

doi: 10.3788/gzxb20164510.1006002

双 S 型光纤结构的传感特性

王志平, 龚华平, 熊梦玲, 赵春柳, 董新永

(中国计量学院 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

摘 要:在剥除涂覆层的单模光纤上熔成两个间距为 25 mm 的 S 型结构, 构成双 S 型全光纤马赫-曾德干涉仪. 入射光经过第一个 S 型结构时部分光被激发到包层, 经过第二个 S 型结构时重新进入纤芯传播, S 型结构中光纤的纤芯模和包层模耦合产生干涉. 利用干涉光谱测量外界因素的响应并用于温度、折射率和微位移的测量. 实验结果表明, 温度、折射率和微位移的灵敏度分别为 69 pm/°C, 132.64 nm/RIU, -178 pm/μm, 且具有很好的线性度. 该传感结构为全光纤结构, 制作简单, 易于实现且成本低.

关键词:马赫-曾德干涉仪; 温度; 折射率; 微位移

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)10-1006002-5

Sensing Characteristics of Daul S-shape Optical Fiber Structure

WANG Zhi-ping, GONG Hua-ping, XIONG Meng-ling, ZHAO Chun-liu, DONG Xin-yong
(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A section of the single mode optical fiber stripping coated layer was discharged into two S-shape in a splicer at a distance of 25 mm and a Mach-Zehnder interferometer based on daul S-shape structure was formed. Part of the light can be excited into the cladding mode at the first S structure and return to the core mode at the second one. The S structure leads to the coupling between the core mode and the cladding mode and generates interference. Using the interference spectra to measure the response to external factors like temperature, refractive index, and micro displacement. Experimental results show that the sensitivities of temperature, refractive index and micro displacement are 69 pm/°C, 132.64 nm/RIU, -178 pm/μm, respectively, and the measurement has a good linearity. The sensor has the merits of all-fiber structure, easy-fabricated and low-cost.

Key words: Mach-Zehnder interferometer; Temperature; Refractive index; Micro displacement

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

0 引言

近年来,随着光纤传感技术的发展,光纤传感器因其体积小、抗化学腐蚀、抗电磁干扰和测量准确度高等优点被广泛应用. 不同类型的光纤传感器如长周期光栅光纤传感器、布喇格光纤光栅传感器、光子晶体光纤传感器以及基于马赫-曾德干涉仪原理的普通单模光纤传感器在温度^[1]、应变^[2]、折射率^[3]、液位^[4]、曲率^[5]和磁场^[6]等外界物理量的测量中应用广泛. 在实际工程应用中,温度、折射率和微位移都是重要的参量,因此需要对其进行精密测量. 全光纤马赫-曾德干涉仪由

于结构简单、灵敏度高、波长范围大等优点在光纤传感领域中受到越来越多的重视. 研究人员提出了几种基于马赫-曾德干涉仪原理的光纤传感器,比如:双球型光纤传感器用于温度测量^[7],其温度灵敏度为 0.119 3 nm/°C;双锥型光纤传感器用于微位移和应力测量^[8],其灵敏度分别为 -1.533 nm/μm 和 -177.1 nm/N;郝霞等^[9]制作了灵敏度为 0.044 9 nm/°C 的错位型光纤温度传感器. 耿友福等^[10]制作了温度测量灵敏度为 70 pm/°C 的腰椎放大型光纤传感器;杨睿等^[11]制作了对应力敏感的 S 型光纤传感结构,其灵敏度为 -60 pm/με;多模和花生型结构级

基金项目:浙江省安全生产科技计划项目(No. 2014A1004)、浙江省科技计划公益项目(No. 2014C33065)和浙江省重中之重学科开放基金项目(No. JL150545)资助

第一作者:王志平(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感. Email: 1192928374@qq.com

导师(通讯作者):龚华平(1977-),男,副教授,博士,主要研究方向为光纤传感和非线性光学. Email: gonghp@163.com

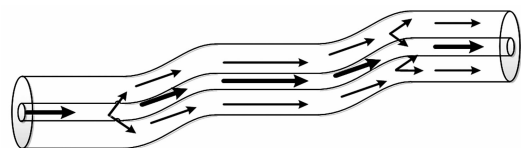
收稿日期:2016-04-21; **录用日期:**2016-06-08

联构成的光纤传感器用于同时测量折射率和温度^[12], 灵敏度分别为 -86.7434 nm/RIU 和 $0.0590 \text{ nm/}^\circ\text{C}$; 赵勇等^[13]制作的双错位中间级联锥形结构的光纤折射率传感器灵敏度为 78.7 nm/RIU . 另外还有一些光纤传感结构如基于光子晶体光纤的高灵敏度折射率传感器^[14], 光子晶体光纤上塌陷空气孔, 单模光纤间熔接无心光纤等, 然而在实际应用中这些传感器存在成本高、制作复杂、机械强度不高等缺点.

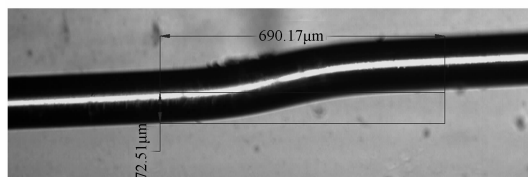
本文提出一种基于双 S 型结构的光纤马赫-曾德传感结构. 在单模光纤上隔 25 mm 的距离拉制两个 S 型结构, 形成双 S 型的光纤传感结构. 理论和实验分析了双 S 型结构光纤传感结构对外界温度、折射率和微位移的响应特性, 通过观测干涉谱中干涉谷的波长位移变化实现对折射率、微位移和温度的测量. 与其他光纤传感结构如花生型^[15]、腰椎放大型^[16]、球型^[17]等相比, 双 S 型结构制作过程简单、测量精确、灵敏度高.

1 传感结构与原理

双 S 型光纤传感结构由单模光纤上的两个 S 型结构组成, 如图 1(a). 实验采用光纤熔接机 (Fujikura FSM-60 s) 制作光纤 S 型结构, 其制作流程为: 设置熔接机熔接成 S 型结构的模式, 将光纤涂覆层剥除置于熔接机中, 然后调解纵向错位量, 进行放电, 光纤熔融成 S 型结构. 如图 1(b), 单个 S 型结构的长度为 $690 \mu\text{m}$. 传感结构的工作原理为: 光源输出的光从单模光纤输入, 传送到第一个 S 型结构点时, 由于芯径的不匹配, 部分光束被耦合进包层, 另一部分光继续在纤芯中传输; 经过第二个 S 型结构点时, 包层中的光束耦合进纤芯经单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF) 输出, 形成全光纤马赫-曾德传感结构.



(a) Schematic of the proposed MZI sensor



(b) S-shape structure of micrograph

图 1 传感结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensing structure

输入光经过双 S 型结构传输后, 由于纤芯与包层存在有效折射率差, 在这两部分介质传输的光产生光程差, 由光程差导致纤芯和包层模式产生的相位差为^[4]

$$\Phi_m = 2\pi\Delta n_{\text{eff}}L/\lambda_m \quad (1)$$

谐振波长需满足 $\Phi = (2m+1)\pi$, 由此进一步推

导出

$$\lambda_m = 2\Delta n_{\text{eff}}L/(2m+1) \quad (2)$$

谐振波长随温度的变化通过求导得到

$$\Delta\lambda_m = \left[\frac{L_0}{2m+1} \frac{\partial(\Delta n_{\text{eff}})}{\partial T} + \frac{\Delta n_{\text{eff}}^0}{2m+1} \frac{\partial L}{\partial T} \right] \Delta T \quad (3)$$

式中 L_0 是传感结构的初始长度, Δn_{eff} 是在室温下的有效折射率差, 式(3)可以写成

$$\Delta\lambda_m = \left[\delta \frac{L_0}{2m+1} + k \frac{\Delta n_{\text{eff}}^0}{2m+1} \right] \Delta T \quad (4)$$

式(4)中 δ 是光线的热光系数, k 是光纤的热膨胀系数, 且两者都为正数, 因此可以看出当温度变化时, 波长随温度呈线性变化.

在进行折射率实验时, 光纤纤芯有效折射率不随外界折射率的变化而变化, 但是光纤包层有效折射率会随之变化. 光纤纤芯和包层折射率的差值表示为 $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$, 式(2)可以写成

$$\lambda_m = \frac{2L(n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad}})}{2m+1} \quad (5)$$

式中 m 为整数, λ_m 为干涉峰对应的波长值. 实验中只改变纤芯和包层之间的折射率差, 其他变量不变. Δn_{eff} 的变化分为两种情况: 当被激发的包层模为低阶模时, 随着外界折射率的增大 Δn_{eff} 减小, 谐振波的干涉峰蓝移; 当被激发的包层模为高阶模时, Δn_{eff} 随着外界折射率的增大而增大, 谐振波的干涉峰红移^[11]. 由式(5)可以看出当外界折射率发生变化时, 波长随之发生线性改变.

在进行微位移实验时, 纤芯模和包层模之间的相位差仍然满足式(1). 微位移引起应变变化, 谐振波长随应变的变化可以通过对式(2)求导得到, 有

$$\Delta\lambda_m = \frac{2kL_0}{2m+1} \Delta\epsilon \quad (6)$$

式中 k 为光纤的折射率应变系数^[5], 谐振波长与应变或微位移呈线性关系.

2 实验和讨论

2.1 温度实验

本文提出的双 S 型结构光纤传感结构测量温度的实验装置如图 2. 输入光为宽带光源产生的 $1510 \sim 1580 \text{ nm}$ 宽带光. 传感结构产生的干涉光最终输入光谱仪, 光谱仪的最小分辨率为 20 pm . 将传感结构固定在温控装置上, 整个温控装置放在一个密闭的空间内, 避免外界环境温度的影响. 调节温控装置的温度, 待温度稳定后记录光谱仪的数据.

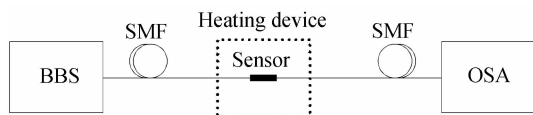


图 2 温度实验装置

Fig. 2 Temperature experiment device

实验时温度从 30℃ 逐渐增加到 38℃,每隔 2℃ 记录一次波长变化,温控箱温度的准确度为 ±0.1℃。在软件中选取 1555.62 nm 的谐振波谷进行温度测量。从图 3 中可以看出随着温度的升高,谐振波长有规律地向长波长方向移动(红移)。当温度从 30℃ 增加到 38℃ 时,波长漂移了 564 pm。对波长随温度的变化进行线性拟合,如图 3(b),线性拟合度达 0.996,表明波长漂移量与温度之间具有良好的线性关系,传感结构的温度灵敏度为 69 pm/℃。将温度从 38℃ 逐渐降到 30℃ 时,温度的灵敏度为 67pm/℃,线性拟合度达 0.995,表明该传感结构对温度测量的灵敏度具有很好的稳定性。考虑到光谱仪的波长准确度为 0.02 nm,该传感结构测量温度的准确度达 0.29℃。

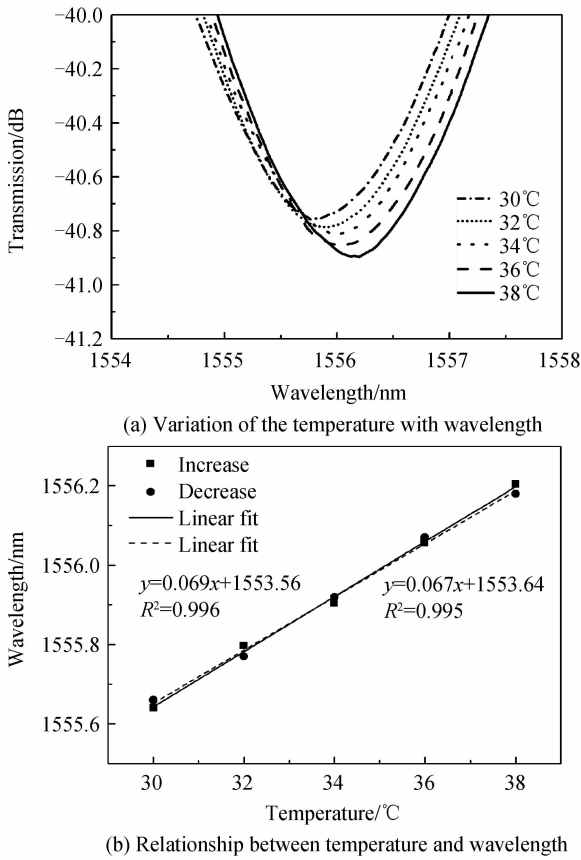


图 3 干涉波长与温度的关系

Fig. 3 Relationship between interference wavelength and temperature

2.2 折射率实验

图 4 为折射率实验装置图,将传感结构架在一个升降平台上,让传感结构和升降台紧密接触,然后在传感结构上滴入折射率液。待光谱仪的数据稳定后,记录实验结果。记录结束后,将升降台下移,使传感结构和平台分离,用纸巾擦干平台,再次将其升高和传感结构紧密接触。如此重复上述操作步骤即可实现对一系列折射率不同的折射率液的测量。实验中,折射率液由甘油溶液和水配制,并使用阿贝折射仪进行标定,其误差

范围为 ±0.0001。

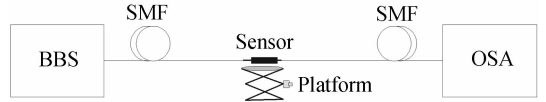


图 4 折射率实验装置

Fig. 4 Refractive index experiment device

测量折射率液时,取初始波长为 1532.74 nm 的波谷用于折射率测量,此处的干涉峰比较明显,不同折射率液的透射谱如图 5(a)。折射率液的测量范围从 1.3324 变化到 1.3669,取 8 个数据测量点。从光谱图中可以看出,随着折射率的升高,谐振波长有规律地向长波长方向移动(红移)。折射率从 1.3324 增加到 1.3669,波长漂移了 4.8 nm。选取不同折射率下的干涉峰对应的波长进行线性拟合,结果如图 5(b)。传感结构的灵敏度为 132.64 nm/RIU,且线性拟合度达 0.996。用相同的折射率液从高浓度逐渐降低到低浓度,传感结构的灵敏度为 128.03 nm/RIU,线性拟合度为 0.997,实验表明传感结构的折射率灵敏度很稳定。该传感结构测量折射率的准确度可达 1.5×10^{-4} RIU。

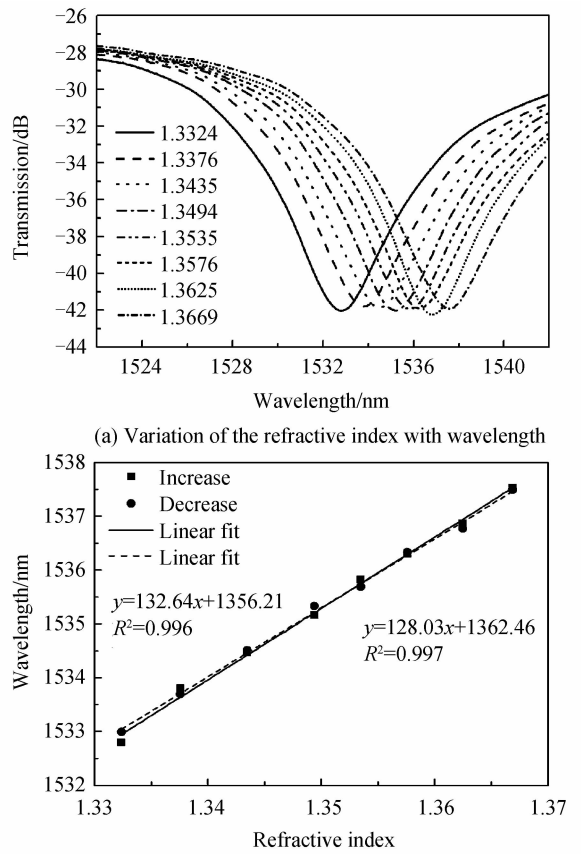


图 5 干涉波长与折射率的关系

Fig. 5 Relationship between interference wavelength and refractive index

2.3 微位移实验

如图 6,将传感头的两端固定在微位移平台的光纤槽内,使传感结构处于紧绷状态。然后在光纤输入端

接上宽带光源,输出端接上光谱仪.旋转微位移平台的旋钮,每次将传感结构向外拉伸 $5\ \mu\text{m}$.当光谱仪的数据稳定时,记录光谱仪的数据.

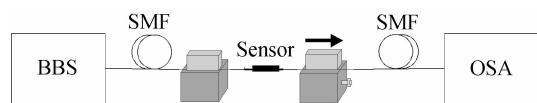
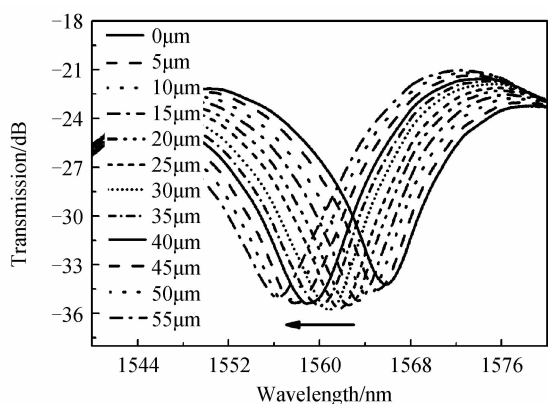


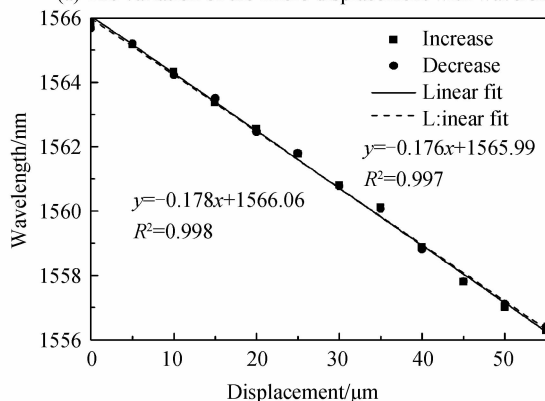
图6 微位移实验装置

Fig.6 Micro displacement experiment device

选用初始波长为 $1\ 565.84\ \text{nm}$ 的波谷用于微位移测量.调节微位移平台,共向外拉伸 $55\ \mu\text{m}$.从光谱图中可以看出传感结构沿轴向方向不断向外拉伸,从图7(a)中可以看出干涉峰对应的中心波长有规律地向波长小的方向漂移.微位移从 $0\ \mu\text{m}$ 增加到 $55\ \mu\text{m}$,波长漂移了 $9.64\ \text{nm}$.不同微位移下的干涉峰对应的波长值与微位移变化的关系如图7(b).从图中可以看出其拟合线性度很高,达到 0.998 ,传感结构的灵敏度为 $-178\ \text{pm}/\mu\text{m}$.用相反的操作将微位移从 $55\ \mu\text{m}$ 减小到 $0\ \mu\text{m}$,传感结构的灵敏度为 $-175\ \text{pm}/\mu\text{m}$,线性拟合度为 0.997 ,从实验结果可以看出传感结构的稳定性较好.该传感结构测量微位移的准确度可达 $0.11\ \mu\text{m}$.



(a) The variation of the micro displacement with wavelength



(b) Relationship between micro displacement and wavelength

图7 干涉波长与微位移的关系

Fig.7 Relationship between interference wavelength and micro displacement

本文提出的双S型马赫-曾德光纤传感结构在温度、折射率和微位移实验中均保持单一量变化,在测量

一个物理量的同时另外两个量保持不变.传感结构对外界折射率和微位移的变化十分敏感,而对温度的灵敏度相对较低.实验中改变传感结构的有效长度也会对实验结果产生影响.当双S型结构的长度由 $12\ \text{mm}$ 改变到 $30\ \text{mm}$ 时,其对温度的灵敏度在 $27\ \text{pm}/\text{C}$ 到 $69\ \text{pm}/\text{C}$ 之间变化,且当结构长度为 $25\ \text{mm}$ 时,结构灵敏度最高为 $69\ \text{pm}/\text{C}$,比文献[1]、[17]、[18]中提到的灵敏度低而高于文献[7]和[9]中提出的结构灵敏度.折射率实验的灵敏度为 $132.64\ \text{nm}/\text{RIU}$,在相同折射率变化区间内高于文献[3]和文献[18]中提出的结构灵敏度.微位移实验的灵敏度为 $-178\ \text{pm}/\mu\text{m}$,高于文献[16]中提出的结构灵敏度而低于文献[8]中提出的结构灵敏度.实验中温度与折射率的交叉灵敏度为 $5.2 \times 10^{-4}\ \text{RIU}/\text{C}$,交叉灵敏度很低,可以在测量折射率时忽略温度的影响.温度对微位移的交叉灵敏度为 $0.39\ \mu\text{m}/\text{C}$,在微位移的测量中温度对微位移灵敏度有一定的影响,可以在实际应用中级联一个FBG监测温度的变化.

3 结论

基于马赫-曾德干涉原理,提出一种双S型结构的光纤传感结构,构成全光纤的马赫-曾德干涉仪.通过干涉谱中的干涉峰的变化测量光纤温度,折射率,微位移的变化.实验结果表明:温度从 $30\ \text{C}$ 变化到 $38\ \text{C}$ 范围内灵敏度为 $69\ \text{pm}/\text{C}$;折射率液在 $1.332\ 5 \sim 1.366\ 9$ 范围内灵敏度为 $132.64\ \text{nm}/\text{RIU}$;微位移在 $0\ \mu\text{m}$ 到 $55\ \mu\text{m}$ 范围内灵敏度为 $-178\ \text{pm}/\mu\text{m}$.此传感结构有很好的线性度,且制作简单,成本低.

参考文献

- [1] SHI Jia, WANG Yu-ye, XU De-gang, *et al.* Temperature sensor based on fiber ring laser with Sagnac loop[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(7): 794-797.
- [2] YANG Rui, YU Yong-sen, CHEN Chao, *et al.* S-tapered fiber sensors for highly sensitive measurement of refractive index and axial strain[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(19): 3126-3132.
- [3] PANG Fu-fei, LIU Huan-huan, GUO Hai-run, *et al.* In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on a dual cladding fibers for refractive index sensor[J]. *IEEE Sensor Journal*, 2011, **11**(10): 2395-2400.
- [4] GONG Hua-ping, SONG Hai-feng, ZHANG Su-lei, *et al.* An optical liquid level sensor based on polarization-maintaining fiber modal interferometer [J]. *Sensors and Actuators A*, 2014, **205**: 204-207.
- [5] GONG Hua-ping, YANG Xiao, NI Kai, *et al.* An optical fiber curvature sensor based on dual peanut-shape structures modal interferometer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(1): 22-24.
- [6] ZHENG Yan-zi, DONG Xin-yong, YANG Run-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.
- [7] CAO Zhi-gang, ZHANG Zhao, JI Xiao-chun, *et al.* Strain-

- insensitive and high temperature fiber sensor based on a mach-zehnder modal interferometer[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, **20**: 24-27.
- [8] CHEN Jin-ping, ZHOU Jun. M-Z interferometer constructed by dual s-bend fibers for displacement and force measurements [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **4**(15): 837-840.
- [9] HAO Xia, TONG Zheng-rong, ZHANG Wei-hua, *et al.* A fiber laser temperature sensor based on SMF core-offset structure[J]. *Optics Communications*, 2015, **1**(15): 78-81.
- [10] GENG You-fu, LI Xue-jin, TAN Xiao-ling, *et al.* High-sensitivity mach-zehnder interferometric temperature fiber sensor based on a waist-enlarged fusion bitaper[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(11): 2891-2894.
- [11] YANG Rui, YU Yong-sen, XUE Yang, *et al.* Single S-tapered fiber Mach-Zehnder interferometers [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(23): 4482-4484.
- [12] WANG Hui-hao, MENG Hong-yun, XIONG Rui, *et al.* Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on asymmetric structures modal interference[J]. *Optics Communications*, 2016, **364**: 191-194.
- [13] ZHAO Yong, LIA Xue-gang, CAI Lu. A highly sensitive Mach-Zehnder interferometric refractive index sensor based on core-offset single mode fiber[J]. *Sensors and Actuators A*, 2015, **223**: 119-124.
- [14] QI Wan-ga, KONG Ling-xin, DANG Yun-li. High sensitivity refractive index sensor based on splicing points tapered SMF-PCF-SMF structure mach-zehnder mode interferometer[J]. *Sensors and Actuators B*, 2016, **225**: 213-220.
- [15] SUN Ming-ming, JIN Yong-xing, DONG Xin-yong. All-fiber Mach-Zehnder interferometer for liquid level measurement [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, **15**(7): 3984-3988.
- [16] WANG Yi-ping, DAVID R, GILBERTO B, *et al.* Intensity measurement bend sensors based on periodically tapered soft glass fibers[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(4): 558-560.
- [17] YUAN Shuo, TONG Zheng-rong, ZHAO Jun-fa, *et al.* High temperature fiber sensor based on spherical-shape structures with high sensitivity[J]. *Optics Communications*, 2014, **12**(1): 154-157.
- [18] ZHANG Lei, WANG Dong-ning, LIU Ji-bing, *et al.* Simultaneous refractive index and temperature sensing with precise sensing location [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(8): 891-894.