

# 同时测量扭转角度和扭转方向的侧漏光子晶体 光纤扭转传感器\*

娄淑琴<sup>†</sup> 鹿文亮 王鑫

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

(2012年10月11日收到; 2012年12月4日收到修改稿)

基于所研制的侧漏型光子晶体光纤, 提出并构建了一种同时检测扭转角度和扭转方向的高灵敏度 Sagnac 干涉仪型光纤扭转传感器. 顺时针扭转时, 传感器传输谱向短波长方向偏移; 逆时针扭转, 向长波长方向偏移. 对传感器扭转特性的实验研究结果表明, 构成 Sagnac 干涉仪的侧漏型光子晶体光纤的长度, 对扭转敏感系数和扭转角度测量范围起着决定性作用. 当光纤长度较短时, 扭转传感器具有较大的扭转灵敏度, 但扭转角度测量范围较小; 光纤长度增加时, 扭转灵敏度减小, 扭转角度测量范围增大. 当构成 Sagnac 干涉仪的侧漏型光子晶体光纤长度为 14.85 cm 时, 传感器的扭转敏感系数可达到 0.9354 nm/(°), 扭转角度测量范围为  $-90^{\circ}$ — $90^{\circ}$ ; 光纤长度为 32 cm 时, 最大扭转敏感系数降为 0.2132 nm/(°), 扭转角度测量范围扩展至  $-180^{\circ}$ — $180^{\circ}$ . 采用二维测量矩阵法可以有效排除温度对扭转角度的测量的影响.

**关键词:** 光纤传感器, 侧漏型光子晶体光纤, 扭转传感器, Sagnac 干涉仪

**PACS:** 07.07.Df, 42.79.Gn, 78.67.Pt, 07.60.Ly

**DOI:** 10.7498/aps.62.090701

## 1 引言

扭转角度和扭转方向等扭转量是大型建筑结构健康监测和许多传感应用领域关注的一个重要参量. 传统扭转传感器, 如光编码器和磁性传感器等<sup>[1]</sup>, 因尺寸较大不易于埋入结构中限制了其应用范围. 光纤扭转传感器, 结构紧凑, 易于埋入工程结构中, 而且具有灵敏度高、易复用等优点, 在扭转量传感方面具有广泛的应用前景. 但是, 基于普通光纤布拉格光纤光栅和长周期光栅等目前应用较多的光纤扭转传感器, 普遍存在扭转灵敏度低, 机械强度弱等问题, 急需在材料和结构上进行创新突破<sup>[2-5]</sup>.

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 以其独特的特性和灵活的结构设计, 近年来引起研究者的普遍关注. 随着光子晶体光纤的研究深入, 在扭转传感器应用研究方面也取得了较大进展, 出现

了基于 PCF 长周期光纤光栅的扭转传感器<sup>[6]</sup>、基于双模双折射 PCF<sup>[7]</sup> 和保偏光纤<sup>[8]</sup> 的模式干涉型扭转传感器、基于空心光子带隙 PCF 偏振器的扭转传感器<sup>[9]</sup> 和基于 PCF 的 Sagnac 干涉仪的扭转传感器<sup>[10-12]</sup>. 在这些基于 PCF 的扭转传感器中, Sagnac 光纤干涉仪型扭转传感器因结构简单、易于制作和传感测量而被寄予厚望. 2008 年, Frazão 等基于保偏边孔 PCF 首先进行了 Sagnac 干涉仪扭转测量研究<sup>[10]</sup>. 之后基于高双折射 PCF<sup>[11]</sup> 和基于低双折射光子晶体光纤<sup>[12]</sup> Sagnac 干涉仪扭转测量研究被相继报道. 纵观近些年基于 PCF 的扭转传感器的研究历史, 提高扭转灵敏度、增大扭转角度测量范围, 是目前的发展趋势.

基于所研制的新型侧漏型 PCF, 本文提出并构建出了一种 Sagnac 干涉仪型高灵敏度光纤扭转传感器, 实验研究了在不同的扭转方向和扭转角度下的扭转响应特性. 实验结果表明, 该扭转传感器可同时测量扭曲角度和扭曲方向, 而且传感响应可

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60977033, 61177082) 和北京市自然科学基金 (批准号: 4122063) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn

重复、可逆, 扭转灵敏度高于先前报道的扭曲传感器 [2-6,9-11], 与文献 [12] 报道的扭曲传感器的扭转灵敏度相当, 在光纤扭转角度测量等方面显现出广泛的应用前景.

## 2 实验装置及工作原理

如图 1 所示, 为本文所提出的基于侧漏型 PCF 的 Sagnac 干涉仪的扭转传感器结构示意图. 它是由一个  $2 \times 2$  的 3 dB 耦合器, 一个偏振控制器 (po-

larization controller, PC) 和一段我们研制的带有涂覆层的侧漏型 PCF 组成. 偏振控制器 PC 用来调整 Sagnac 干涉仪中干涉光的相对偏振态进而优化传输谱, 光源为超连续谱光源 (SuperK compact, Koheras A/S), 光谱仪 (OSA, Yokogawa AQ6375) 用来监测传感器的输出. 侧漏型 PCF 一端夹持在固定的光学平台上, 另一端放置在一个可以转动的平台上. 转台可以沿顺时针和逆时针两个方向旋转, 旋转角度范围为  $-180^\circ$ — $180^\circ$ .

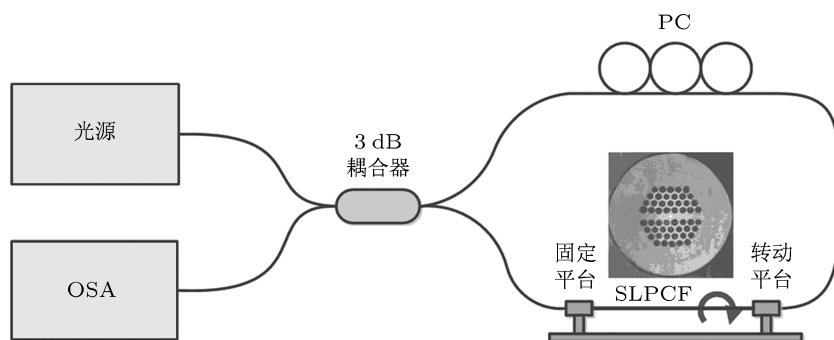


图 1 侧漏光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪型扭转传感器结构示意图

实验中所采用的侧漏光子晶体光纤是采用管束堆积工艺研制, 研制光纤的横截面结构图也在图 1 中给出, 纤芯为直径  $4 \mu\text{m} \times 2.88 \mu\text{m}$  的椭圆形掺锗芯, 在椭圆纤芯长轴方向的两侧空气孔以石英棒代替, 形成了一个线缺陷. 光纤直径为  $125 \mu\text{m}$ , 空气孔直径为  $5.48 \mu\text{m}$ , 空气孔间距值为  $8.06 \mu\text{m}$ , 掺锗芯与基底石英材料的折射率差为  $0.3\%$ . 在  $1550 \text{ nm}$  波长处, 光纤基模模场面积约为  $69.5 \mu\text{m}^2$ , 模式双折射  $B_n$  为  $0.837 \times 10^{-4}$ , 群双折射  $G_n$  为  $1.5077 \times 10^{-4}$ . 线缺陷的引入, 一方面增大了高阶模式的泄漏损耗, 有助于光纤单模传输特性的实现, 另一方面可改善光纤的双折射特性, 同时增大光纤对外界参量如扭转量的敏感性.

当顺时针或逆时针转动平台时, 侧漏型 PCF 将被扭转, 光纤中的线性缺陷在椭圆掺锗芯子两侧引入不同的应力, 从而在光纤中产生圆双折射. 因此, 线性缺陷的引入, 可有效地改善光纤的扭转特性. 由光纤扭转引入的光纤圆双折射可以表示为  $\alpha = g\tau$ , 其中  $g$  为弹光系数,  $\tau$  是扭转矢量 [4,13].

Sagnac 干涉仪传输谱输出表达式为:

$$T = \sin^2[(\phi_0 + \phi_t)/2], \quad (1)$$

其中,  $\phi_0 = 2\pi\Delta n_0 L/\lambda$ ,  $\phi_t = 2\pi\alpha L/\lambda$  分别为由光纤固有本征线性双折射和扭转引入的圆双折射引起的相位差. 这里  $\Delta n_0$  为侧漏光子晶体光纤固有本征线性双折射,  $L$  为侧漏光子晶体光纤长度,  $\lambda$  为光波长.

Sagnac 干涉仪输出干涉条纹间隔为 [10]

$$S = \lambda^2/(\Delta n_0 + \alpha)L. \quad (2)$$

由光纤扭转引起的 Sagnac 干涉仪传输谱波长偏移量可以表示为

$$\Delta\lambda = \lambda [a + \eta b_t + (1 - \eta)b_0] \Delta\tau, \quad (3)$$

其中,  $a = \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{d\tau}$  为由扭转引起的光纤长度变化量,  $b_0 = \frac{d(\Delta n_0)}{\Delta n_0 d\tau}$ ,  $b_t = \frac{d\alpha}{\alpha d\tau}$  分别为由扭转引起的光纤固有本征双折射和圆双折射的变化量,  $\eta = \frac{\alpha}{(\Delta n_0 + \alpha)}$  为由扭转引入的圆双折射占光纤总双折射的比重,  $\Delta\tau$  为光纤扭转角度.

假设光纤长度和光纤固有本征线性双折射不随光纤扭转变化的, 则  $a \approx 0$  及  $b_0 \approx 0$ . 由光纤扭转引起的 Sagnac 干涉仪传输谱波长偏移量可以近似表

达为

$$\Delta\lambda \approx \lambda\eta b_i \Delta\tau. \quad (4)$$

由(4)式可见, Sagnac 干涉仪传输谱的波长偏移量与光纤扭转角度成正比, 比例系数由光纤圆双折射占光纤总双折射的比重及光纤扭转引起的圆双折射变化量决定.

扭转引入的圆双折射和固有其本征线性双折射的共同作用, 形成了光纤椭圆双折射. 椭圆双折射与扭转角度成正比, 其左右旋方向由光纤扭转方向决定. 当光纤被顺时针扭转时, 椭圆双折射为右旋双折射; 反之, 为左旋双折射. 椭圆双折射左右旋方向的不同, 将会引起传输光相位差的不同变化, 进而引起 Sagnac 干涉仪传输谱偏移方向的不同, 即光纤的扭转方向决定了 Sagnac 干涉仪传输谱偏移的方向<sup>[3]</sup>. 通过监测 Sagnac 干涉仪传输谱的波长偏移, 可以实现对光纤扭转方向和扭转角度的同时测量.

### 3 实验结果

扭转角度的敏感系数和扭曲方向, 是扭曲传感器的两个重要参数. 对于所提出的实验方案, 重点实验研究了侧漏型 PCF 长度及环境温度对扭转传感器特性的影响.

#### 3.1 侧漏型 PCF 长度的影响

由于光纤双折射的色散特性, 对于一定长度侧漏型 PCF 光纤的扭转传感器, 由扭转引入的圆双折射和固有其本征线性双折射在不同波长处对光纤传输光相位差变化量的贡献不同.

侧漏型 PCF 长度越短, 单位长度上扭转角度变化量越大, 由扭转引入的光纤圆双折射所占的比重就越大, 相对来说光纤固有其本征双折射起的作用就越弱. 因此, 组成 Sagnac 干涉仪的侧漏型 PCF 长度对传感器的扭转特性具有非常重要的影响作用.

对于研制的侧漏型 PCF, 为保证单模传输特性, 避免二阶模对传感器的影响, 其长度须大于 13 cm. 侧漏型 PCF 采用长度为 14.85 cm 时, 传感器传输谱和波长偏移量与扭转角度和扭转方向之间的变化关系如图 2 所示. 从图 2(a) 中可以看出, 未加扭转时, 在波长 1400—1750 nm 范围内, 出现三个波谷  $V_1$ ,  $V_2$  与  $V_3$ , 对应的波长分别为 1476.62 nm, 1584.38 nm 及 1690.94 nm, 对应的波谷间隔分别为

107.76 nm 与 106.56 nm. 为保证对传感器传输谱进行无混淆的识别和判断, 要求光纤传感器的波长偏移量小于传感器传输谱干涉条纹的波长间隔, 即扭转传感波长偏移量不超过自由光谱区. 这里, 自由光谱区对应选择为 106 nm.

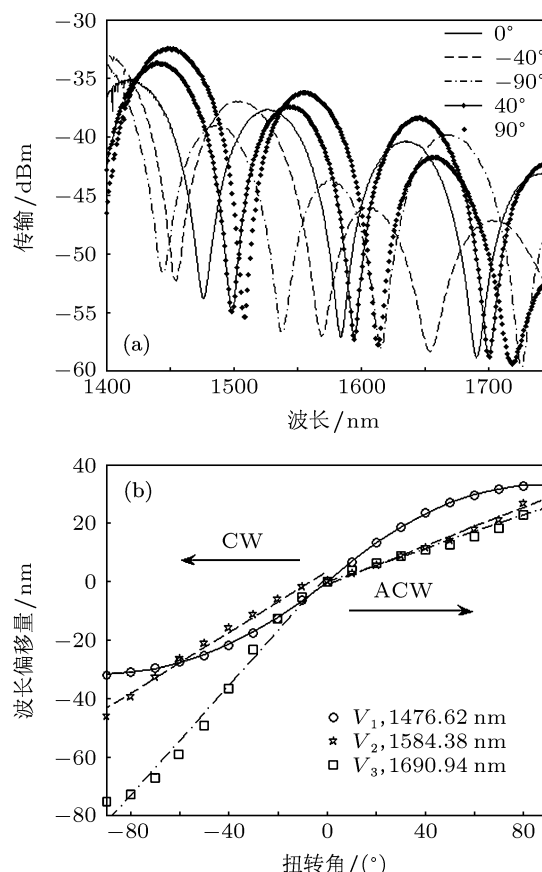


图2 侧漏型 PCF 长度为 14.85 cm 时传感器传输谱和波长偏移量随扭转角度的变化 (a) 不同扭转角度时的传感器传输谱; (b) 不同波谷处的波长偏移量与扭转角度和扭转方向的关系

改变光纤的扭转方向和扭转角度, 传感器的传输谱的波长偏移量的变化情况如图 2(b) 所示. 图中实线为波谷  $V_1$  处对实验数据的二次拟合, 虚线和点线为  $V_2$  和  $V_3$  处对实验数据的线性拟合. 可以看出, 当光纤顺时针 (clockwise, CW) 扭转时, 传感器传输谱向短波长方向偏移; 当光纤逆时针 (anti-clockwise, ACW) 扭转时, 传感器传输谱向长波长方向偏移. 在波谷  $V_1$  处, 波长偏移量和扭转角度呈二次曲线关系, 在波谷  $V_2$  和  $V_3$  处, 波长偏移量和扭转角度之间呈良好的线性关系. 不同扭转方向和波谷处的传感器平均扭转敏感系数如表 1 所示.

实验结果显示该传感器在不同扭转方向上和不同波谷处具有不同的扭转灵敏度. 当光纤顺时针扭转时, 传感器在长波长所对应的波谷处有较大的扭转灵敏度; 当逆时针扭转时, 传感器在短波

长所对应的波谷处具有较大的灵敏度. 这主要是由于光纤双折射的色散特性<sup>[9]</sup>及不同扭转方向时引入的圆双折射不同造成的<sup>[4,10]</sup>. 光纤圆双折射和固有其征线性双折射在不同扭转方向上和不同波长处对传感器的波长偏移量具有不同程度的影响. 在波谷  $V_3$  处, 扭转角度的测量范围  $-90^\circ-90^\circ$ , 扭转敏感系数可以达到  $0.9354 \text{ nm}/(^\circ)$ , 这一扭转敏感系数是前期报道的基于保偏边孔光纤 Sagnac 干涉仪的 11.7 倍<sup>[10]</sup>, 是基于高双折射型 PCFSagnac 干涉仪的 15.6 倍<sup>[11]</sup>, 是基于应力型长周期空气孔光纤光栅扭转传感器扭转敏感系数的 49 倍<sup>[6]</sup>, 是基于空心带隙光纤偏振计扭转传感器扭转敏感系数的 187 倍<sup>[9]</sup>, 是基于超长周期光栅、单模光纤长周期光栅及螺旋长周期光栅扭转传感器扭转敏感系数的 17—99.5 倍<sup>[3-5]</sup>, 是布拉格光栅扭转传感器扭转敏感系数的 10.2 倍<sup>[2]</sup>. 由于记录信号的光谱仪精度限制, 该传感器扭转角度的测量精度为  $0.053^\circ-0.175^\circ$ .

表 1 不同光纤扭转方向三个波谷处的平均扭转敏感系数

	$V_1$	$V_2$	$V_3$
CW/(nm/°)	0.3496	0.5211	0.9354
ACW/(nm/°)	0.3683	0.3293	0.2848

增大侧漏型 PCF 的长度, 当光纤长度为 32 cm 时, 该传感器扭转特性如图 3 所示. 可以看出, 增大侧漏型 PCF 长度时, 传输谱波谷的波长间隔减小. 未加扭转时, 在 1450—1750 nm 波长范围内, 出现了四个波谷, 分别位于波长 1525.4 nm, 1584.4 nm, 1641 nm 及 1695.6 nm 处, 相邻波谷间的波长间隔分别为 59 nm, 56.6 nm 及 54.6 nm, 自由光谱区对应选择为 54 nm. 加以扭转, 在波长 1525.4 nm 处, 波谷的波长偏移量与光纤扭转角度呈二次曲线关系; 在波长 1584.4 nm, 1641 nm 及 1695.6 nm 处, 波谷的波长偏移量与光纤扭转角度呈良好的线性关系, 此时传感器最大的扭转敏感系数为  $0.2132 \text{ nm}/(^\circ)$ , 光纤扭转角度的测量范围扩展至  $-180^\circ-180^\circ$ .

可见, 侧漏型 PCF 长度对传感器的扭转特性, 如扭转敏感系数和扭转角度测量范围起着决定性作用. 当光纤长度较短时, 扭转传感器具有较大的扭转灵敏度, 扭转角度测量范围小; 光纤长度增加时, 传感器扭转灵敏度减小, 扭转角度测量范围增大. 这是因为随着侧漏型 PCF 长度的增加, 单位长度上扭转角度变化量的减小, 一方面会降低扭转角度传感灵敏度, 另一方面也会扩展扭转角度测量范

围. 然而, 为了得到较好的传感器传输谱, 避免光纤二阶模对传感器扭转特性的影响, 侧漏型 PCF 的长度不能太短. 传感器的扭转灵敏度和扭转角度测量范围是一对折中变量, 需要根据实际需求设计传感器中侧漏型 PCF 的长度. 当需要较高的测量灵敏度时, 可以采用长度较短的侧漏型 PCF; 反之, 当需要较大的扭转角度测量范围时, 可以采用长度较长的侧漏型 PCF.

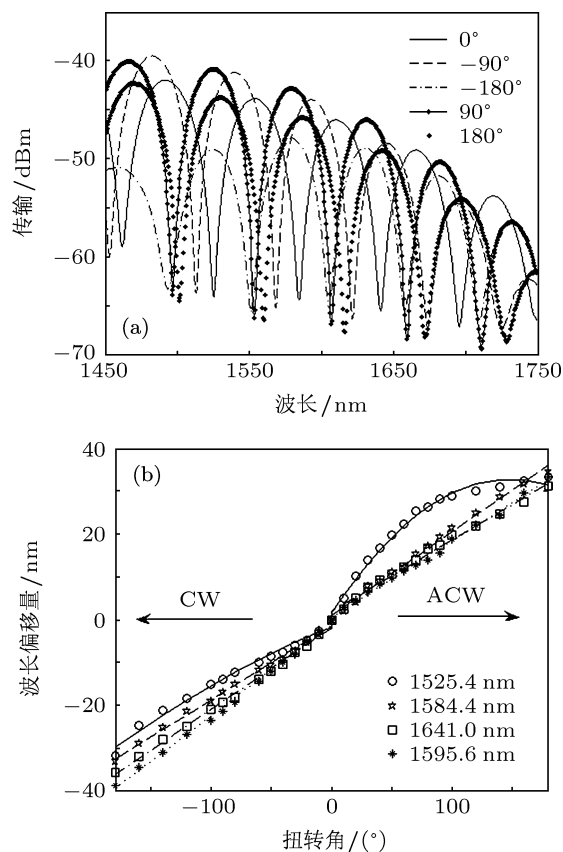


图 3 侧漏型 PCF 长度为 32 cm 时传感器传输谱和波长偏移量随扭转角度的变化 (a) 不同扭转角度时的传感器传输谱; (b) 不同波谷处的波长偏移量与扭转角度和扭转方向的关系

### 3.2 温度的影响

侧漏型 PCF 的结构设计中采用了椭圆型掺锗芯, 掺锗材料的热光系数大于纯硅材料的热光系数, 并且这两种材料都具有不容忽略的正热膨胀系数, 导致侧漏型 PCF 的双折射随着温度增加而增大.

为分析温度变化对基于侧漏型 PCF 的 Sagnac 干涉仪扭转传感器特性的影响, 选用长度为 14.85 cm 的侧漏型 PCF 搭建 Sagnac 干涉仪传感器进行实验研究. 实验得到传感器传输谱随温度的变化情况如图 4 所示, 温控装置的温度变化控制范围为  $10^\circ\text{C}-47^\circ\text{C}$ , 温度控制精度为  $0.1^\circ\text{C}$ . 可见, 传输谱波谷随着温度的增加向长波长方向偏移,

波长偏移量与温度呈良好的线性关系, 在波谷  $V_1$ ,  $V_2$  及  $V_3$  处的温度敏感系数分别为  $0.0681 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,  $0.0571 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  及  $0.0508 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ . 这一温度敏感系数, 明显小于单模光纤长周期光栅扭转传感器<sup>[3-5]</sup>及保偏边孔光纤 Sagnac 干涉仪扭转传感器的温度敏感系数<sup>[10]</sup>. 但是, 将温度变化引起的波长偏移量折算成扭转角度测量误差, 对应为  $0.054^\circ/\text{C}$ — $0.178^\circ/\text{C}$ , 这已与传感器扭转角度测量精度相当. 因此, 为了实现高精度的扭转角度测量, 需要排除温度干扰的影响.

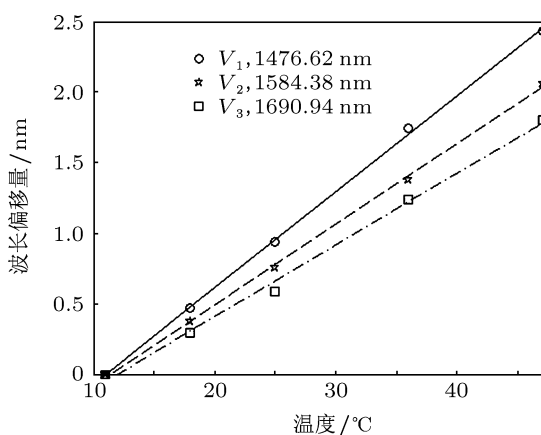


图4 传感器不同波谷处的波长偏移量与温度的关系, 直线是对实验数据的线性拟合

目前, 减小温度的交叉影响, 主要有两种方法, 一是增加测温元件, 如布拉格光栅或长周期光栅<sup>[14]</sup>, 但这种方法会增加测量系统的复杂度及成本; 二是采用具有足够自由度的矩阵法, 实现温度和被测量物理量的同时测量, 进而剔除温度的影响<sup>[10]</sup>.

当顺时针旋转时, 在波谷  $V_2$  与  $V_3$  处, 其波长偏移量与扭转角度变化成线性关系, 同时, 与温度变化也为线性关系, 因此, 考虑扭转和温度共同作用时, 导致波谷  $V_2$  处的波长偏移量  $\Delta\lambda_1$  可以用下式来描述:

$$\Delta\lambda_1 = 0.5221\Delta\tau + 0.0571\Delta T. \quad (5)$$

同理, 由波谷  $V_3$  处的波长偏移量  $\Delta\lambda_2$  可以用下式来描述:

$$\Delta\lambda_2 = 0.9354\Delta\tau + 0.0508\Delta T, \quad (6)$$

其中,  $\Delta\tau$  ( $^\circ$ ) 为光纤扭转角度,  $\Delta T$  ( $^\circ\text{C}$ ) 为环境温度变化量;  $\Delta\lambda_1$  (nm) 和  $\Delta\lambda_2$  (nm) 分别为  $V_2$  (1584.38 nm) 及  $V_3$  (1690.94 nm) 处波谷的波长偏移量.

由 (5) 和 (6) 式可以得到波长偏移量与扭转角度和环境温度的变化量的可用下式的矩阵来表示:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5221 & 0.0571 \\ 0.9354 & 0.0508 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\tau \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由此可以推出光纤扭转角度和环境温度变化量与相应波谷处的波长偏移量的变化关系矩阵, 即测量矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta\tau \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.885 & 2.119 \\ 34.722 & -19.343 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} \quad (\text{顺时针}). \quad (8)$$

由测量矩阵可知, 当光纤被顺时针扭转时, 通过选择传感器传输谱中两个波谷  $V_2$  与  $V_3$ , 并监测其波长偏移量, 采用上述矩阵法可以得到对应的光纤扭转角度和温度的变化量, 可以实现温度和扭转角度的同时测量, 进而剔除温度对扭转角度测量的干扰.

同理当光纤被逆时针扭转时, 在波谷  $V_2$  和  $V_3$  处, 波长偏移量和扭转角度之间呈良好的线性关系, 通过选择传感器传输谱中两个波谷  $V_2$  与  $V_3$ , 并监测其波长偏移量, 根据实验测量的温度和扭转角度敏感系数, 可以得到测量矩阵

$$\begin{bmatrix} \Delta\tau \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{10^{-2}} \begin{bmatrix} 1.089 & -1.224 \\ -6.107 & 7.061 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} \quad (\text{逆时针}). \quad (9)$$

通过测量这两个波谷处的波长偏移量, 可以实现温度和扭转角度的同时监测与测量, 进而剔除环境温度对扭转角度测量结果的影响. 在侧漏型 PCF 的长度为 14.85 cm 时, 扭转角度和温度的测量精度分别为  $\pm 0.2^\circ$  和  $\pm 2.7^\circ\text{C}$ .

## 4 结论

本文提出了一种基于侧漏型 PCF 的 Sagnac 干涉仪型的高灵敏度光纤扭转传感器, 实验研究了在不同侧漏型 PCF 长度下的传感特性, 以及温度对传感器的影响. 实验结果表明, 侧漏型 PCF 的长度对传感器的扭转敏感系数和扭转角度测量范围起着决定性作用. 当光纤长度较短时, 扭转传感器具

有较大的扭转灵敏度,但扭转角度测量范围小;光纤长度增加时,传感器扭转灵敏度减小,扭转角度测量范围增大.在侧漏型 PCF 长度为 14.85 cm 时,传感器的扭转敏感系数可以达到 0.9354 nm/(°),扭转角度测量范围为 -90°—90°;当光纤长度为 32 cm 时,传感器最大的扭转敏感系数降为 0.2132 nm/(°),但光纤扭转角度的测量范围扩展至 -180°—180°.当顺时针扭转时,传输谱向短波长方向偏移,当逆时针扭转时,传输谱向长波长方向偏移,通过相应波谷波长的偏移方向,可以实现扭曲方向的测量.该传感器的响应是可逆可重复的,其 0.9354

nm/(°) 的扭转灵敏度高于先前报道的扭曲传感器 [2-6,9-11],与文献 [12] 报道的扭曲传感器的相当.此外,在侧漏型 PCF 中因椭圆掺锗芯的引入,增大了温度的影响.实验结果显示,波谷波长偏移量随温度的变化呈线性关系,侧漏型 PCF 长度为 14.85 cm 时温度导致扭转角度的测量误差对应为 0.054°/°C—0.178°/°C.为了消除温度对扭转角度测量的干扰,本文引入二维测量矩阵法实现了对温度和扭转角度的同时测量,进而环境温度变化对扭转角度的测量值的影响.

- 
- [1] Lemarquand V 1999 *IEEE Trans. Magn.* **35** 4503  
 [2] Zhang W G, Kai G Y, Dong X Y, Yuan S Z, Zhao Q D 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 1154  
 [3] Wang Y P, Rao Y J 2004 *IEEE Electron. Lett.* **40** 164  
 [4] Rao Y J, Zhu T, Mo Q J 2006 *Opt. Commun.* **266** 187  
 [5] Oh S, Lee K R, Paek U C, Chung Y J 2004 *Opt. Lett.* **29** 1464  
 [6] Ceballos-Herrera DE, Torres-Gómez I, Martínez-Ríos A, García L, Sánchez-Mondragón J J 2010 *IEEE Sensor J.* **10** 1200  
 [7] Frazão O, Jesus C, Baptista J M, Santos J L, Roy P 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** 1277  
 [8] Nalawade S M, Harnol S S, Thakur H V 2012 *IEEE Sensors J.* **12** 2614  
 [9] Xuan H F, Jin W, Zhang M, Ju J, Liao Y B 2009 *Opt. Express* **17** 13246  
 [10] Frazão O, Silva S O, Baptista J M, Santos J L, Statkiewicz-Barabach G, Urbanczyk W, Wojcik J 2008 *Appl. Opt.* **47** 4841  
 [11] Kim H M, Kim T H, Kim B K, Chung Y J 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 1539  
 [12] Zu P, Chan C C, Jin Y, Gong T, Zhang Y, Chen L H, Dong X 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 920  
 [13] Galtarossa A, Palmieri L 2002 *J. Lightwave Technol.* **20** 1149  
 [14] Gong H P, Chan C C, Zu P, Chen L H, Dong X Y 2010 *Opt. Commun.* **283** 3142

# A side-leakage photonic crystal fiber torsion sensor for measuring torsion angle and determining torsion direction simultaneously\*

Lou Shu-Qin<sup>†</sup> Lu Wen-Liang Wang Xin

(School of Electronic and Information Engineer, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 11 October 2012; revised manuscript received 4 December 2012)

## Abstract

A highly sensitive torsion sensor, which can measure the torsion angle and determine the torsion direction simultaneously, is proposed and experimentally demonstrated by using side-leakage photonic crystal fiber (SLPCF) based Sagnac loop. When the SLPCF is turned in the clockwise direction, the transmission spectra of the torsion sensor shift towards the shorter wavelength side; whereas the transmission spectra of the torsion sensor shift towards the longer wavelength side when the SLPCF is turned in anticlockwise direction. Experimental results demonstrate that the length of the SLPCF inserted into Sagnac loop plays an important role for determining the torsion sensitivity and the torsion angle range. For the SLPCF with shorter length, the torsion sensor has the larger torsion sensitivity, but the torsion angle measuring range would be decreased. The opposite situation takes place for the SLPCF with longer length used in the torsion sensor. When the length of SLPCF is 14.85 cm, the torsion sensitivity of the sensor is up to 0.9354 nm/(°) and the torsion angle range from  $-90^\circ$  to  $+90^\circ$ ; When we increase the length of SLPCF to 32 cm, the torsion sensitivity of the sensor gets down to 0.2132 nm/(°), but the torsion angle range can be expanded as from  $-180^\circ$  to  $+180^\circ$ . To eliminate the perturbation of environmental temperature, we adopt a two-dimensional measuring matrix to achieve simultaneous measurements of the torsion angle and temperature. In other words, using two-dimensional measuring matrix can also eliminate the perturbation of the environmental temperature to the measured result of torsion angle.

**Keywords:** optical fiber sensor, side-leakage photonic crystal fiber, torsion sensor, Sagnac interferometer

**PACS:** 07.07.Df, 42.79.Gn, 78.67.Pt, 07.60.Ly

**DOI:** 10.7498/aps.62.090701

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60977033, 61177082), and the Beijing Natural Science Foundation, China (Grant No. 4122063).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn