

基于锥形光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉的曲率传感器实验研究

付兴虎^{1,2} 谢海洋¹ 朱洪彬¹ 付广伟^{1,2} 毕卫红^{1,2}

¹燕山大学信息科学与工程学院,河北 秦皇岛 066004

²河北省特种光纤与光纤传感重点实验室,河北 秦皇岛 066004

摘要 提出了一种基于锥形光子晶体光纤(TPCF)马赫-曾德尔干涉的曲率传感器。它是通过将光子晶体光纤(PCF)两端与普通单模光纤(SMF)电弧熔接,并对PCF进行拉锥构成的SMF-TPCF-SMF结构,总长度为20 mm。在传感器制备过程中,通过调节熔接机的相关参数,使得熔接点处PCF空气孔完全塌陷,以便更好地激发包层模式,同时通过选择合适的PCF长度和拉锥长度使得传感器具有较高的曲率灵敏度。实验结果表明,随着传感器曲率的不断增大,其传输光谱出现明显蓝移现象。在0~1.16 m⁻¹的曲率范围内,其曲率灵敏度为-5.39297 nm/m⁻¹,且具有较好的线性度。该传感器具有结构简单、易于制造、灵敏度高等优点,且与其他结构传感器相比,能够消除温度的交叉敏感问题,可用于桥梁、建筑、道路等曲率传感领域。

关键词 光纤光学; 锥形光子晶体光纤; 马赫-曾德尔干涉仪; 曲率

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0506002

Experimental Research of Curvature Sensor Based on Tapered Photonic Crystal Fiber Mach-Zehnder Interferometer

Fu Xinghu^{1,2} Xie Haiyang¹ Zhu Hongbin^{1,2} Fu Guangwei^{1,2} Bi Weihong^{1,2}

¹School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract A curvature sensor is proposed base on tapered photonic crystal fiber(TPCF) Mach-Zehnder interferometer. A section of PCF is tapered after splicing both end of it with single-mode fiber(SMF), then a SMF-TPCF-SMF structure with 20 mm length is fabricated. By controlling the arc discharge parameters, the air holes of the PCF near the splicing area are collapsed completely. So it can motivate the cladding modes better. Moreover, the splicing and tapering length of PCF are determined to make the sensor produce high curvature sensitivity. The experimental results show that the transmission spectrum of sensor appears blue shift obviously with the curvature increasing, and the shift of the peaks near 1590 nm is -6.06 nm. The curvature sensitivity of this sensor is -5.39297 nm/m⁻¹ in the range of 0~1.16 m⁻¹ curvature, and this sensor also has good linearity. This curvature sensor has the advantages of simple structure, easy manufacturing, high sensitivity and immune to the temperature cross-sensitivity compared to other sensors, so it can be used for measuring curvature in bridges, buildings, roads and so on.

Key words fiber optics; tapered photonic crystal fiber; Mach-Zehnder interferometer(MZI); curvature

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.5295

收稿日期: 2014-10-16; 收到修改稿日期: 2014-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(61205068)、河北省自然科学基金(F2012203148)、河北省科技计划项目(13273305, 12963550D)、河北省高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2014057)、燕山大学“新锐工程”人才支持计划、燕山大学信息学院优秀青年基金(2014201)

作者简介: 付兴虎(1981—),男,博士,讲师,主要从事特种光纤传感等方面的研究。E-mail: fuxinghu@ysu.edu.cn

1 引 言

弯曲测量是生产生活中一个极为重要的问题,如桥梁、铁轨的弯曲变形、道路的路基沉降以及一些高精度仪器设备和重要建筑结构的弯曲形变等^[1-2]。测量弯曲的传统方法主要是电学方法,但这种方法有很多局限性,如易受电磁干扰、不便于分布式测量和遥感遥测等,而基于光纤结构的弯曲传感器则能有效地解决上述问题。近年来,随着光纤传感技术的快速发展,基于不同结构的光纤弯曲传感器在国内外已有诸多的研究和报道,如基于光纤光栅^[3-7]、多芯光纤^[8-9]、迈克耳孙结构^[10]、各种微型结构^[11-15]等。虽然这些传感器都能较好地应用于曲率的测量,但还存在基于光纤光栅的曲率传感器制作复杂、基于多芯光纤的曲率传感器成本较高等问题,且上述绝大部分传感器都存在温度交叉敏感问题,严重影响了传感器的测量精度。

本文提出了一种基于锥形光子晶体光纤(TPCF)的马赫-曾德尔干涉型曲率传感器。该传感器制作简单,仅需在一较短的光子晶体光纤(PCF)两端电弧熔接普通单模光纤(SMF)并拉锥即可制得。对PCF进行拉锥处理,可以增加传感区域的长度,并增大纤芯模式与包层模式的耦合程度。因此,能有效地提高传感器的灵敏度^[16]。同时,控制传感器较短的锥区长度,可有效保证器件的抗拉强度,使得该传感器在使用的过程中不会轻易折断。此外,本课题组前期已经对TPCF的温度传感特性进行了深入研究,发现其具有温度不敏感特性,传感器的温度灵敏度仅为0.0018 nm/°C,详情见参考文献[17]。因此,本文所提出的曲率传感器能够较好地解决曲率测量过程中常见的温度交叉敏感问题,提高了测量的准确度,也表明了该传感器具有实现双参数测量的潜在应用价值。

2 基本原理及理论分析

基于TPCF的弯曲传感器的结构如图1所示,它是通过将一段PCF的两端分别与SMF熔接,再进行拉锥处理而制得的。

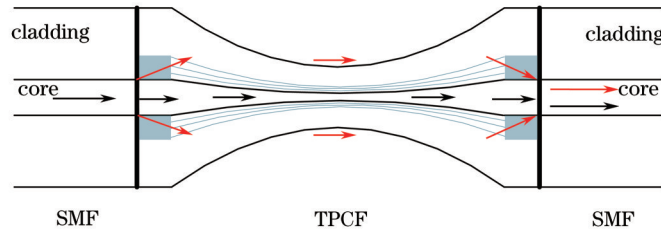


图1 SMF-TPCF-SMF结构图

Fig.1 Structure of SMF-TPCF-SMF

如图1所示,光从输入端单模光纤进入,在经过第一个熔接点后,一部分光耦合至PCF的纤芯中以纤芯模式传输;另一部分光耦合至PCF的包层中以包层模式继续传输。PCF经拉锥处理后其横截面结构按比例缩小,即其内部的空气孔结构保存完好,仍然具有良好的波导传输能力。因此,随着光子晶体光纤锥形区域逐渐变细,纤芯模式逐渐向包层模式耦合过渡,以纤芯模式传输的光的能量逐渐减弱,而在锥形传感区域以包层模式传输的光能量逐渐增强。这一过程中,PCF中的纤芯模式和包层模式的传播常数不同,在传输距离 L 后,两种模式之间会存在相位延迟。最终,当两部分光传输到第二个熔接点时,锥形传感区域的包层模式与在光子晶体光纤纤芯中传输的纤芯模式在输出单模光纤中发生干涉,形成马赫-曾德尔干涉仪。与纤芯模式产生干涉的各阶包层模中总有一个包层模处于主导地位。因此,可采用马赫-曾德尔双光束干涉的原理进行分析,发生干涉的两种模式的相位延迟及干涉的中心波长分别表示为^[18-19]

$$\varphi = \frac{2\pi(n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad}})L}{\lambda} = \frac{2\pi(\Delta n_{\text{eff}} L)}{\lambda}, \quad (1)$$

$$\lambda_m = \frac{\Delta n_{\text{eff}} L}{m}, \quad (2)$$

式中 $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 、 $n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$ 分别PCF中传输的纤芯模式与包层模式的有效折射率, Δn_{eff} 为二者的差值, λ 为自由空间光波长, λ_m 为 m 级干涉的中心波长, L 为干涉长度,即两个熔接点之间的距离。从(1)式和(2)式中可以看出,PCF的熔接长度会影响干涉条纹的峰值点处的波长值,进而影响其周期及传输谱线的可见度。因此,实验中

需选择适宜的长度。

根据曲率对光纤模式有效折射率的影响,即当传感器的弯曲曲率发生变化时,由于弹光效应的影响,PCF中纤芯和包层的有效折射率会发生相应的变化。在纤芯中传输的纤芯模式和在包层中传输的包层模式之间的光程差也将随之发生改变,从而引起传感器透射谱波长的漂移。因此,由(2)式推导可知,外界曲率改变引起的波长漂移量可表示为

$$\Delta\lambda_m = \frac{(\Delta n_{\text{eff}} + \Delta n)L}{m} - \frac{\Delta n_{\text{eff}}L}{m} = \frac{\Delta nL}{m}, \quad (3)$$

式中 $\Delta\lambda_m$ 为第 m 阶干涉条纹中心波长漂移量, Δn 为 PCF 纤芯折射率和包层有效折射率的差值的变化量。弯曲变化量对应着纤芯模和包层模的有效折射率之差的改变量 Δn 在 PCF 接入长度 L 上的累加量。弯曲所引起的包层模式折射率的增加量大于纤芯模式折射率的增加量,因此光谱曲线会发生蓝移现象。由(3)式还可以看出,PCF的熔融拉锥处理增加了 L 的长度,并增大了纤芯模式与包层模式的耦合程度,从而有效地提高了传感器的灵敏度。然而,随着 PCF 长度的增加,传输光谱峰值点密度及传输损耗也会逐渐增加,从而会增加解调的难度,且 PCF 的拉锥长度过长,传感器的抗拉强度将会大打折扣。因此,综合考虑传输谱线的对比度、可见度及传感器的抗拉强度,PCF 的熔接长度和拉锥长度都不宜过长。经大量的实验验证,选择 PCF 的熔接长度和拉锥长度分别为 15 mm 和 5 mm 时最合适。

3 实验过程与结果分析

3.1 传感器的制作

实验中所采用的 PCF 为 SM-10 型实芯 PCF,其外包层直径为 125 μm ,纤芯直径为 9.5 μm ,具有 3 层空气孔,呈六边形结构排列,空气孔直径为 2.73 μm ,孔间距约为 3.35 μm ,端面如图 2(a)所示。熔接机为 Ericsson 公司生产的 FSU995PM 型保偏光纤熔接机;光源为 ASE3700 型宽带光源,波长范围为 1520~1610 nm;光谱分析仪(OSA)型号为 AQ6317B,由 Yokogawa 公司生产;光纤拉锥机是 SCS-4000 型光纤熔融拉锥系统。为了避免 PCF 长度对 MZI 输出光谱产生影响,实验中固定拉锥前接入 PCF 的长度为 15 mm。传感器的制备过程中采用手动熔接的方式进行 PCF 与 SMF 的熔接,放电电流为 114 mA,预放电时间为 0.2 s,放电时间为 0.3 s,此时熔接点 PCF 空气孔完全塌陷,以便能更好地激发包层模式,然后使用光纤拉锥机对 PCF 进行拉锥,并固定拉锥后锥区的长度为 5 mm,PCF 的拉锥前后电子显微镜图像如图 2(b)所示。从图 2 中可见,拉锥后 PCF 的空气孔部分保存完好。

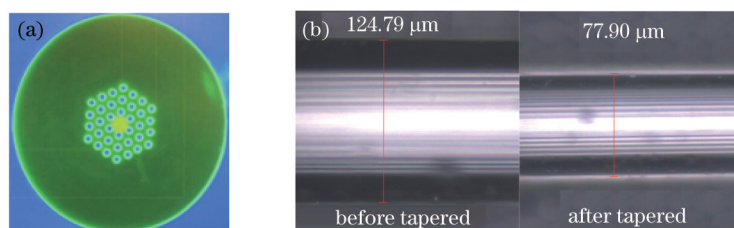


图 2 (a) PCF 的端面图; (b) PCF 拉锥前后对比图

Fig.2 (a) Cross section of PCF; (b) microscopic image of PCF and TPCF

3.2 曲率传感实验

基于 TPCF 的曲率测量实验的系统装置原理图及其实物图如图 3 所示。

在实验中,将制作好的传感器放置在钢条的中间位置,并紧贴钢条下表面,两端的 SMF 也同样紧贴在钢条的下表面并用 AB 胶固定粘牢,利用水平测微计调节实验系统中的两个三维调节架使其在各方向上完全水平,之后再 将钢条的两端分别固定在两个三维调节架上。传感头两端分别通过输入和输出 SMF 连接到光源(ASE)和 OSA 上,通过调节钢条上方的高精度微动台 F 可以实现传感器不同程度的弯曲。因此,通过位移、弯曲半径等之间的几何关系,可得曲率表达式^[20]为

$$C = \frac{1}{R} = \frac{2d}{d^2 + S^2}, \quad (4)$$

式中 R 为弯曲的曲率半径, d 为传感器在垂直位置上移动的位移, $2S$ 为两个三维调节架之间的距离, 初始大小为 275 mm。

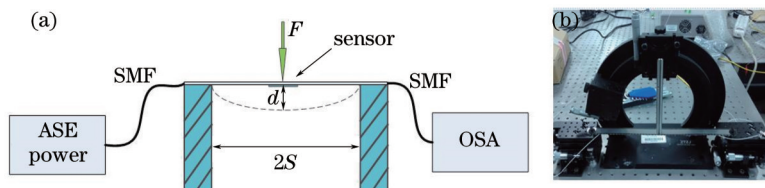


图3 (a) 曲率测量实验系统装置原理图; (b) 实物装置图

Fig.3 (a) Principle diagram of curvature measuring experimental system; (b) actual installation

实验初始, 调整钢条上方的微动台使其上方的钢柱与钢条垂直, 旋动高精度微动台上的螺旋测微旋钮, 使钢柱恰好与其下方的钢条相接, 此时钢条未发生形变, 曲率为零。随后, 调节螺旋测微旋钮控制钢柱的高度, 从而实现粘贴于钢条上的传感器的曲率的变化。实验过程中, 调节螺旋测微旋钮使钢柱每下降 1 mm 记录一次传输光谱。为避免传感器因曲率过大而发生断裂, 在实验过程中共记录 12 组数据。根据(3)式计算后所对应的曲率变化范围为 $0 \sim 1.16 \text{ m}^{-1}$ 。图4为不同曲率下所对应的传输光谱图。

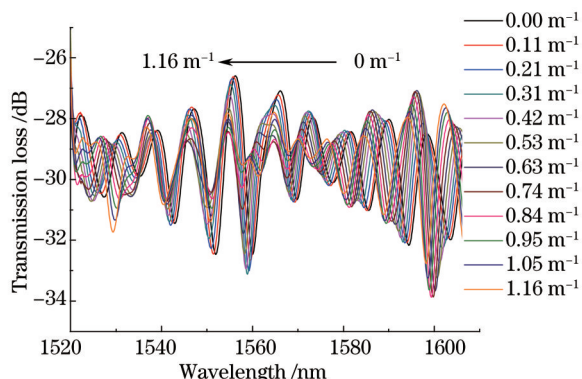


图4 不同曲率所对应的传输光谱

Fig.4 Transmission spectrum of sensor with different curvatures

由图4可见, 随着传感器弯曲曲率的增大, 传感器传输光谱向短波方向漂移。为了进一步考察其细节, 取波长 1590 nm 附近的波峰作为观察点, 得到传输光谱随弯曲曲率变化的具体情况如图5所示。

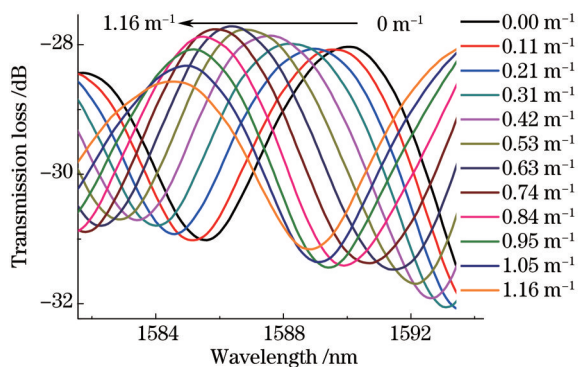


图5 1590 nm 附近不同曲率所对应的波峰值

Fig.5 Transmission spectrum near 1590 nm with different curvatures

由图5可知, 随着曲率的变大, 传输光谱有着明显的蓝移现象。主要原因在于: 当传感器发生弯曲时, 根据光波导的模式色散曲线可知, $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$ 都会有所增加。由于弯曲光纤的凸出部分的有效折射率将高于凹陷部分的有效折射率, 因而 $n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$ 的变化程度将大于 $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$, 从而可知 Δn 为一负值, 且随着曲率的不断增加, 其绝对值也不断增大。因此, 由(3)式可知, 随着曲率的不断增加, 该传感器的传输光谱将发生蓝移现象。实验结果与理论分析具有很好的一致性。

通过进行多次实验,对其曲率传感光谱进行分析处理,并对该波峰的漂移量进行计算,得到波长漂移量与弯曲曲率的关系,如图6所示。

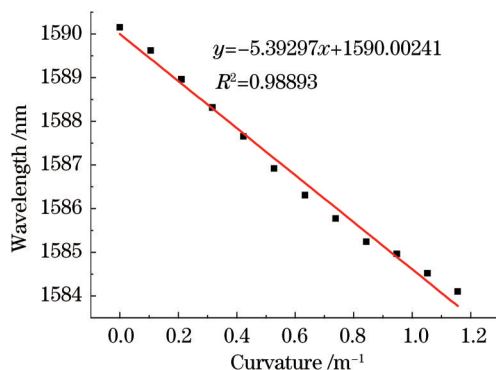


图6 波长漂移与曲率的关系

Fig.6 Relationship between wavelength shift and curvature

由图6可以看出,随着光纤曲率的增大,峰值波长逐渐减小,即产生蓝移现象,且波长的漂移与曲率的变化有较好的线性关系。因此,基于TPCF光纤的曲率传感器对曲率的变化十分敏感。由于在实验过程中,通过调节螺旋测微旋钮使得传感器在垂直位置上移动的位移 d 的变化范围为0~12 mm,其对应的传感器曲率变化为0~1.16 m⁻¹,使得测得的传输光谱在1590 nm附近处波峰随曲率的变化而产生的漂移量为-6.06 nm。因此,该传感器的曲率灵敏度为-5.39297 nm/m⁻¹,线性度为0.98893。此外,TPCF的温度不敏感特性,可有效地消除曲率测量过程中的温度交叉敏感问题,保证了传感的准确性;长周期光纤光栅(LPFG)对温度的敏感特性以及其谐振波长在圆周的两个对称方向上具有对弯曲的不敏感特性^[21],其与这里所提出的曲率传感器级联,可以实现曲率与温度的双参数测量。

4 结 论

本文提出了一种基于TPCF的曲率传感器,它是在一段长为15 mm的PCF的两端分别熔接SMF,并采用熔融拉锥法对PCF拉锥5 mm而制得。简要地分析了该传感器的传感机理,并进行了曲率实验。实验结果表明,随着曲率的增大,其传输光谱中心波长向短波长方向漂移,在0~1.16 m⁻¹的曲率变化范围内,其曲率灵敏度为-5.39297 nm/m⁻¹,且具有较好的线性度。同时,由于TPCF的温度不敏感特性,解决了温度的交叉敏感问题,从而保证了传感的准确性;同时,与LPFG级联可以实现曲率与温度的双参数测量。该传感器具有体积小、重量轻、易于制备、灵敏度高、无温度交叉敏感等优点,因此适用于不同环境的曲率测量。

参 考 文 献

- 1 Ma Bin, Sui Qingmei. Design of vehicle weight-in-motion system based on the fiber-optic micro-bend sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(8): 1195-1200.
马 宾,隋青美.基于光纤微弯传感器的汽车动态称重系统设计[J].传感技术学报,2010,23(8):1195-1200.
- 2 L Glavind, S Buggy, J Canning, *et al.*. Long-period gratings for selective monitoring of loads on a wind turbine blade[J]. Appl Opt, 2014, 53(18): 3993-4001.
- 3 Dong Xingyong, Zhang Ying, Guan Baiou, *et al.*. Experimental research of fiber grating circumflexion sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2000, 29(9): 807-809.
董新永,张 颖,关柏鸥,等.光纤光栅曲率传感的实验研究[J].光子学报,2000,29(9):807-809.
- 4 Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Bending sensing rules for long-period fiber gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1681-1685.
赵洪霞,鲍吉龙,陈 莹.长周期光纤光栅弯曲传感特性[J].光学学报,2008,28(9):1681-1685.
- 5 Wang Yiping, Chen Jianping, Rao Yunjiang. Long period fiber grating sensors measuring bend-curvature and determining bend-direction simultaneously[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2005, 16(10): 1139-1143.
王义平,陈建平,饶云江.同时测量弯曲曲率和弯曲方向的长周期光纤光栅传感器[J].光电子·激光,2005,16(10):1139-1143.

- 6 Pouneh Saffari, Thomas Allsop, Adedotum Adebayo, *et al.*. Long period grating in multicore optical fiber: an ultra-sensitive vector bending sensor for low curvatures[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(12): 3508–3511.
- 7 O Frazão, J Viegas, P Caldas, *et al.*. All-fiber Mach-Zehnder curvature sensor based on multimode interference combined with a long-period grating[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(21): 3074–3076.
- 8 Zhao Shigang, Wang Xue, Yuan Libo. Four core fiber based bending sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(7): 1001–1006.
赵士刚, 王 雪, 苑立波. 四芯光纤弯曲传感器[J]. *光学学报*, 2006, 26(7): 1001–1006.
- 9 H Qu, G F Yan, M Skorobogatiy. Interferometric fiber-optic bending/nano-displacement sensor using plastic dual-core fiber[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(16): 4835–4838.
- 10 Lin Qiao, Chen Liuhua, Li Shu, *et al.*. Optical fiber bending sensor based on Michelson interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(2): 251–254.
林 巧, 陈柳华, 李 书, 等. 基于迈克尔逊干涉的光纤弯曲传感器[J]. *光子学报*, 2011, 40(2): 251–254.
- 11 Guo Xinchun, Ning Tigang, Li Jing, *et al.*. Fiber-optic curvature sensor based on a core-offset structure[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2014, 25(8): 1476–1480.
郭新春, 宁提纲, 李 晶, 等. 基于偏芯结构的光纤弯曲传感器及其特性研究[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(8): 1476–1480.
- 12 An Jiali, Sun Mingming, Liang Houhui, *et al.*. Curvature sensor based on a pressure-induced birefringence single mode fiber loop mirror[J]. *Optik*, 2014, 125(13): 3228–3230.
- 13 Shen Changyu, Zhong Chuan, You Yang, *et al.*. Polarization-dependent curvature sensor based on an in-fiber Mach-Zehnder interferometer with a difference arithmetic demodulation method[J]. *Opt Express*, 2012, 20(14):15406–15417.
- 14 K S C Kuang, W J Cantwell, P J Scully. An evaluation of a novel plastic optical fibre sensor for axial strain and bend measurements [J]. *Meas Sci & Technol*, 2002, 13(10): 1523–1534.
- 15 Siamak Dawazdah Emami, Hairul A Abdul-Rashid, Fatemeh Zahra Zahedi, *et al.*. Investigation of bending sensitivity in partially doped core fiber for sensing applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(4): 1295–1303.
- 16 Ni Kai, Li Tao, Hu Limin, *et al.*. Temperature-independent curvature sensor based on tapered photonic crystal fiber interferometer [J]. *Opt Commun*, 2012, 285(24): 5148–5150.
- 17 Ji Yushen, Fu Guangwei, Fu Xinghu, *et al.*. Sensing characteristics of Mach-Zehnder interferometer based on the fused tapered photonic crystal fiber sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1006005.
纪玉申, 付广伟, 付兴虎, 等. 熔融拉锥型光子晶体光纤马赫曾德尔干涉仪传感特性[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1006005.
- 18 Niu Luo, Zhao Chunliu, Gong Huaping, *et al.*. Curvature sensor based on two cascading abrupt-tapers modal interferometer in single mode fiber[J]. *Opt Commun*, 2014, 333: 11–15.
- 19 Joel Villatoro, Vittoria Finazzi, Vladimir P, *et al.*. Temperature-insensitive photonic crystal fiber interferometer for absolute strain sensing[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(9): 091109.
- 20 Woojin Shin, Yeung Lak Lee, Bong-Ahn Yu, *et al.*. Highly sensitive strain and bending sensor based on in-line fiber Mach-Zehnder interferometer in solid core large mode area photonic crystal fiber[J]. *Opt Commun*, 2010, 283(10): 2097–2101.
- 21 Wang Yiping, Rao Yunjiang, Ran Zengling, *et al.*. Bend-insensitive long-period fiber grating sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(6): 725–729.
王义平, 饶云江, 冉曾令, 等. 对弯曲不敏感的长周期光纤光栅传感器[J]. *光子学报*, 2002, 31(6): 725–729.

栏目编辑: 何卓铭