

doi: 10.3788/gzxb20154411.1106004

同时测量温度和曲率的光纤传感器

王栋远, 孙明明, 金永兴, 王剑锋, 董新永

(中国计量学院 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

摘 要:提出了一种基于光纤布拉格光栅和马赫-曾德干涉仪相结合的同时测量曲率和温度的光纤传感器。该光纤传感器在马赫-曾德干涉仪中熔接一段布拉格光纤光栅, 其中马赫-曾德干涉仪由两个花生形结构单模光纤熔接而成。实验结果表明, 马赫-曾德干涉仪的透射谱中干涉峰和光纤布拉格光栅透射谱中谐振峰对曲率和温度有不同的响应灵敏度, 因此可以利用矩阵实现对曲率和温度的同时测量。实验中测得马赫-曾德干涉仪曲率灵敏度为 -27.58 nm/m^{-1} , 光纤布拉格光栅在一定的测量范围内对曲率的变化不敏感, 马赫-曾德干涉仪和光纤布拉格光栅的温度灵敏度分别为 $0.03869 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 和 $0.01217 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 。该系统采用全光纤结构, 光纤布拉格光栅嵌入到马赫-曾德干涉仪中, 因而结构紧凑和简单, 且易于实现。

关键词: 光纤传感器; 弯曲传感器; 马赫-曾德干涉仪; 光纤布拉格光栅; 同时测量

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-421320154411-1106004-5

Simultaneous Measurement of Curvature and Temperature Based on Optical Fiber Sensor

WANG Dong-yuan, SUN Ming-ming, JIN Yong-xing, WANG Jian-feng, DONG Xin-yong

(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: An optical fiber sensor based on a fiber Bragg grating and Mach-Zehnder interferometer was proposed and experimentally demonstrated for the measurement of curvature and temperature simultaneously. The sensor head is formed by combining a fiber Bragg grating with an all-fiber Mach-Zehnder interferometer which consists of two cascaded peanut-shape structures. Experimental results show that the interference peaks of the Mach-Zehnder interferometer transmission spectrum and the resonance peaks of the fiber Bragg grating transmission spectrum have a different sensitivity to curvature and temperature change, so that a matrix can be used to realize the simultaneous measurement of the curvature and temperature. Curvature sensitivity of the Mach-Zehnder interferometer is -27.58 nm/m^{-1} while fiber Bragg grating is not sensitive to the curvature change. Temperature sensitivity of the Mach-Zehnder interferometer and fiber Bragg grating in the experiment is $0.03869 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ and $0.01217 \text{ nm/}^\circ\text{C}$, respectively. This proposed sensor employs all-fiber structure and the fiber Bragg grating is inserted between two cascaded peanut-shape structures, so it is compact and easy to make.

Key words: Fiber optical sensor; Curvature sensor; Mach-Zehnder interferometer; Fiber Bragg grating; Simultaneous measurement

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 060.3735; 060.2340; 060.2300

基金项目:国家重点基础研究发展计划 (No. 2010CB327804)、浙江省公益项目 (No. 2014C33065) 和浙江省安全生产科技计划 (No. 2014A1004) 资助

第一作者:王栋远 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感. Email: jzjswq@126.com

导师 (通讯作者):金永兴 (1972-), 男, 教授, 硕士, 主要研究方向为光纤传感和光纤通信. Email: jinyongxing@cjlu.edu.cn

收稿日期:2015-07-02; **录用日期:**2015-07-27

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

随着光纤传感技术的发展,光纤传感器因其体积小、抗电磁干扰、抗腐蚀和灵敏度高特点,被广泛应用于温度、曲率^[1]、折射率、液位、应变^[2]、磁场^[3]等物理量的测量.典型的光纤传感器如长周期光栅^[4],布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)^[5], Fabry-Perot腔^[6],倾斜光栅^[7]以及光子晶体光纤^[8-9]等一些特种光纤,在工程检测、生物医学、化学材料等领域都有广泛应用.在工程应用中,温度和曲率是需要被测量的重要参量,目前基于FBG的各种传感器,基本上都是直接或间接地利用改变光纤的中心波长以达到被测量的目的.但是中心波长不仅会随光纤的曲率发生改变,还会随着环境温度的变化而变化,即存在温度和应变交叉敏感的问题^[10].因此,在实际测量中解决对温度和曲率同时测量的问题具有重要意义.

全光纤结构的马赫-曾德干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)灵敏度高、易于构建、波长范围大^[11-14]在光纤传感领域越来越受到重视.光纤马赫-曾德干涉仪主要分为双芯光纤和基于纤芯-包层模式干涉两种.对于双芯光纤马赫-曾德干涉仪,需要在双芯光纤和单模光纤之间进行拉锥,光波将在拉锥区域被激发纤芯模和包层模.但这种方法涉及复杂的制作过程并且需要对拉锥结构进行保护.而对于基于纤芯-包层模式干涉的马赫-曾德干涉仪,研究人员提出了几种测量方法,如级联式长周期光纤光栅^[11],单模光纤-特种光纤-单模光纤结构^[12],微纳光纤结构^[15]等.另外还有其他一些方法,如利用光子晶体光纤上的塌陷空气孔和光纤拉锥^[14].然而在实际应用中,这些测量方法往往存在系统复杂、成本高、测量范围窄、交叉敏感等问题.

本文提出了一种基于全光纤结构 MZI 和 FBG 的光纤传感器,其中有单模光纤熔接两个花生形结构组成马赫-曾德干涉仪,FBG 被刻写在两个花生形结构之间的单模光纤上. MZI 的干涉谱和 FBG 的谐振峰对曲率和温度有不同的响应灵敏度,因此可利用敏感矩阵实现对温度和曲率的同时测量.此结构具有测量精确、灵敏度高、成本低廉等优点.

1 传感器的结构与原理

如图 1,光纤传感器由一段刻有 FBG 单模光纤熔接在两个花生形光纤结构之间组成.实验中采用光纤熔接机(Fujikura FSM-60s)制作光纤花生形结构,其制作流程为:首先设置好熔接机熔接成球形结构的模式,将切平的光纤端面置于熔接机中,然后进行若干次放电使光纤断面熔融成球形,再将两个这样的球形结构置于熔接机中,进行放电熔接得到花生形结构. FBG 是

利用相位掩模板技术,通过紫外激光写入载氢的掺锗单模光纤中,布拉格波长 1 537.25 nm,刻写的光纤光栅长度 8 mm,3 dB 带宽为 0.22 nm.传感器的工作原理为:宽带光(纤芯模式)进入第一个花生形结构激发出包层模式,到达第二个花生形结构将包层模式耦合到纤芯与纤芯模式发生干涉.纤芯模式经过两个花生形结构之间的 FBG 时,一部分特定波段的光被后向耦合,向相反的方向传输,透射光谱在 FBG 中心波长附近形成一个明显的波谷.

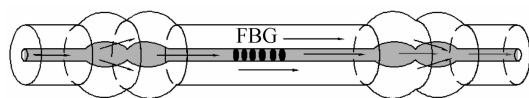


图 1 传感器结构

Fig. 1 Proposed sensor based on MZI and FBG

对于马赫-曾德干涉仪,透射光谱波谷波长为^[12]

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2N+1}, N=1, 2, 3\cdots \quad (1)$$

Δn_{eff} 为纤芯模式和 m 阶包层模式的有效折射率差, L 为干涉仪的长度.

传感器的透射谱如图 2,与无 FBG 时的 MZI 的透射光谱相比,在 MZI 干涉光谱图中多了一个 FBG 布拉格谐振峰,FBG 的透射谐振峰由于受到 MZI 光谱的调制,谐振峰的消光比虽然比较小,但是其 3 dB 带宽与原来保持不变,所以对测量灵敏度基本没有影响.为了实验方便,图中相近的两个峰, MZI 干涉峰 Dip-A 和 FBG 谐振峰 Dip-B 作为本文实验对象.

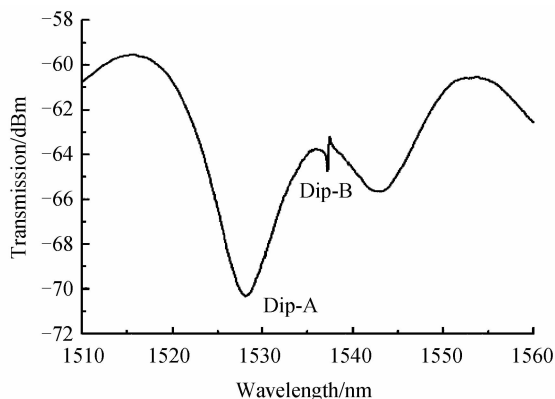


图 2 传感器透射谱

Fig. 2 Transmission spectrum of optical fiber sensor

2 温度和曲率同时测量的原理

传感器可同时测量曲率和温度的工作机理为:当传感器温度不变,曲率变化时,传感器透射谱中 Dip-B 不发生漂移.而 MZI 光谱中,曲率的变化会导致包层和纤芯之间产生应变差,导致二者的有效折射率差发生变化,从而使透射光谱中 Dip-A 漂移.因此,当传感器温度不变时,曲率变化导致透射谱中 Dip-A 漂移,而 Dip-B 保持不变,同时 MZI 透射光谱中波谷 Dip-A 波

长漂移与曲率变化成线性关系^[16].当传感器曲率不变,外界温度变化时,传感器透射谱中 Dip-A 和 Dip-B 都发生漂移,但是漂移的程度不同.因此,当曲率保持不变,温度变化时,MZI 对应的 Dip-A 和 FBG 对应的 Dip-B 具有不同的灵敏度.根据文献[16],基于花生形结构的马赫-曾德干涉仪中波谷波长的漂移与温度的变化成线性关系.

芯模和包层模之间的相位差为

$$\varphi = 2\pi\Delta nL/\lambda \quad (2)$$

Δn 是芯模和包层模之间的有效折射率差, L 是两个花生形结构相互作用的长度, λ 是入射波长.透射谱光强为

$$I(\lambda) = I_{\text{core}} + I_{\text{clad}} + 2\sqrt{I_{\text{core}}I_{\text{clad}}}\cos\varphi \quad (3)$$

I_{core} 和 I_{clad} 分别是光波在纤芯和包层中的光强值.

曲率和温度的变化都会导致传感器透射谱中波谷波长的漂移.由 MZI 导致的波谷波长的漂移量为

$$\Delta\lambda_{\text{MZI}} = k_{C1}C + k_{T1}T \quad (4)$$

k_{C1} 和 k_{T1} 分别为 MZI 相对于曲率 C 和温度变化量 T 的灵敏度.由 FBG 导致的波谷波长的漂移量为

$$\Delta\lambda_{\text{FBG}} = k_{C2}C + k_{T2}T \quad (5)$$

k_{C2} 和 k_{T2} 分别为 FBG 相对于曲率 C 和温度变化量 T 的灵敏度.由于 FBG 透射谱的变化不受曲率影响,因此 $k_{C2} = 0$.

曲率和温度的同时测量可以通过测量 MZI 波谷波长和 FBG 透射光谱的波谷波长来实现.这两个参数的测量可以用矩阵形式来表达,即

$$\begin{bmatrix} C \\ T \end{bmatrix} = \frac{1}{k_{C1}k_{T2} - k_{C2}k_{T1}} \begin{bmatrix} k_{T2} & -k_{T1} \\ -k_{C2} & k_{C1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{MZI}} \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

矩阵系数中的常数可以通过实验测得 MZI 和 FBG 对温度和曲率的灵敏度决定.

3 实验结果和讨论

实验装置如图 3,传感器的一端与宽带光源相连,另一端与光谱仪连接.在曲率实验中,传感器的两端被固定在两个平台上,一个固定,另一个可移动.向前推进可移动平台使干涉仪弯曲,弯曲的半径与可移动平台向前推进的距离有关,曲率 C 与平台向移动的距离 x 的关系为^[16]

$$C \cong \sqrt{24x/L_0^3} \quad (7)$$

L_0 为两个平台之间的距离,实验中平台每次移动的距离 x 约为 0.05 mm,实验测得 x 和 L_0 的值后,带入式(7)即可算出对应的曲率.

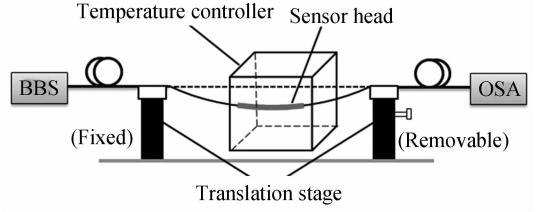


图 3 实验装置图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup

在曲率实验中,传感器的温度恒定为室温 25℃,曲率变化的透射谱如图 4,曲率的增加导致由 MZI 形成的 Dip-A 向短波方向漂移.当曲率的变化范围为 0.299 3 m⁻¹~0.733 1 m⁻¹,其波长移动超过 15 nm,同时,FBG 形成的 Dip-B 波长几乎保持不变.

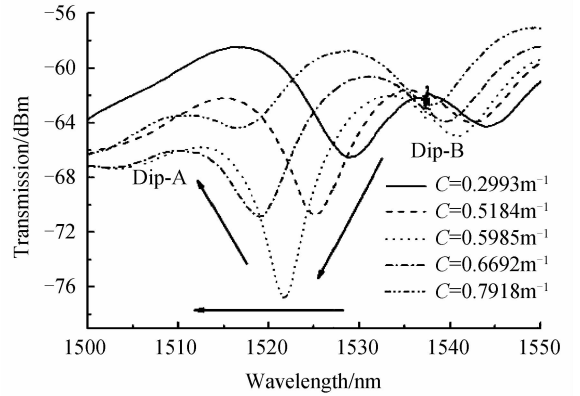


图 4 不同曲率下的透射谱

Fig. 4 Experimental transmission spectra with different curvature

Dip-A 的漂移量与曲率关系如图 5,灵敏度 $S_{\text{MZI}-c} = -27.58 \text{ nm/m}^{-1}$,线性拟合度 $R^2 = 0.981 0$.式(6)矩阵中的马赫曾德干涉仪相对于曲率 c 的灵敏度 $k_{C1} = S_{\text{MZI}-c} = -27.58 \text{ nm/m}^{-1}$, $k_{C2} = 0$.

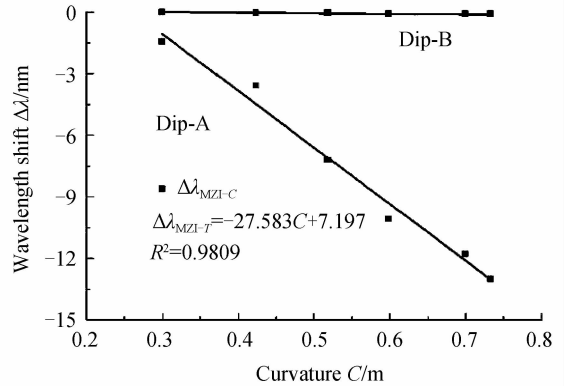


图 5 常温下波长漂移量与曲率关系

Fig. 5 Curvature response of the proposed sensor at constant temperature 25℃

在温度实验中,传感器处于平直状态,被放置在恒温箱中,然后逐渐改变温度.透射光谱如图 6,温度上

升导致透射光谱向长波方向漂移. 当温度的变化范围为 $20.0^{\circ}\text{C} \sim 45.0^{\circ}\text{C}$ 时, Dip-A 的波长增加了 0.4 nm .

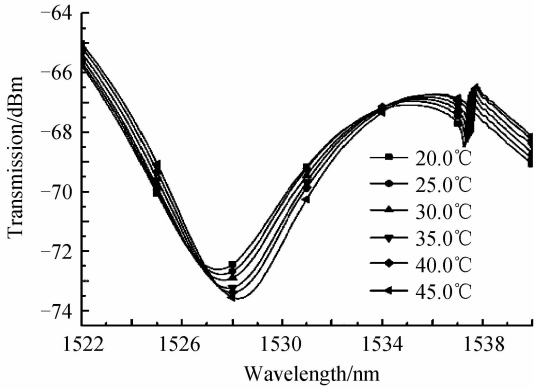


图 6 不同温度下的透射谱

Fig. 6 Experimental transmission spectra with different temperature

Dip-A 和 Dip-B 的波长漂移量与温度变化曲线如图 7. 其中离散点为实验测量值, 直线为线性拟合曲线. Dip-A 随温度变化的漂移量为 $\Delta\lambda_{\text{MZI-T}}$, Dip-B 的 FBG 波长随温度变化漂移量为 $\Delta\lambda_{\text{FBG-T}}$. Dip-A 的灵敏度 $S_{\text{MZI-T}} = 0.03869 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, 线性拟合度 $R^2 = 0.9910$. Dip-B 的灵敏度为 $S_{\text{FBG-T}} = 0.01217 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, 线性拟合度 $R^2 = 0.9976$. 两者线性拟合度都非常高, 而 MZI 对温度变化的灵敏度要高于 FBG. 式(6)矩阵中的 MZI 相对于温度 T 的灵敏度 $k_{\text{Ti}} = S_{\text{MZI-T}} = 0.03869 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, FBG 相对于温度 T 的灵敏度 $k_{\text{Ti}} = S_{\text{FBG-T}} = 0.01217 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$.

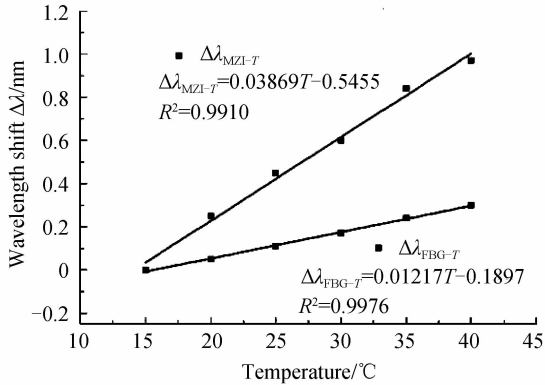


图 7 曲率不变时波长漂移量与温度关系

Fig. 7 Temperature response of the proposed sensor at constant curvature

将试验中测得各灵敏度系数代入式(6), 可得

$$\begin{bmatrix} C \\ T \end{bmatrix} = -2.980 \begin{bmatrix} 0.01217 & -0.03869 \\ 0 & -27.58 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\text{MZI}} \\ \Delta\lambda_{\text{FBG}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

通过光谱仪测量出 MZI 对应 Dip-A 的波长漂移量 $\Delta\lambda_{\text{MZI}}$ 和 FBG 对应 Dip-B 的波长漂移量 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$, 曲率和温度的变化量就可以通过矩阵公式计算得出, 从而实现同时对曲率和温度的同时测量.

4 结论

提出了一种花生形结构和 FBG 组成的光纤传感器, 可以同时测量曲率和温度. 传感器包括两部分: 马赫-曾德干涉仪和 FBG, 马赫-曾德干涉仪对温度和曲率的变化成线性关系, FBG 对曲率变化不敏感, 而与温度变化成线性关系. 整个传感器不仅实现了曲率与温度的同时测量, 而且尺寸小、灵敏度高, 曲率的变化范围为 $0.2993 \text{ m}^{-1} \sim 0.7331 \text{ m}^{-1}$ 时, 对曲率的灵敏度高达 $-27.58 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$, 温度的变化范围为 $20.0^{\circ}\text{C} \sim 45.0^{\circ}\text{C}$ 时, MZI 相对于温度的灵敏度为 $0.03869 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, FBG 相对于温度的灵敏度为 $0.01217 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$. 在曲率的测量中表现出较高的灵敏度, 高于其他同类结构的传感器^[17-19], 但测量范围相对要小一些.

参考文献

- [1] MENG Qing-qiang, DONG Xin-yong, CHEN Zhe-min, *et al.* Temperature-independent curvature sensor using FBG cladding modes based on a core misaligned splice[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(12): 804-806.
- [2] PANG Fu-fei, LIU Huan-huan, GUO Hai-run, *et al.* In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on double cladding fibers for refractive index sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(10): 2395-2400.
- [3] ZHENG Yang-zi, DONG Xin-yong, YANG Yun-guang, *et al.* Magnetic field sensor with optical fiber bitaper-based interferometer coated by magnetic fluid[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, **14**(9): 3148-3151.
- [4] ZHANG Ye-bin, GAO Shao-rui, ZHANG A P, *et al.* Optically heated long-period grating as temperature-insensitive fiber-optic refractive-index sensor [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, **4**(6): 2340-2345.
- [5] GUO Tuan, SHANG Li-bin, LIU Fu, *et al.* Polarization-maintaining fiber-optic-grating vector vibroscope[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(4): 531-533.
- [6] CHEN Luan-xiong, HUANG Xu-guang, LI Jiao-yang, *et al.* Simultaneous measurement of refractive index and temperature by integrating an external Fabry-Perot cavity with a fiber Bragg grating[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, **83**(5): 053113-053113-4.
- [7] GUO Tuan, LIU Fu, GUAN Bai-ou, *et al.* Polarimetric multi-mode tilted fiber grating sensors[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(6): 7330-7336.
- [8] PENG Zu, CHAN C C, LEW W S, *et al.* Temperature-insensitive magnetic field sensor based on nanoparticle magnetic fluid and photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, **4**(2): 491-498.
- [9] LI Tao, DONG Xin-yong, CHAN C C, *et al.* Humidity sensor with a pva-coated photonic crystal fiber interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, **13**(6): 2214-2216.
- [10] ZHAO Yu, JIN Yong-xing, LIANG Hou-hui, *et al.* Curvature sensor based on fiber loop mirror with polarization maintaining fiber[J]. *Microwave Optical and Technology Letters*, 2011, **53**(9): 2066-2068.
- [11] LI Jie-liang, ZHANG Wei-gang, Gao She-cheng, *et al.* Long-period fiber grating cascaded to an S fiber taper for simultaneous measurement of temperature and refractive index[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(9): 888-891.

- [12] SULAIMAN A, HARUN S W, AROF H, *et al.* Compact and tunable erbium-doped fiber laser with microfiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, **48**(9): 1165-1168.
- [13] WU Di, ZHU Tao, Chiang K S, *et al.* All single-mode fiber Mach-Zehnder interferometer based on two peanut-shape structures[J]. *Lightwave Technology*, 2012, **30**(5): 805-810.
- [14] SHAO Min, QIAO Xue-guang, FU Hai-wei, *et al.* An in-fiber Mach-Zehnder interferometer based on arc-induced tapers for high sensitivity humidity [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, **13**(5): 2026-2031.
- [15] LI Le-cheng, XIA Li, XIE Zhen-hai, *et al.* All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(10): 11109-11120.
- [16] GONG Hua-ping, YANG Xiao, Ni Kai, *et al.* An optical fiber curvature sensor based on two peanut-shape structures modal interferometer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(1): 22-24.
- [17] MA Lin, QI Yan-hui, KANG Ze-xin, *et al.* All-fiber strain and curvature sensor based on no-core fiber [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, **14**(5): 1514-1517.
- [18] GONG Hua-ping, SONG Hai-feng, ZHANG Su-lei, *et al.* Curvature sensor based on hollow-core photonic crystal fiber Sagnac interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, **14**(3): 777-780.
- [19] FU Xing-hu, XIE Hai-yang, ZHU Hong-bin, *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. 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.