角度  $\theta$  成正比关系

$$\alpha = g\theta \quad (4)$$

式中  $g$  是一个常量,与光纤材料的弹光系数有关.对于普通单模光纤,  $g \approx 0.08$ . 如果固定光纤的两端,扭曲光纤中间,效果相当于扭曲角度加倍,在式中使用两倍的扭曲角 ( $2\theta$ ) 即可. 仿真结果见图 1.

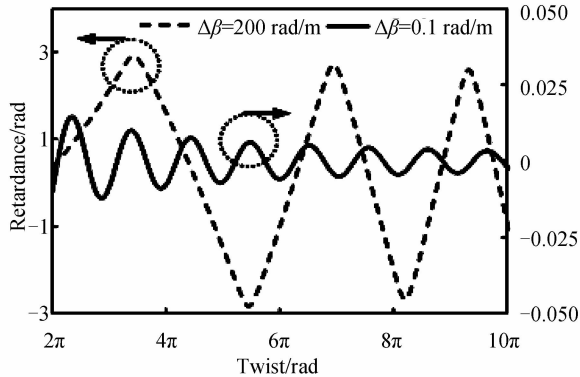


图 1 相位延迟与扭曲角度关系的理论模拟结果  
Fig. 1 Simulation results of retardance as a function of twist angle

对于高双折射光纤,线双折射远远大于由于扭曲造成的圆双折射,因此光不能在两个偏振模式之间耦合,扭曲的光纤相当于一个旋光器<sup>[17]</sup>. 在每一个单调函数区间内,扭曲造成的相位延迟  $\Phi_R(\theta)$  与扭曲角  $\theta$  成线性关系(如图 1).

对于低双折射光纤,光纤固有双折射远远小于扭曲造成的圆双折射<sup>[17]</sup>,光纤扭曲造成的相位延迟  $\Phi_R(\theta)$  可表示为

$$\Phi_R(\theta) = \Delta\beta \frac{\sin[(\theta - \alpha)z]}{\theta - \alpha} \quad (5)$$

此时,  $\Phi_R(\theta)$  可视为 Sinc 函数 ( $\sin x/x$ ).

## 2 传感器结构与原理

光子晶体光纤扭曲传感器的原理见图 2. 从宽带光源发出的光经 3 dB 耦合器分成光强相等的两

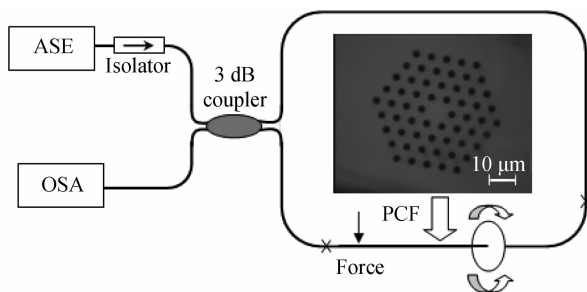


图 2 基于低双折射光子晶体光纤的扭曲测量原理  
插图:光子晶体光纤(LMA-10)横截面的 SEM 图像  
Fig. 2 Sensing scheme based on low birefringent PCF for twist measurement. Inset: SEM image of the cross section of the PCF (LMA-10)

束光. 这两束光沿着相反方向在 Sagnac 环中传输,在 3 dB 耦合器处再次相遇并发生干涉. 如果忽略插入损耗, Sagnac 环的透射率可表示为<sup>[1]</sup>

$$T = (1 - \cos \Phi) / 2 \quad (6)$$

如果 Sagnac 环中不存在线双折射,那么总相位差  $\Phi = 0$ , 透过率  $T = 0$ . 对于一个理想的 3 dB 耦合器,所有输入波长的光都会被反射回输入端,没有光传输到连接着光谱仪的输出端. 这时 Sagnac 干涉仪就是一个理想的光纤全反射镜.

为了方便传感测量,需要在 Sagnac 环中引入必要的线双折射,为此在光子晶体光纤上施加一个初始的横向压力,这个压力会引入一个初始的线双折射,进而引入一个固定相位差  $\Phi_0 = 2\pi BL/\lambda$ . 其中  $B$  是在长度为  $L$  的光子晶体光纤上由于横向压力而产生的线双折射,  $\lambda$  是传输光的波长. 此时,如果将宽带光源的光输入 Sagnac 环,会在光谱仪上观察到正弦函数形状的干涉光谱(如图 3 中插图所示). 扭

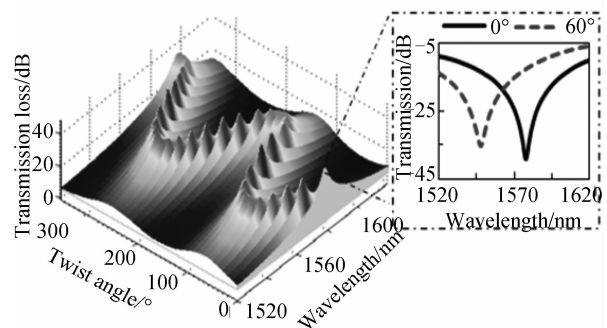


图 3 测量光谱在不同扭曲角度下的变化趋势的 3D 图像.  
插图:扭曲角度为 0° 和 60° 时的传输光谱

Fig. 3 Variation trend of measured transmission spectra at different twist angles. Inset: measured transmission spectra at twist angles of 0° and 60°

曲光子晶体光纤,光纤产生圆双折射和相位差  $\Phi_R(\theta)$ ,此时会在光谱仪上观察到正弦光谱移动. 测量峰值波长,就实现了光纤扭曲传感. 在这种情况下,总相位差可以表示为  $\Phi = \Phi_R(\theta) + \Phi_0$ . 因为  $\Phi_0$  是常量,所以峰值波长的移动  $\Delta\lambda$  可以表示为

$$\Delta\lambda \sim \left( \frac{\partial \Phi_R(\theta)}{\partial \theta} \right) \Delta\theta \quad (7)$$

式(7)表明,峰值波长移动量  $\Delta\lambda$  与系数  $\partial \Phi_R(\theta) / \partial \theta$  有关. 对于高双折射光纤,图 1 模拟的结果和文献[4]中的实验结果都说明  $\partial \Phi_R(\theta) / \partial \theta$  是一个常量,因此峰值波长移动量  $\Delta\lambda$  正比于扭曲角度  $\theta$ . 图 1 中的模拟结果与使用高双折射光子晶体光纤的实验结果吻合<sup>[5]</sup>. 对于低双折射光纤,峰值波长移动量  $\Delta\lambda$  具有 Sinc 函数变化规律. 传感器的灵敏度与系数  $\partial \Phi_R(\theta) / \partial \theta$  有关,如果选择适当的低双折射光纤,可以得到较高灵敏度的传感器.

### 3 实验和结果

把 50 cm 低双折射实心光子晶体光纤 (LMA-10, NKT Photonics A/S) 与普通单模光纤的 3 dB 耦合器两个输出端用光纤熔接机熔接组成 Sagnac 干涉仪. 图 2 中的插图是所使用的低双折射光子晶体光纤的扫描电子显微镜图像, 空气孔在实心纤芯周围呈六边形排列, 光纤的纤芯、包层、空气孔以及模场直径分别是  $10\ \mu\text{m}$ ,  $125\ \mu\text{m}$ ,  $3.04\ \mu\text{m}$  和  $7.5\ \mu\text{m}$ . 光子晶体光纤和单模光纤的熔接损耗是 4 dB. 使用的 3 dB 耦合器、隔离器、光子晶体光纤和宽带光源的中心波长都是 1 550 nm.

用一块铁块压在 Sagnac 环中的一段低双折射光子晶体光纤上来引入必要的初始线双折射, 调整施加在光子晶体光纤上的压力直到有干涉峰出现在宽带光源光谱范围 (放大自发辐射 ASE 光源, 1 520 ~ 1 620 nm) 和光谱仪 (AQ6370) 测量范围内. 光谱仪测量的传输谱如图 3 中插图所示. 插图中标有  $0^\circ$  的曲线是传感器的初始传输光谱, 其峰值波长为 1 578.1 nm.

如图 2 所示, 当顺时针或者逆时针扭曲光子晶体光纤时, 传感器的传输光谱 (峰值波长) 相应地向短波长或者长波长方向移动, 这一移动过程是完全可逆的并且可重复的. 图 3 中插图给出了光子晶体光纤扭曲  $0^\circ$  和  $60^\circ$  的传输光谱. 为了测量传感器的灵敏度和输出光谱峰值波长的变化趋势, 将光子晶体光纤从  $0^\circ$  扭曲到  $360^\circ$ , 并且每间隔  $10^\circ$  测量一次输出光谱. 将这一系列光谱图绘制在 3D 图中 (图 3). 3D 图中清楚地显示传感器输出光谱 (峰值波长) 随着光子晶体光纤扭曲角度的增加周期性的移动, 其移动趋势符合 Sinc 函数变化规律.

记录这一系列传输光谱的峰值波长, 并将峰值波长与光子晶体光纤扭曲角度的关系绘制在图 4 中. 从图中观察到, 在光纤扭曲  $60^\circ$  时, 传感器输出光谱的峰值波长最小 (1 545.2 nm); 在光纤扭曲

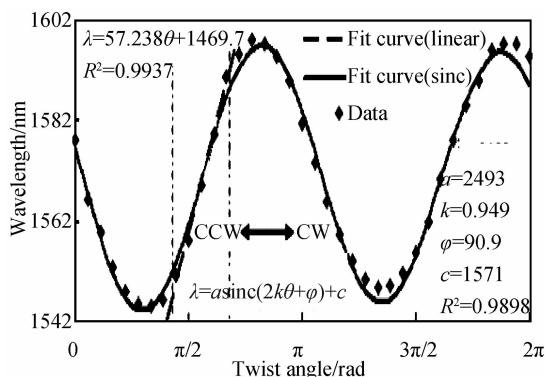


图 4 峰值波长随扭曲角度变化关系

Fig. 4 Dip wavelength shifts with the twist angle

$140^\circ$  时, 峰值波长移动到最大波长处 (1 597.9 nm), 移动范围达到 52.7 nm. 与文献 [18] 中实验结果比较, 基于低双折射光子晶体光纤的扭曲传感器和基于普通单模光纤的传感器输出光谱的峰值波长变化趋势相似, 都符合 Sinc 函数. 但是, 实验中传感器峰值波长移动范围是使用单模光纤扭曲传感器的 3 倍, 意味着使用低双折射光子晶体光纤的传感器比使用单模光纤的传感器有着更高的灵敏度 [18]. 用 Sinc 函数拟合图 4 中曲线, 得到  $R^2$  值为 0.989 8, 说明理论分析结果与实验结果非常吻合.

观察图 4, 曲线中每个单调区间几乎都是线性变化. 以  $75^\circ$  到  $140^\circ$  这段曲线为例, 用线性函数将其拟合, 得到  $R^2$  值为 0.993 7, 说明峰值波长随扭曲角度变化具有很好的线性度, 计算出传感器的灵敏度为  $1.00\ \text{nm}/^\circ$ . 在实际应用中, 可以先把光纤预先扭曲到这一范围内, 以应用其线性范围来实现高灵敏度测量. 本实验提出的基于低双折射光子晶体光纤传感器的灵敏度远远高于文献中基于其他光纤的扭曲传感器的灵敏度, 是使用高双折射光子晶体光纤的扭曲传感器灵敏度的 17 倍 [5]; 是使用侧孔式保偏光纤传感器灵敏度的 12.5 倍 [10]; 是偏振模干涉法光子晶体光纤扭曲传感器灵敏度的 521 倍 [16]; 是长周期光纤光栅扭曲传感器灵敏度的 255 倍. 按照光谱仪的分辨率极限计算 19 pm, 本传感器的分辨率是 0.01 nm.

基于光子晶体光纤传感器的另外一个突出优点是其超低的温度系数. 在本实验中, 也对传感器的温度性能进行了测试. 当温度从  $30^\circ\text{C}$  变化到  $100^\circ\text{C}$ , 传感器输出光谱的峰值波长向短波长方向移动了 40 pm (图 5). 用线性函数对其拟合, 得到温度敏感系数为  $-0.5\ \text{pm}/^\circ\text{C}$ . 与扭曲传感灵敏度  $1.00\ \text{nm}/^\circ$  相比, 外界温度对传感器的影响可以忽略.

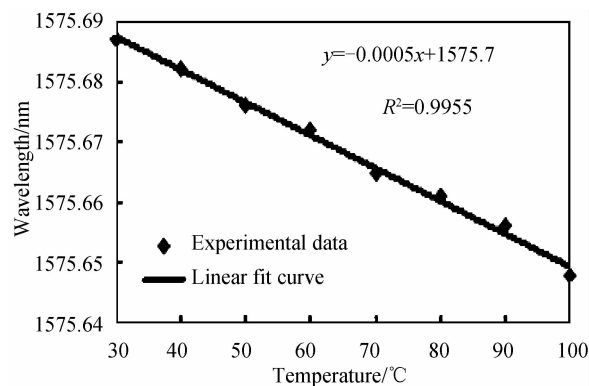


图 5 峰值波长随温度变化关系

Fig. 5 Dip wavelength shift with different temperatures

### 4 结论

本文理论分析并实验验证了一种基于低双折射

光子晶体光纤的 Sagnac 干涉仪扭曲传感器. 传感器利用施加在低双折射光子晶体光纤上的横向压力来引入初始必要的线性双折射, 从而产生正弦形状的干涉光谱. 干涉光谱的峰值波长随扭曲角度而变化, 变化趋势符合 Sinc 函数. 将基于低双折射光子晶体光纤的传感器实验结果与基于高双折射光子晶体光纤的传感器的实验结果做了比较和分析, 两者结果完全不同, 基于低双折射的光子晶体光纤扭曲传感器随角度变化符合 Sinc 函数关系, 基于高双折射的光子晶体光纤扭曲传感器随角度变化符合线性函数关系. 所设计的传感器灵敏度为  $1.00 \text{ nm}/(^{\circ})$ , 分辨率为  $0.01^{\circ}$ , 比基于高双折射光子晶体光纤的扭曲传感器的灵敏度高两个数量级, 比使用单模光纤的扭曲传感器的灵敏度高 3 倍. 同时本传感器具有很好的重复性, 超低的温度系数 ( $-0.5 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ), 具有广泛的应用前景.

#### 参考文献

- [1] DONG X Y, TAM H Y, SHUM P. Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(3): 151113-3.
- [2] FU H Y, TAM H Y, SHAO L Y, *et al.* Pressure photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(15): 2835-2839.
- [3] KIM B H, LEE S H, LIN A X, *et al.* Large temperature sensitivity of Sagnac loop interferometer based on the birefringent holey fiber filled with metal indium [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(3): 1789-1794.
- [4] WANG Jia, HOU Hong-lu, XU Jin-tao. Sagnac fiber-optic current sensor without vibration sensitivity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 57-61.  
王嘉, 侯宏录, 徐金涛. 一种新型 Sagnac 式光纤电流传感器 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 57-61.
- [5] KIM H M, KIM T H, KIM B, *et al.* Temperature-insensitive torsion sensor with enhanced sensitivity by use of a highly birefringent photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(20): 1539-1541.
- [6] LIANG Yi-jun, XU Yan-de, LIU Zhi-hai, *et al.* Frequency response of coiled-fiber optic sensor for detection of the acoustic emission [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1337-1340.  
梁艺军, 徐彦德, 刘志海, 等. 环形光纤声发射传感器的相位调制特性研究 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1337-1340.
- [7] LIANG Jian, YUN Mao-jin, KONG Wei-jin, *et al.* A novel highly birefringent photonic crystal fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(s1): 39-42.  
梁健, 云茂金, 孔伟金, 等. 新型高双折射光子晶体光纤特性分析 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(s1): 39-42.
- [8] ZHANG Ming-ming, MA Xiu-rong, CAO Ye, *et al.* Study on high birefringence photonic crystal fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1126-1129.  
张明明, 马秀荣, 曹晔, 等. 高双折射光子晶体光纤研究 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1126-1129.
- [9] FRAZAO O, BAPTISTA J M, SANTOS J L. Recent advances in high-birefringence fiber loop mirror sensors [J]. *Sensors*, 2007, **7**(11): 2970-2983.
- [10] FRAZAO O, SILVA S O, BAPTISTA J M, *et al.* Simultaneous measurement of multiparameters using a Sagnac interferometer with polarization maintaining side-hole fiber [J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(27): 4841-4848.
- [11] WANG Y P, RAO Y J. Long period fibre grating torsion sensor measuring twist rate and determining twist direction simultaneously [J]. *Electronics Letters*, 2004, **40**(3): 164-166.
- [12] RAO Y J, WANG Y P, RAN Z L, *et al.* Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, **21**(5): 1320-1327.
- [13] ZHANG W G, KAI G Y, DONG X Y, *et al.* Temperature-independent FBG-type torsion sensor based on combinatorial torsion beam [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(8): 1154-1156.
- [14] CHEN X, ZHOU K, ZHANG L, *et al.* In-fiber twist sensor based on a fiber Bragg grating with 81 degrees tilted structure [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(21-24): 2596-2598.
- [15] FRAZAO O, JESUS C, BAPTISTA J M, *et al.* Fiber-optic interferometric torsion sensor based on a two-LP-mode operation in birefringent fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(17): 1277-1279.
- [16] XUAN H F, JIN W, ZHANG M, *et al.* In-fiber polarimeters based on hollow-core photonic bandgap fibers [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(15): 13246-13254.
- [17] SAKAI J I, KIMURA T. Birefringence and polarization characteristics of single-mode optical fibers under elastic deformations [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981, **17**(6): 1041-1051.
- [18] JIN Y X, CHAN C C, ZHANG Y F, *et al.* Temperature sensor based on a pressure-induced birefringent single-mode fiber loop mirror [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, **21**(6): 065204.

## Fabrication of Temperature-insensitive Twist Sensor Using Low Birefringent Photonic Crystal Fiber Based Sagnac Interferometer

ZU Peng<sup>1,2</sup>, XIANG Wang-hua<sup>1,2</sup>, JIN Yong-xing<sup>3</sup>

(1 *College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

(2 *Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science (Ministry of Education), Tianjin 300072, China*)

(3 *School of Chemical and Biomedical Engineering, Nanyang Technological University, Singapore, 637598*)

**Abstract:** The circular birefringence effect in the low birefringent photonic crystal fiber caused by fiber twist is investigated, which is applied in the Sagnac interferometer structure to realize a twist sensor. The mechanical force is applied on the photonic crystal fiber in the Sagnac loop to introduce initial linear birefringence and to generate a sinusoidal interference spectrum. Then, the dip wavelength of the spectrum shifts due to extra circular birefringence caused by the fiber twist. The relationship between the dip wavelength and twist angle follows Sinc function, which is in coincidence with the theoretical analysis. The achieved sensitivity and resolution of the sensor are 1.00 nm/(°) and 0.01°, respectively. The sensor possesses ultralow temperature coefficients of  $-0.5$  pm/°C.

**Key words:** Photonic crystal fiber sensor; Twist sensor; Low birefringence fiber; Sagnac interferometer; Birefringence