

基于保偏光子晶体光纤的 长尾式光纤环镜角度传感器

吴迪^{1,2}, 赵勇^{1,2}

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对扭转角度的精确测量问题, 提出一种基于保偏光子晶体光纤的长尾式光纤环镜角度传感器. 采用对温度不敏感的保偏光子晶体光纤作为扭转角度的传感单元, 当保偏光子晶体光纤被旋转一定角度时, 其双折射值会发生改变, 进而影响光在环镜系统内的干涉情况, 最终表现为光谱仪上干涉谱的移动. 理论推导出系统的传感规律后, 实验测得该传感器在扭转角度为 $0^\circ \sim 101^\circ$ 的范围内, 灵敏度为 $0.0617 \text{ nm}/(^{\circ})$; 若光谱仪分辨率为 0.01 nm , 则系统最小分辨力为 0.16° , 并具有超低的温度灵敏度 $-0.6 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$. 该角度传感器具有体积小、成本低、对温度不敏感及可用于远距离传输等优点.

关 键 词: 保偏光子晶体光纤; 长尾式光纤环镜; 角度传感器; 高灵敏度; 温度不敏感

中图分类号: TH 74 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)02-0161-04

Torsion Sensor Based on Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fiber Loop Mirror with an Output Port Probe

WU Di^{1,2}, ZHAO Yong^{1,2}

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHAO Yong, E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn)

Abstract: Focused on measuring twist angle precisely, a torsion sensor was proposed which was based on a section of polarization-maintaining photonic crystal fiber (PM-PCF) outside an optical fiber loop. Due to the low thermal coefficient of PM-PCF, the PM-PCF was used as the sensing element. When the PM-PCF is rotated with a certain angle, the birefringence of the PM-PCF will change either. The interference within the fiber loop mirror was observed via the optical spectrum analyzer (OSA). The response of the sensor was deduced theoretically and experimentally demonstrated. Experimental result showed that the sensitivity of the developed torsion sensor could reach $0.0617 \text{ nm}/(^{\circ})$ in the range from 0° to 101° and a resolution of 0.16° was achieved since the OSA had a wavelength measurement resolution of 0.01 nm . In addition, the sensor has an ultra-low temperature sensitivity of $-0.6 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$. The proposed fiber-optic torsion sensor is attractive due to its compact size, low cost, insensitivity to temperature and suitability for long-distance transmission beyond what conventional sensors can offer.

Key words: PM-PCF (polarization-maintaining photonic crystal fiber); fiber loop mirror with an output port probe; torsion sensor; high sensitivity; temperature-insensitive

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 是由带气孔的微结构包层和纯二氧化硅的纤芯组成^[1], 和传统的光纤相比, PCF 具有很多独特的

性能^[2]. PM-PCF (polarization-maintaining PCF) 作为 PCF 的改良结构, 将纤芯附近的两个小空气孔改成较大的空气孔来获得更高的双折射值, 通

收稿日期: 2014-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61273059, 61203206); 流程工业综合自动化国家重点实验室基础科研业务费资助项目 (2013ZCX02-05); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (N140404023).

作者简介: 吴迪 (1989-), 女, 辽宁鞍山人, 东北大学博士研究生; 赵勇 (1973-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

常能达到 10^{-3} 数量级;另外,PM-PCF 是由纯净的二氧化硅制成,因此具有极低的热光系数,非常适用于制作温度不敏感设备。

光纤环境(fiber loop mirror, FLM)结构简单,体积小,灵敏度高,一直是近几年来被广泛研究的传感结构^[3]. 研究者在传统单模光纤环境中熔接一段高双折射光纤^[4],利用其光谱干涉现象来实现对外界参量的检测^[5-6]. 但是由于传感单元在 FLM 内部,外界的扰动会对测量精度造成影响,因此 FLM 不适用于恶劣的工作环境和远距离传输. 2011 年, Frazao 等^[7]对上述光纤环境结构进行了改进,将传感单元以探头形式与 FLM 分离,即长尾式光纤环境结构。

扭转角度在产品结构生产和机械测量等领域是一个很重要的性能参数,因此参数的精确测量尤为重要. 目前,已有文献^[8-10]报道过基于布拉格光纤光栅(fiber Bragg grating, FBG)、长周期光纤光栅(long period grating, LPG)和保偏光纤(polarization-maintaining fiber, PMF)的扭转角度传感器. 其中,基于 FBG 的扭力传感器^[8]是将 FBG 绕到一个轴上,通过扭转轴使 FBG 产生形变,此种结构的缺点是:扭转角度的测量范围受到轴的旋转角度的限制,而且 FBG 对温度十分敏感,外界温度变化会对测量结果产生影响. 基于 LPG 的扭转角度传感器^[9]是利用一段被氢氟酸腐蚀掉包层的 LPG 实现传感,实验测得灵敏度为 $6.28 \times 10^{-4} \text{ nm}/(^{\circ})$;基于 PMF 的扭转角度传感器^[10]是将 FBG 和 PMF 相结合,获得了 0.3° 的最小分辨力。

本文将 PM-PCF 和长尾式光纤环境二者有机结合,利用 PM-PCF 的高双折射效应及温度不敏感特性和长尾式光纤环境的实际应用价值设计了一种角度传感器,在 PM-PCF 传感单元末端镀一层银膜,当 PM-PCF 传感单元被扭转一定角度时,环境内的干涉会受到影响,从光谱仪上可以观测到干涉谱的偏移。

1 传感方案设计

本文提出一种基于 PM-PCF 的长尾式光纤环境角度传感器,如图 1 所示。

中心波长为 1550 nm 的宽谱光源发出的光经过耦合器 1 进入光纤环境,沿着顺时针和逆时针传播的两束光经过耦合器 2 之后,一束光经过通道 7 与传感区域相连,在 PM-PCF 传感单元的末端镀有银膜形成反射式的探头结构,另一束光

经过通道 8 插入折射率匹配液. 显然,传输路径为 $3 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 4$ 和 $4 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 5 \rightarrow 3$ 的两束光波由于 PM-PCF 的作用将产生周期分布的干涉谱,返回的光谱由光谱仪接收。

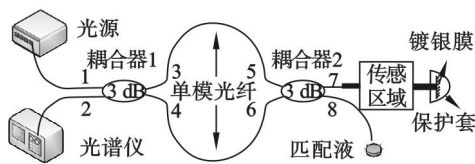


图 1 长尾式光纤环境角度传感器原理图

Fig. 1 Schematic of torsion sensor based on FLM with an output port probe

系统的传感区域示意图如图 2a 所示,一段 PM-PCF 作为扭转角度施加的传感单元,与通道 7 的单模光纤低损耗熔接之后固定在两个同轴支架上,插图所示为实验中所用的 PM-PCF 截面,其小孔直径 $3.2 \mu\text{m}$,大孔直径 $7 \mu\text{m}$,孔间距 $5.46 \mu\text{m}$. 如图 2b 所示,通过旋转 PM-PCF 的旋转端来施加扭转角度,支架上有角度的标定。

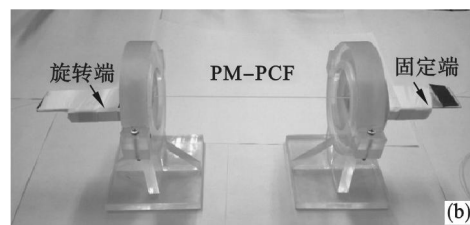
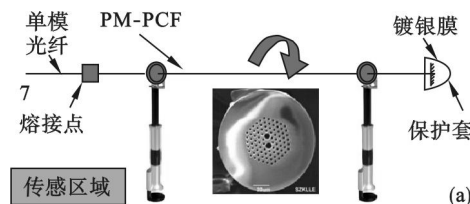


图 2 传感区域示意图和扭转角度实验装置图

Fig. 2 Schematic of the sensing area and experimental setup for applying the twist angle

(a) —传感区域示意图; (b) —扭转角度实验装置图。

2 理论分析

当传感单元被旋转一定角度 θ 时, PM-PCF 中会产生相位延迟 $\Phi_R(\theta)$, 并且是扭转角度的函数^[11]:

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

式中: $\gamma = \sqrt{(\Delta\beta/2)^2 + (\theta - \alpha)^2}$; $\rho = \Delta\beta/[2(\theta - \alpha)]$; z 是光纤扭转的长度; $\Delta\beta$ 是光纤固有的线双折射; α 是由应力引起的偏振态旋转角, 与光纤扭

转角度 θ 成正比关系, $\alpha = g\theta$, g 是一个常量, 与光纤材料的弹光系数有关, 对于普通的光纤而言, $g = 0.08$.

当扭转角度发生变化时, PM-PCF 的双折射会发生改变, 光谱移动的相位差可以表示为

$$\Phi = \Phi_R(\theta) + \Phi_0. \quad (2)$$

对于 PM-PCF, 光纤扭曲造成的相位延迟要强于光纤固有的双折射效应, 根据文献[12]可知, 由于光纤被扭转而造成的相位延迟可以表示为

$$\Phi_R(\theta) = \Delta\beta \frac{\sin[(\theta - \alpha)z]}{\theta - \alpha}. \quad (3)$$

对于已经制成的光纤, 原始的相位延迟 Φ_0 是已经确定好的, 所以干涉谱的移动 $\Delta\lambda$ 和扭转角度 θ 的关系可表示为

$$\Delta\lambda \sim \left(\frac{\partial \Phi_R(\theta)}{\partial \theta} \right) \Delta\theta. \quad (4)$$

从式(3)可以看出, 其图形类似于 Sinc 函数, 结合式(4)可知, $\Delta\lambda$ 和扭转角度 θ 也呈 Sinc 函数关系, 且灵敏度由 $\partial \Phi_R(\theta) / \partial \theta$ 决定.

3 实验结果与分析

将 PM-PCF 扭转一定的角度, 从光谱仪上可以观察到如图 3 所示的干涉谱.

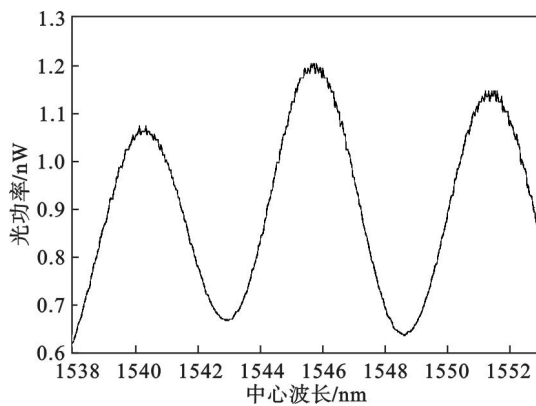


图3 一定扭转角度下的干涉谱

Fig. 3 Interference spectrum at a certain twist angle

从图 3 可以看出, 干涉峰中夹杂了很多噪声信号, 经分析主要为熔接点不匹配带来的噪声和光源的噪声, 为了准确判断波峰的位置, 本文采用 FIR 低通数字滤波器对数据进行滤波处理.

实验中将 PM-PCF 从 0° 开始, 每次增加 11.25° , 扭转到 405° , 分别记录 PM-PCF 扭转不同角度后的干涉谱情况, 经过滤波处理之后的数据如图 4 所示.

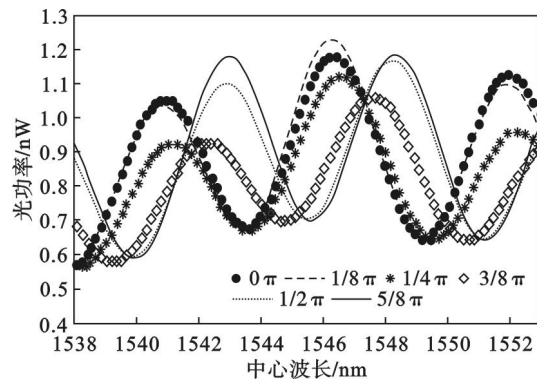


图4 不同扭转角度下的干涉谱

Fig. 4 Interference spectra at different twist angles

考虑到干涉谱的清晰度, 图 4 仅表示出每隔 22.5° 的干涉谱情况, 提取出中波长为 1547 nm 附近的干涉峰随扭转角度增大的变化情况, 结果如图 5 所示.

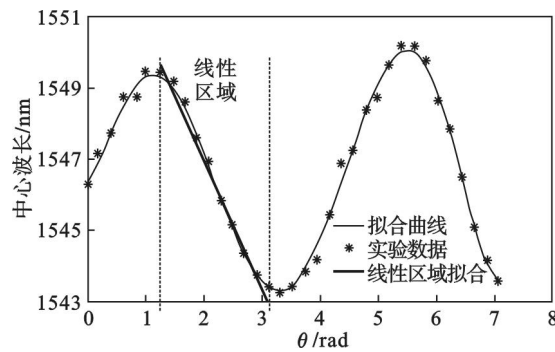


图5 干涉峰 (1547 nm) 的偏移量与扭转角度的关系

Fig. 5 Relationship between the wavelength shifts and the twist angle at 1547 nm

从图 5 可以看出, 随着扭转角度以 11.25° 的步长增加, 干涉峰中心波长的变化呈 Sinc 函数形式, 与上文理论分析相符, 虚线范围内 ($67.5^\circ \sim 168.75^\circ$) 为线性变化区域, 对其进行线性拟合后其灵敏度约为 $0.0617 \text{ nm}/(^\circ)$, 实验中使用的光谱仪分辨率为 0.01 nm , 因此该传感器的最小分辨力可达 0.16° , 实际应用中, 可以先把保偏光子晶体光纤预先扭转一定角度, 使其工作在线性区域内, 因此其测量范围可达 $0^\circ \sim 101.25^\circ$.

另外, 考虑到 PM-PCF 的双折射效应也受温度的影响, 对该传感器做一个温度响应的测试, 将实验装置放置于温控箱中, 控制温度从 20°C 升高到 70°C , 每隔 5°C 测量一次干涉谱. 实验发现, 共振峰的干涉谱一共向短波长方向偏移了 30 pm , 即该扭转角度传感器的温度灵敏度为 $0.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 而在进行扭转角度测量时, 室温控制在 $(27 \pm 2)^\circ\text{C}$, 波长最大偏移为 2.4 pm , 可以忽略不计.

4 结 论

1) 本文将保偏光子晶体光纤和长尾式光纤环境二者有机结合,利用 PM-PCF 的高双折射效应及温度不敏感特性和长尾式光纤环境的独立反射式探头设计了一种新型扭转角度传感器。

2) 从理论上分析了方案的可行性:当 PM-PCF 被扭转一定角度时,其双折射值发生改变,最终可由光谱仪观测到干涉谱的偏移。

3) 实验测得,本文提出的基于保偏光子晶体光纤的长尾式光纤环境角度传感器,在测量范围为 $0^\circ \sim 101.25^\circ$ 时,灵敏度约为 $0.0617 \text{ nm}/(^\circ)$,若光谱仪分辨率为 0.01 nm ,则该传感器的最小分辨力可达 0.16° 。

参考文献:

- [1] Knight J C, Russell P S J. New ways to guide light [J]. *Science*, 2002, 296(5566): 276 – 277.
- [2] Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Wadsworth W J, et al. Highly birefringent photonic crystal fibers [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(18): 1325 – 1327.
- [3] Nagasaki A, Saitoh K, Koshiba M. Polarization characteristics of photonic crystal fibers selectively filled with metal wires into cladding air holes [J]. *Optics Express*, 2011, 19(4): 3799 – 3808.
- [4] Qian W, Zhao C L, He S, et al. High-sensitivity temperature sensor based on an alcohol-filled photonic crystal fiber loop

mirror [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(9): 1548 – 1550.

- [5] Wu C, Fu H Y, Au H Y, et al. High-sensitivity salinity sensor realized with photonic crystal fiber Sagnac interferometer [C] // 21st International Conference on Optical Fiber Sensors. Ottawa, 2011: 77531B.
- [6] Roither S, Verhoef A J, Mücke O D, et al. Sagnac interferometric multipass loop amplifier [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 25121 – 25129.
- [7] Frazao O, Silva R M, Santos J L. High-birefringent fiber loop mirror sensors with an output port probe [J]. *Photonics Technology Letters*, 2011, 23(2): 103 – 105.
- [8] Tian X G, Tao X M. Torsion measurement using fiber Bragg grating sensors [J]. *Experimental Mechanics*, 2001, 41(3): 248 – 253.
- [9] Wang L A, Lin C Y, Chen G W. A torsion sensor made of a corrugated long period fibre grating [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(7): 793 – 799.
- [10] Lo Y L, Chue B R, Xu S H. Fiber torsion sensor demodulated by a high-birefringence fiber Bragg grating [J]. *Optics Communications*, 2004, 230(4): 287 – 295.
- [11] Barlow A J, Ramskov-Hansen J J, Payne D N. Birefringence and polarization mode-dispersion in spun single-mode fibers [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(17): 2963.
- [12] 祖鹏, 向望华, 金永兴. 基于低双折射光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪的超低温度系数扭曲传感器 [J]. *光子学报*, 2011, 40(9): 1434.

(Zu Peng, Xiang Wang-hua, Jin Yong-xing. Fabrication of temperature-insensitive twist sensor using low birefringent photonic crystal fiber based Sagnac interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(9): 1434.)

(上接第 160 页)

参考文献:

- [1] Zitová B, Flusser J. Image registration methods: a survey [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(11): 977 – 1000.
- [2] Moravec H. Rover visual obstacle avoidance [C] // Proceedings of the Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence. Vancouver: Springer-Verlag, 1981: 785 – 790.
- [3] Harris C, Stephens M J. A combined corner and edge detector [C] // Allvey Vision Conference. Sydney: University of Sydney, 1988: 147 – 152.
- [4] Shi J, Tomasi C. Good features to track [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE, 1994: 593 – 600.
- [5] Smith S M, Brady J M. SUSAN—a new approach to low level image processing [J]. *Journal of Vision*, 1997, 23(1): 45 – 78.
- [6] Rosten E, Drummond T. Machine learning for high-speed

corner detection [C] // European Conference on Computer Vision. Graz: Springer-Verlag, 2006: 430 – 443.

- [7] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant key points [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91 – 110.
- [8] Herbert B, Andreas E, Tinne T. SURF: speeded up robust features [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346 – 359.
- [9] Calonder M, Lepetit V, Strecha C. BRIEF: binary robust independent elementary features [C] // 11th European Conference on Computer Vision (ECCV). Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 402 – 411.
- [10] Ethan R, Vincent R, Kurt K. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF [C] // 13th International Conference on Computer Vision (ICCV). Piscataway: IEEE, 2011: 1673 – 1678.
- [11] Alahi A. FREAK: fast retina keypoint [C] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Washington D C: IEEE Computer Society, 2012: 510 – 517.