

温度不敏感的错位熔接-粗锥型光子 晶体光纤曲率传感器

付广伟 李颀峰 李昀璞 杨传庆 付兴虎 毕卫红*

燕山大学信息科学与工程学院,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 提出了一种可以用于曲率矢量测量的温度不敏感的错位熔接-粗锥型光子晶体光纤(PCF)曲率传感器,它由两段普通单模光纤(SMF)之间熔接一段PCF组成,呈SMF-PCF-SMF结构。其中PCF的一端与SMF错位熔接导致传感器圆柱轴不对称,使得传输光谱在两个对称弯曲方向上出现明显的红移和蓝移现象;另一端与SMF通过过度熔接形成粗锥,最终形成马赫-曾德尔干涉仪。实验研究了传感器的曲率和温度特性,结果表明,在 $0.12 \sim 1.06 \text{ m}^{-1}$ 的曲率范围内,凹向弯曲时的光谱发生红移,其灵敏度为 11.22 nm/m^{-1} ,凸向弯曲时的光谱发生蓝移,其灵敏度为 -13.62 nm/m^{-1} ,且凹向弯曲时和凸向弯曲时均具有较好的线性度;在 $20 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内,此传感器的温度灵敏度仅为 $1.63 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,具有对温度不敏感的特性。该传感器与传统光纤传感器相比,能够避免温度与曲率同时测量时的交叉敏感问题,具有易于制备、结构简单、灵敏度高等优势,可用于工业生产、建筑监测、航空航天等领域。

关键词 光纤光学; 曲率; 光子晶体光纤; 错位熔接; 粗锥

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.1106007

Temperature Insensitive Curvature Sensor of Photonic Crystal Fiber Based on Core-Offset Splicing and Waist-Enlarged Fiber Taper

Fu Guangwei Li Qifeng Li Yunpu Yang Chuanqing Fu Xinghu Bi Weihong

*The key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, School of Information Science and Engineering,
Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China*

Abstract A temperature insensitive curvature sensor of the photonic crystal fiber (PCF) based on core-offset splicing and waist-enlarged fiber taper is presented. The sensor can measure the curvature magnitude and direction. The SMF-PCF-SMF structure is fabricated by drawing a length of PCF fused and spliced between two single-mode fibers (SMF). One end-face of the PCF is core-offset spliced with a SMF, so that the sensor can form an asymmetrical structure on the axial direction. When the sensor bends on two symmetrical directions, the red shift and blue shift phenomena of the transmission spectrum appear obviously. The other end-face of the PCF excessively spliced with another SMF forms a waist-enlarged fiber taper, and finally the Mach-Zehnder interferometer is obtained. Curvature and temperature response characteristics of the sensor are studied experimentally. When the curvature is in the range of 0.12 m^{-1} to 1.06 m^{-1} , the results show that the spectrum is red-shift in concave bending and blue-shift in convex bending. Besides it has a good linearity. The sensitivities are 11.22 nm/m^{-1} and -13.62 nm/m^{-1} , respectively. In the range of $20 \text{ }^\circ\text{C}$ to $80 \text{ }^\circ\text{C}$, the temperature sensitivity of the sensor is only $1.63 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, so it shows a temperature insensitive property. Compared with the traditional fiber sensors, the cross sensitivity of temperature and curvature simultaneous measurement can be avoided in the proposed sensor which also has advantages including easy fabrication, simple structure and high sensitivity. It can be used in such fields as industrial production, building monitoring and aerospace.

收稿日期: 2016-06-06; 收到修改稿日期: 2016-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(61475133, 61575170)、河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(16961701D)、燕山大学“新锐工程”人才支持计划

作者简介: 付广伟(1974—),男,博士,副教授,主要从事微纳光纤器件及传感技术的研究。E-mail: earl@ysu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: whbi@ysu.edu.cn

Key words fiber optics; curvature; photonic crystal fiber; core-offset splicing; waist-enlarged fiber taper

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.2400

1 引 言

光纤传感器与其他传感器相比具有体积小、抗电磁干扰能力强、灵敏度高、明显的优势^[1-4]。近年来,弯曲测量技术在机械、桥梁、建筑结构和高精度仪器设备的弯曲形变等检测领域得到了越来越广泛的应用,特别是建筑工程中结构的应力、应变、曲率等参数能够反映材料和结构力学特征,是评估建筑结构状态的基础。基于不同结构的光纤弯曲传感器已有很多报道,如迈克耳孙干涉仪^[5]、光纤光栅^[6-7]、光子晶体光纤(PCF)^[8-9]等各种微型结构^[10]的传感器都能较好地应用于曲率的测量。Geng等^[11]提出了一种基于长周期光纤光栅(LPG)的矢量曲率传感器,通过正交的两个LPG来实现曲率矢量测量;郭新春等^[12]设计了一种偏芯结构的光纤弯曲传感器,其弯曲灵敏度为 -6.9 nm/m^{-1} ;Li等^[13]提出了一种基于波导阵列光纤的曲率传感器,在 $0 \sim 10 \text{ m}^{-1}$ 的曲率范围内,灵敏度为 10 nm/m^{-1} 。但是,上述传感器还存在光纤光栅传感器制作复杂、温度与曲率同时测量时的交叉敏感等问题,严重影响了测量精度。而光纤马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, M-Z)传感器具有制作简单、结构紧凑、成本低等特点,且PCF具有对温度不敏感的特性,因此基于PCF M-Z传感器的研究越来越受到重视。

基于上述分析,本文提出了一种错位熔接-粗锥型PCF曲率传感器。该传感器是用普通商用熔接机对PCF进行错位熔接和过度熔接制成的。分析了熔接参数对传感器光谱的影响,给出了传感臂长度与干涉周期之间的关系,利用错位熔接形成的轴不对称性来实现曲率的矢量测量。实验研究了传感器的曲率和温度特性,结果表明,该传感器具有较高的曲率响应灵敏度,并且能同时检测两个方向上的弯曲曲率,避免了温度与曲率同时测量时的交叉敏感问题。

2 基本原理

错位熔接-粗锥型PCF曲率传感器的结构如图1所示。它是将PCF的一端与单模光纤(SMF)在Y轴方向上进行错位熔接,另一端与SMF进行过度熔接制得的。

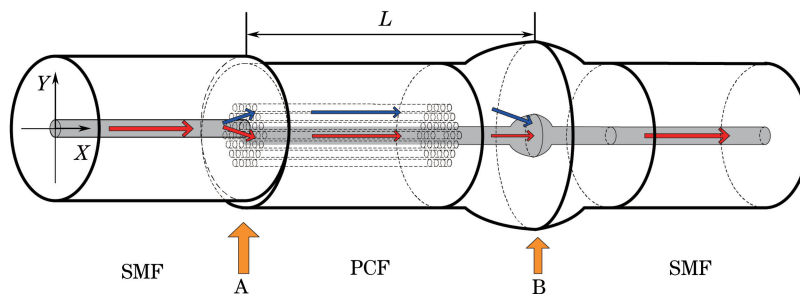


图1 传感器结构示意图

Fig. 1 Structure of the sensor

如图1所示, L 为PCF的熔接长度,即错位熔接-粗锥型PCF曲率传感器的长度。在SMF和PCF熔接时,不同熔接情况会造成熔接点处的光纤结构发生变化,进而引起光纤模场不匹配,因此输入光在错位熔接点A和过度熔接点B会分别产生分光、合光现象。光在经过错位熔接点A时,一部分光耦合进入PCF包层中,另一部分光继续留在PCF纤芯中,分别以包层模和纤芯模进行传输。PCF包层模和纤芯模之间的有效折射率的差异,导致以包层模和纤芯模传输的两部分光在传输一定距离后产生相位差。此时,如果把包层模和纤芯模分别看作干涉仪的传感臂和参考臂,那么两者就会在过度熔接点B处发生干涉,形成M-Z干涉仪。由双光束干涉理论可知,此时该传感器输出光的强度为^[14]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi, \quad (1)$$

式中 I_1 与 I_2 分别为以纤芯模与包层模传输的光的强度, φ 为两束光传输所形成的相位差,即

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

式中 n_{eff}^r 和 n_{eff}^d 分别表示纤芯模与包层模的有效折射率, λ 为在光纤中传输的光的波长, Δn_{eff} 为纤芯模与包层模的有效折射率差。干涉光谱将在传输过程中出现一系列的最大值和最小值, 其中最大值将出现在 φ 为 $2\pi m$ 处, 即

$$\frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda} = 2\pi m, \quad (3)$$

其中 $m = 1, 2, 3, \dots$, 因此第 m 阶干涉条纹的中心波长 λ_m 可以表示为

$$\lambda_m = \frac{\Delta n_{\text{eff}}L}{m}. \quad (4)$$

当外界环境引起光纤弯曲时, 光纤的弹光效应会使得 PCF 纤芯模与包层模的有效折射率发生改变, 进而影响包层模和纤芯模之间的光程差, 导致干涉光谱发生移动。因此, 由(4)式可得外界曲率改变引起的传感器第 m 阶干涉条纹的中心波长漂移量为^[15]

$$\Delta\lambda_m = \frac{(\Delta n_{\text{eff}} + \Delta n)L}{m} - \frac{\Delta n_{\text{eff}}L}{m} = \frac{\Delta nL}{m}, \quad (5)$$

式中 Δn 为 PCF 纤芯模和包层模有效折射率的差值变化量。由于错位熔接和过度熔接会破坏光纤结构的圆柱对称性, 尤其是光在经过错位熔接点 A 后, 一部分纤芯基模会耦合进入包层中以包层模传输, 从而导致光在传输过程中沿 Y 轴正方向的模式能量要比沿 Y 轴负方向的多。当光纤弯曲后, 靠近光纤轴向外侧的模式有效折射率的增加量会大于其内侧的模式有效折射率的增加量。当传感器凹向弯曲时, 纤芯模靠近光纤轴外侧, 包层模有效折射率的增加量小于纤芯模有效折射率的增加量, 导致此时 Δn 为正值, 则 $\Delta\lambda_m$ 为正值, 表示干涉条纹向长波方向移动。反之, 当光纤凸向弯曲时, 包层模有效折射率的增加量大于纤芯模有效折射率的增加量, 干涉条纹向短波方向移动。因此, 通过检测某一阶干涉条纹中心波长的漂移方向和漂移量就可以确定弯曲曲率的方向和大小。

3 实验过程与结果分析

3.1 传感器的制备

实验中使用的是长飞光纤光缆股份有限公司生产的 SM-10 型实芯 PCF, 它具有呈六边形结构排列的 3 层空气孔, 包层直径为 $125 \mu\text{m}$, 纤芯直径为 $9.5 \mu\text{m}$, 其端面如图 2(a) 所示。利用古河公司的 FITEL-S178A 型光纤熔接机进行传感器的制备, 采用手动熔接的方式进行 PCF 与 SMF 的熔接。首先将待熔的一段 PCF 的涂覆层用剥线钳剥去, 然后经酒精棉擦拭后置于熔接机上与 SMF 进行熔接, 最后通过调节不同熔接方式得到不同的熔接点。在熔接过程中, 通过手动错位造成光纤圆柱轴向的不对称性, 可以形成错位熔接点, 如图 2(b) 所示。通过增大待熔光纤两端的推进量, 可以形成过度熔接的光纤粗锥, 如图 2(c) 所示。

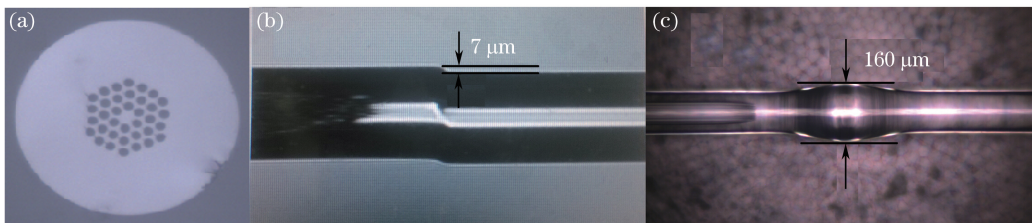


图 2 (a) SM-10 PCF 端面; (b) 光纤错位熔接; (c) 光纤过度熔接形成的粗锥

Fig. 2 (a) Cross-section of the SM-10 PCF; (b) fiber core-offset splicing; (c) waist-enlarged fiber taper by excessively splicing

在实验中, 分别制备了传感器长度为 4, 10, 16, 19 mm 的错位熔接-粗锥型曲率传感器, 其传输光谱如图 3 所示。

由图 3 可知, 随着传感器长度的增加, 其传输光谱中的干涉周期数目增加, 即条纹间距减小。由(4)式可推导得到条纹间距 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{m'}^2}{\Delta n_{\text{eff}} L}, \quad (6)$$

由于第 m 阶与第 $m+1$ 阶干涉条纹的中心波长接近, 为方便计算, 将 λ_m 与 λ_{m+1} 看作近似相等的量 $\lambda_{m'}$ 。由 (6) 式可知, 随着传感器长度 L 的增加, 条纹间距 $\Delta\lambda$ 逐渐减小, 即干涉周期数目逐渐增加, 与实验结果一致。

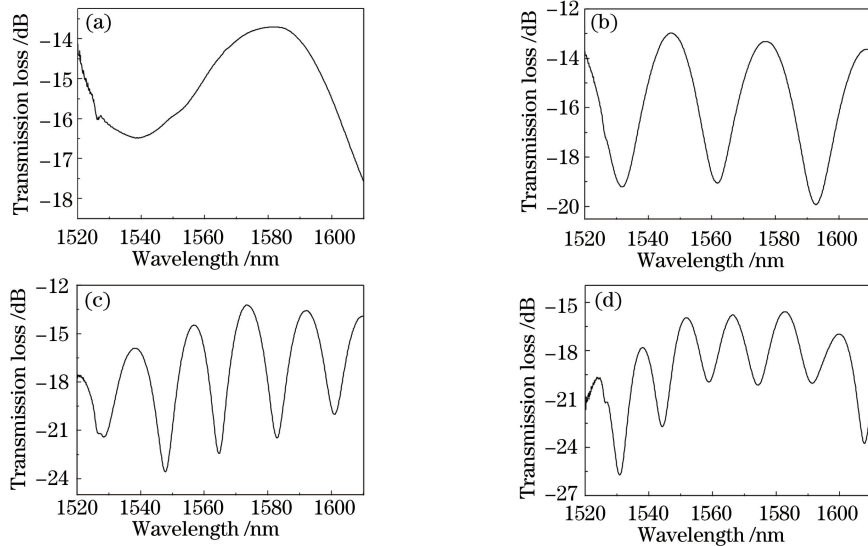


图 3 不同长度的曲率传感器的传输光谱。(a) 4 mm; (b) 10 mm; (c) 16 mm; (d) 19 mm

Fig. 3 Transmission spectra of the curvature sensor with different lengths. (a) 4 mm; (b) 10 mm; (c) 16 mm; (d) 19 mm

通过大量实验结果分析发现, 如果光纤错位量和粗锥直径过小, 则不容易激发出包层模传输; 但是, 光纤错位量和粗锥直径过大也会造成传输能量损耗过大, 导致形成的干涉条纹难以检测。因此, 经过反复实验分析得到, 当 SMF 和 PCF 在 Y 轴方向上错位量为 $7 \mu\text{m}$ 、PCF 熔接长度为 10 mm、粗锥直径为 $160 \mu\text{m}$ 时, 可以形成干涉条纹清晰且漂移现象显著的错位熔接-粗锥型曲率传感器。

3.2 频谱分析

将图 3 中传感器长度为 10 mm 的传输光谱进行傅里叶变换, 可分析 M-Z 干涉仪中参与干涉的主要模式, 如图 4 所示。

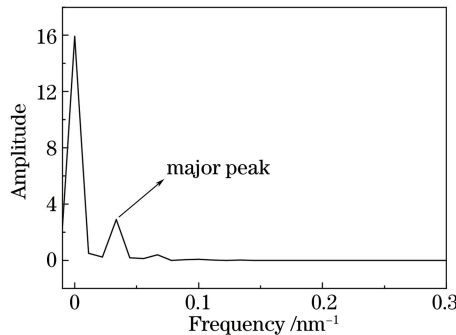


图 4 传输光谱的傅里叶频谱

Fig. 4 Fourier spectrum of the transmission spectrum

由图 4 可见, 傅里叶频谱上除了空间频率为 0.0 nm^{-1} 的纤芯模式外, 仅存在一个主峰, 其幅值远大于其他小峰。因此, M-Z 干涉仪中的两个模式之间的干涉即是由纤芯传输的基模与此主峰所对应的模式相互干涉产生的。定标后得到此主峰的空间频率为 0.033285 nm^{-1} 。对相位差 φ 进行泰勒展开, 可得

$$\varphi \approx \varphi_0 + \frac{2\pi\Delta\lambda'}{\lambda_0^2} \Delta n_{\text{eff}} L, \quad (7)$$

式中 λ_0 为干涉条纹的中心波长, 取为 1550 nm; $\Delta\lambda'$ 为在光纤中传输的光的波长 λ 与干涉条纹的中心波长 λ_0 的差。对于余弦型的干涉光谱存在

$$\cos(\Delta\varphi) = \cos(2\pi\xi\Delta\lambda'). \quad (8)$$

因此,由(7)式和(8)式可以得出空间频率 ξ 为

$$\xi = \frac{1}{\lambda_0} \Delta n_{\text{eff}} L. \quad (9)$$

利用图 4 中实验得到的主峰空间频率,结合(9)式可以计算出传感器所对应的纤芯模与包层模的有效折射率差 Δn_{eff} 为 0.007996。采用全矢量有限元分析方法可以求得 PCF 中传输的几组高阶模的有效折射率,并且计算得到各高阶模式与基模间的有效折射率差值,如表 1 所示。

表 1 各高阶模式与基模间的有效折射率差

Table 1 Effective refractive index differences between the fundamental mode and high-order modes

Group	1	2	3	4	5
High-order mode	LP ₁₁	LP ₂₁	LP ₀₂	LP ₃₁	LP ₁₂
Effective refractive index difference between the high-order mode and LP ₀₁	0.007291	0.015869	0.019145	0.021859	0.027538

通过与表 1 对照可知,基模与 LP₁₁ 模间的有效折射率差为 0.007291。该结果与通过实验得到的两个模式的有效折射率差近似相等。因此,可以认为实验中得到的干涉光谱是由基模与 LP₁₁ 模之间的干涉引起的。

3.3 曲率传感实验

曲率测量实验系统装置原理图如图 5 所示。在传感实验中,放大自发辐射(ASE)宽带光源波长范围为 1520~1610 nm,并利用 AQ6375 型光谱分析仪(OSA)记录实验数据。

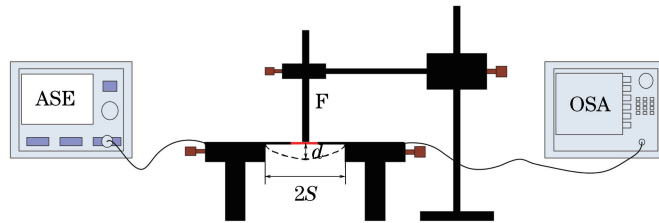


图 5 曲率测量实验系统装置原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the curvature measurement experiment system

在曲率测量实验系统中,将一把钢尺两端水平固定在两个三维调节平台上,通过钢尺上方的升降台(F)的上下移动来改变钢尺下压的不同距离 d ,从而实现钢尺不同程度的弯曲。通过升降台的移动距离和两个三维调节平台之间的距离得到曲率表达式为^[16]

$$C = \frac{1}{R} = \frac{2d}{d^2 + S^2}, \quad (10)$$

式中 R 为弯曲的曲率半径, d 为升降台的移动距离, $2S$ 为两个三维调节架之间的距离,初始大小为 260 mm。

实验中,将制作好的传感器固定在钢尺的下表面,传感器要和钢尺紧密贴合,以保证改变钢尺的弯曲程度就是在改变传感器的弯曲程度。将传感器两端的 SMF 分别与 ASE 光源和 OSA 连接,并在实验过程中保持两个三维平台之间的距离不变。通过改变升降台的移动距离来改变曲率大小,每下降 1 mm 记录一次传输光谱,共记录 9 次传输光谱。通过(10)式计算所对应的曲率变化范围为 0.12~1.06 m⁻¹。传感器进行凹向弯曲时的示意图如图 6 所示。

通过下压不同的距离来得到不同的曲率,观测其传输光谱,图 7 为凹向弯曲时的不同曲率所对应的传输光谱。

由图 7 可见,随着升降台移动距离的增加,传感器弯曲曲率逐渐变大,其传输光谱逐渐向长波方向发生移动,即具有明显的红移现象。对传输光谱中的 1590 nm 附近波谷波长的漂移量进行计算,得到波长漂移量与弯曲曲率的关系,如图 8 所示。

由图 8 可知,凹向弯曲时的曲率灵敏度为 11.22 nm/m⁻¹、线性度 R^2 为 0.99855,说明波长的漂移量与曲率之间具有较好的线性关系。这是因为当传感器弯曲曲率发生变化时,光纤的弹光效应会使得 PCF 传感区域中纤芯模和包层模的有效折射率发生改变, n_{eff}^c 和 n_{eff}^d 都会有所增加。光纤弯曲后,靠近光纤轴向外侧的模式有效折射率的增加量大于靠近内侧的模式有效折射率的增加量。由图 6 可知,传感器凹向弯曲时,纤芯

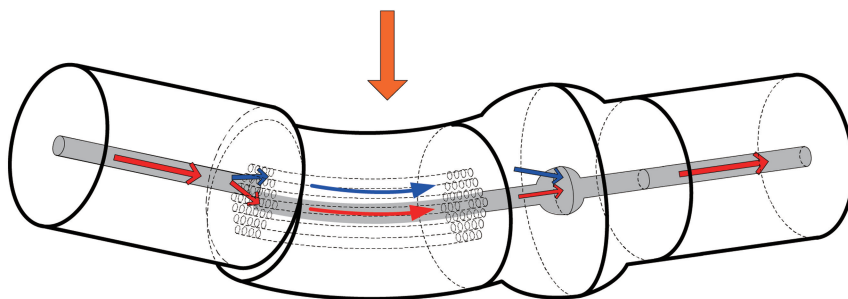


图 6 传感器凹向弯曲示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the sensor concave bending

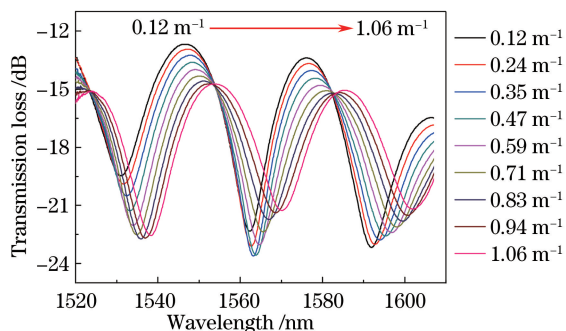


图 7 不同凹向弯曲曲率所对应的传输光谱

Fig. 7 Transmission spectra of the sensor under different concave bending curvatures

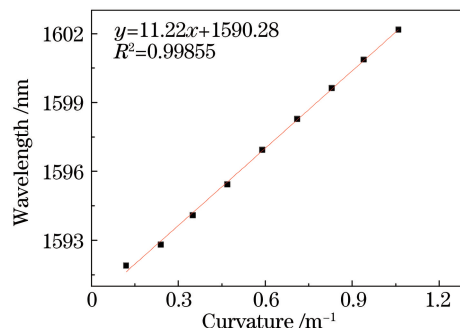


图 8 凹向弯曲波长漂移与曲率的关系

Fig. 8 Relationship between the wavelength shift and concave bending curvature

模靠近光纤轴外侧,因此, n_{eff}^r 比 n_{eff}^d 变化程度大。由(5)式可知,此时纤芯模变化量与包层模变化量的差值为正值,则 $\Delta\lambda_m$ 为正值,表示传输光谱向长波方向进行漂移。随着弯曲程度的不断增加,纤芯模变化量与包层模变化量的差值逐渐增大, $\Delta\lambda_m$ 绝对值也不断增大。因此,随着曲率的不断增加,该传感器的传输光谱将发生红移现象,实验结果与理论分析具有很好的一致性。

将传感器以光纤中心轴为轴翻转 180° 后固定在钢尺的下表面,同样通过改变升降台的移动距离来改变曲率大小。此时下压钢尺,传感器相当于发生凸向弯曲,传感器凸向弯曲时的示意图如图 9 所示。

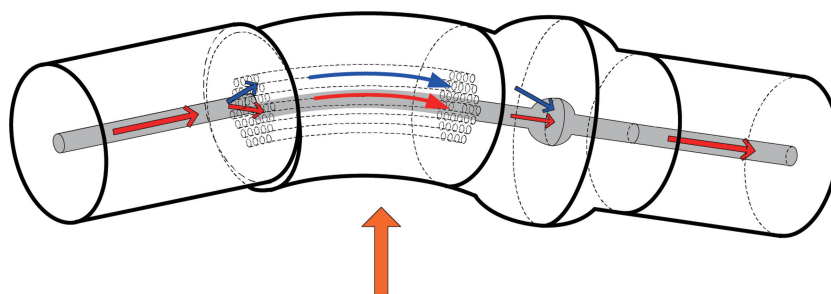


图 9 传感器凸向弯曲示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the sensor convex bending

随着光纤曲率的增大,不同曲率所对应的传输光谱会发生明显的蓝移现象。凸向弯曲时的不同曲率所对应的传输光谱如图 10 所示。

由图 10 可见,随着传感器弯曲曲率的增大,传输光谱向短波方向漂移。对其传输光谱 1590 nm 附近波谷波长漂移量进行计算,得到波长漂移量与弯曲曲率的关系,如图 11 所示。

由图 11 可知,凸向弯曲时的曲率灵敏度为 -13.62 nm/m^{-1} 、线性度 R^2 为 0.99886,说明波长的漂移量与曲率之间具有较好的线性关系。这是因为当传感器弯曲曲率发生变化时,靠近光纤轴向外侧的模式有效折射率的增加量大于靠近内侧的模式有效折射率的增加量。由图 9 可知,传感器凸向弯曲时,纤芯模靠近光纤轴内

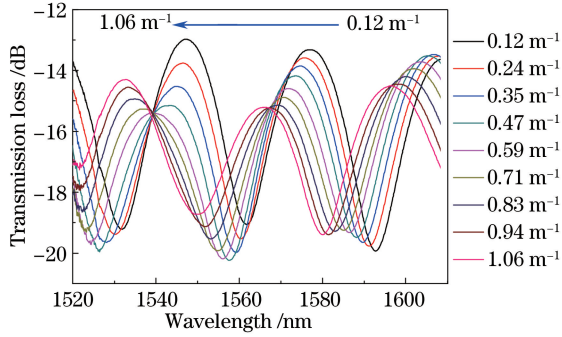


图 10 不同凸向弯曲曲率所对应的传输光谱

Fig. 10 Transmission spectra of the sensor under different convex bending curvatures

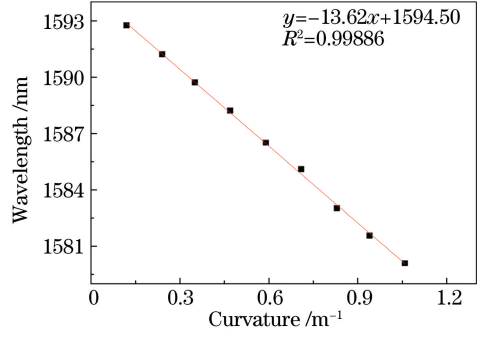


图 11 凸向弯曲波长漂移与曲率的关系

Fig. 11 Relationship between wavelength shift and convex bending curvature

侧,因此, n_{eff}^r 比 n_{eff}^d 变化程度小,此时纤芯模变化量与包层模变化量的差值为负值,且随着弯曲程度的不断增加, $\Delta\lambda_m$ 绝对值也逐渐增大。因此,由(5)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。

3.4 温度传感实验

在温度传感实验中,将制作好的传感器放置并固定在玻璃片上,置于温控实验箱中。将传感器两端的 SMF 分别连接 ASE 光源和 OSA。

通过对温控箱预设不同的温度值,实现对不同温度的测量。设定温控箱温度的变化范围为 $20 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$,待每次温度达到预设值后,稳定 20 min ,记录一次光谱。温度每隔 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 测量一次。不同温度所对应的传输光谱如图 12 所示。

由图 12 可见,随着温度的升高,传感器的传输光谱向长波方向发生微小漂移。对其传输光谱进行分析处理,并对 1570 nm 附近的波谷波长漂移量进行计算,得到波长漂移量与温度的关系,如图 13 所示,此时,该传感器的温度灵敏度仅为 $1.63 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,对温度不敏感。

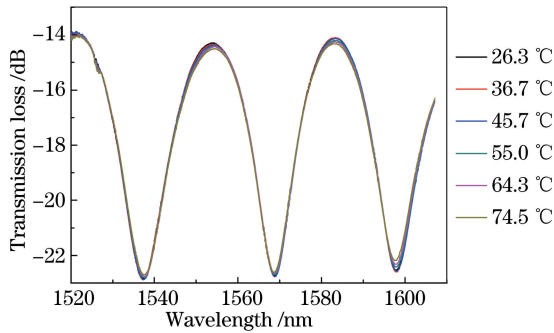


图 12 不同温度所对应的传输光谱

Fig. 12 Transmission spectra of the sensor under different temperatures

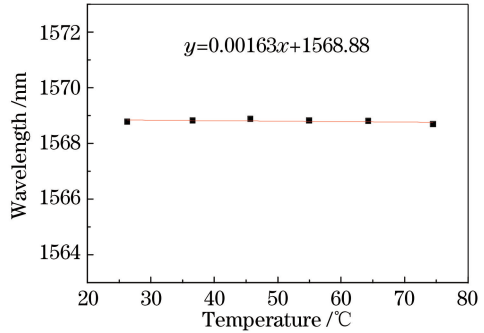


图 13 波长漂移与温度的关系

Fig. 13 Relationship between the wavelength shift and temperature

究其对温度不敏感的主要原因在于:当传感器周围环境温度发生变化时,受物质的热光效应和热膨胀效应的影响,光纤材料的折射率发生变化,从而引起传感器透射谱波长的漂移。外界温度改变引起第 m 级干涉条纹的中心波长漂移量为^[17]

$$\Delta\lambda_m^1 = (\alpha + p_1) \lambda_m \Delta T, \quad (11)$$

式中 p_1 为外界温度变化时产生干涉的两种模式之间的有效折射率差值的变化, α 为材料的热膨胀系数, ΔT 为外界温度的变化。由于 PCF 主要由 SiO_2 构成,其热膨胀系数仅为 $5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$,温度变化引起的物质热膨胀效应的差别很小,从而导致其对传输模式的变化影响很小,所引起的 p_1 变化量近似为 0。因此,该 PCF 所制备的传感器对温度不敏感,从而避免了温度与曲率同时测量时的交叉敏感问题。

将该传感器与其他类型的曲率传感器进行比较,其结果如表 2 所示,表 2 中 FBG 为光纤布拉格光栅,MMF 为多模光纤。

表 2 不同类型传感器的曲率灵敏度

Table 2 Curvature sensitivity of different types of sensors

Type	FBG inscribed by femtosecond laser ^[18]	LPG inscribed by femtosecond laser ^[19]	SMF based on a core-offset structure ^[12]	SMF-MMF-SMF ^[20]	PCF based on core-offset splicing and waist-enlarged fiber taper
Curvature sensitivity /(nm/m ⁻¹)	7.7×10 ⁻²	-1.6,3.8	-6.9	-10.38	-13.62,11.22
Direction recognition ability	No	Yes	No	No	Yes

由表 2 可知,错位熔接-粗锥型 PCF 曲率传感器不仅制作容易还具有方向识别能力,并且具有较高的曲率灵敏度。根据上述曲率和温度实验结果可知,当传感器凸向和凹向弯曲时,随着曲率的增大,干涉光谱分别产生蓝移和红移现象,并且波长漂移与曲率有较好的线性关系。因此,错位熔接-粗锥型 PCF 曲率传感器可以同时测量曲率的方向和大小。此外,错位熔接-粗锥型 PCF 曲率传感器具有温度不敏感特性,可以有效地避免曲率测量过程中温度与曲率同时测量时的交叉敏感问题。

4 结 论

提出了一种错位熔接-粗锥型 PCF 曲率传感器,它是在长度为 10 mm 的 PCF 两端分别与 SMF 进行错位和过度熔接制得的。实验结果表明,该传感器在 0.12~1.06 m⁻¹的曲率范围内,凹向和凸向弯曲灵敏度分别为 11.22 nm/m⁻¹和 -13.62 nm/m⁻¹,且均具有较好的线性度,并且此传感器的温度灵敏度仅为 1.63 pm/°C。该传感器与其他类型的曲率传感器相比,具有制作简单、灵敏度高、有方向识别能力的优点,同时该传感器对温度不敏感,能够避免温度与曲率同时测量时的交叉敏感问题,在航空航天、大型机械等领域有很好的应用前景。

参 考 文 献

- Ma Lin, Guo Xinchun, Qi Yanhui, *et al.* Investigation on the vibration characteristic of fiber vibration sensor based on a core-offset structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1206007.
马 林, 郭新春, 齐艳辉, 等. 基于偏芯结构的光纤传感器的振动传感特性研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1206007.
- Dai Fang, Li Kaiwei, Zhou Wenchao, *et al.* Highly sensitive optical nanofiber bio-chemical sensor based on magnetic nanoparticles amplification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1206003.
代 方, 李凯伟, 周文超, 等. 基于纳米磁珠放大的高灵敏度纳米光纤生化传感器[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1206003.
- Zhang Xiaoli, Liang Dakai, Cui Donghui, *et al.* Study on the optimal placement for optical fiber sensor network in health monitoring system[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, 25(9): 1754-1758.
张晓丽, 梁大开, 崔东辉, 等. 健康监测系统中光纤传感器网络优化布置研究[J]. *光电子 • 激光*, 2014, 25(9): 1754-1758.
- Xu Hongzhi, Lou Jun, Xu Ben, *et al.* High-sensitivity segmented structure optic fiber evanescent wave sensor[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, 25(11): 2060-2066.
许宏志, 楼 俊, 徐 贲, 等. 高灵敏度分段结构光纤倏逝波传感器[J]. *光电子 • 激光*, 2014, 25(11): 2060-2066.
- Lin Qiao, Chen Lihua, 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.
- Yang Y, Gu Z T. Temperature and bending simultaneous sensing properties of cascaded long-and-short-period gratings[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(2): 165-173.
- Saffari P, Allsop T, Adebayo A, *et al.* Long period grating in multicore optical fiber: an ultra-sensitive vector bending sensor for low curvatures[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3508-3511.
- Lou Shuqin, Wang Xin, Yin Guolu, *et al.* Curvature sensor based on side-leakage photonic crystal fiber with high

- sensitivity and broad linear measurement range[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(19): 194209.
- 娄淑琴, 王 鑫, 尹国路, 等. 基于侧漏型光子晶体光纤高灵敏度宽线性范围弯曲传感器的研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(19): 194209.
- 9 Silva R M, Ferreira M S, Kobelke J, *et al.* Simultaneous measurement of curvature and strain using a suspended multicore fiber[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(19): 3939-3941.
- 10 Monzon-Hernandez D, Martinez-Rios A, Torres-Gomez I, *et al.* Compact optical fiber curvature sensor based on concatenating two tapers[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(22): 4380-4382.
- 11 Geng P C, Zhang W G, Gao S C, *et al.* Two-dimensional bending vector sensing based on spatial cascaded orthogonal long period fiber[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28557-28562.
- 12 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.
- 13 Li S, Wang Z, Liu Y, *et al.* Bending sensor based on intermodal interference properties of two-dimensional waveguide array fiber[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(10): 1610-1612.
- 14 Zhao Na, Fu Haiwei, Shao Min, *et al.* Research on high sensitivity temperature sensor based on Mach-Zehnder interferometer with waist-enlarged fiber bitapers[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(6): 1722-1726.
- 赵 娜, 傅海威, 邵 敏, 等. 基于光纤粗锥型马赫-曾德尔干涉仪的高灵敏度温度传感器的研制[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(6): 1722-1726.
- 15 Fu Xinghu, Xie Haiyang, Zhu Hongbin, *et al.* Experimental research of curvature sensor based on tapered photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0506002.
- 付兴虎, 谢海洋, 朱洪彬, 等. 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[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0506002.
- 16 Shin W J, Lee Y L, Yu B A, *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]. *Optics Communications*, 2010, 283(10): 2097-2101.
- 17 Li C, Qiu S J, Chen Y, *et al.* Ultra-sensitive refractive index sensor with slightly tapered photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(19): 1771-1774.
- 18 Martinez A, Lai Y C, Dubov M, *et al.* Vector bending sensors based on fiber Bragg gratings inscribed by an infrared femtosecond laser[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2005, CFH: CFH1.
- 19 Allsop T, Dubov M, Martinez A, *et al.* Bending characteristics of fiber long-period gratings with cladding index modified by femtosecond laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(8): 3147-3154.
- 20 Gong Y, Zhao T, Rao Y J, *et al.* All-fiber curvature sensor based on multimode interference [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 679-681.