

doi: 10.3788/gzxb20164502.0206006

光纤锥在线型马赫-曾德干涉仪的折射率传感特性

兆雪¹, 邵敏¹, 乔学光², 傅海威¹, 贾振安¹

(1 西安石油大学 理学院 光纤传感实验室, 西安 710065)

(2 西北大学 物理学院, 西安 710069)

摘 要:提出了一种基于光纤锥的在线型光纤马赫-曾德干涉仪式折射率传感器. 传感器是在一根单模光纤上使用光纤熔接机拉制出两个光纤锥, 光纤锥的直径为 $43.7 \mu\text{m}$, 长度为 $480 \mu\text{m}$. 干涉仪中光纤锥充当光纤耦合器, 激发出光纤高阶模, 并将高阶模耦合进单模光纤使之与纤芯基模形成模间干涉. 被环境溶液的折射率、温度的变化改变模式间相位差, 将导致干涉仪的传输光谱发生漂移, 从而实现传感测量. 实验结果表明: 当环境溶液的折射率变化范围为 $1.335 \sim 1.403 \text{RIU}$ 时, 传感器的折射率灵敏度为 -128.233 nm/RIU ; 当水溶液的温度变化范围为 $30 \sim 75^\circ\text{C}$ 时, 传感器的温度灵敏度为 $0.111 \text{ nm/}^\circ\text{C}$. 该传感器具有制作方法简单、灵敏度高、成本低等特点, 可应用于生物传感测量.

关键词: 光纤传感; 马赫-曾德干涉仪; 光纤锥; 模间干涉; 折射率传感; 折射率灵敏度

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)02-0206006-5

Refractive Index Sensing of In-Fiber Mach-Zehnder Interferometer Based on Two Fiber Tapers

ZHAO Xue¹, SHAO Min¹, QIAO Xue-guang², FU Hai-wei¹, JIA Zhen-an¹

(1 Laboratory of optical fiber sensing, School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

(2 School of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: A kind of in-fiber Mach-Zehnder interferometer based on fiber taper was proposed. The sensor is formed by cascaded two fusion tapers in single-mode fiber through a fusion splicer. The fiber taper has a diameter of $43.7 \mu\text{m}$ and length of $480 \mu\text{m}$. The fiber taper acts as couplers, it could not only excite the high-order modes, but also couple these modes into single-mode fiber to form the intermodal interference. When surrounding refractive index and temperature of the surrounding liquid changes, the intermodal phase difference changes. Through monitoring the transmission spectrum of the interferometer, the refractive index and temperature were determined. The experimental results show that the sensor sensitivity is -128.33 nm/RIU in the RI range of $1.335 \sim 1.403 \text{RIU}$, and the temperature sensitivity is $0.111 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ in the water temperature range of $30 \sim 75^\circ\text{C}$. The sensor has advantages of easy fabrication, high sensitivity, and inexpensive, which has a potential in biological sensing.

Key words: Fiber sensing; Mach-Zehnder interferometer; Fiber taper; Intermodal interference; Refractive index sensing; Refractive index sensitivity

OCIS Codes: 060.2370; 060.2380; 040.1880; 060.5060; 130.6010

0 引言

在线型光纤马赫-曾德干涉仪 (Mach-Zehnder

Interferometer)^[1-3] 具有体积小、结构简单、灵敏度高等优点, 而且无需使用光纤耦合器, 用单根光纤就可实现光束干涉. 因此被广泛用于折射率^[4-5]、温度^[6-7]、湿

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61275088, 61327012)、陕西省教育厅科研计划项目 (No. 14JK1580) 和西安石油大学校级创新基金 (No. YS28032509) 资助

第一作者: 兆雪 (1982-), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: zhaoxuet108@xsyu.edu.cn

通讯作者: 邵敏 (1979-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: shaomin@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2015-07-22; 录用日期: 2015-11-26

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

度^[8]、应变、液位^[9]的传感测量中,是近年来光纤传感器研究的热点之一.在线型光纤马赫-曾德干涉仪的基本原理是制作特殊的光纤结构激发出光纤的高阶模,再将其与纤芯基模进行耦合,利用光纤中高阶模和纤芯基模之间的有效折射率差产生模间相位差,形成模间干涉.根据激发模式的方式不同,在线型光纤马赫-曾德干涉仪一般可分为:错位型^[10]、纤芯失配型^[11]、光纤锥型^[12]、光纤气泡型^[13]和光纤缺陷型^[14]等.其中,错位型是在光纤熔接时使两根光纤的纤芯有一定的偏移量,因此在熔点处部分高阶模可进入纤芯;纤芯失配型是熔接不同芯径的光纤,造成纤芯直径不匹配去激发高阶模;光纤锥型是使用研磨法、化学腐蚀法或熔融拉制法,使得光纤的直径发生突变(变细或变粗),激发出光纤的高阶模;光纤气泡型是在光纤端面上制作出空气气泡,再进行熔接形成空气腔而产生高阶模;光纤缺陷型是使用飞秒激光器在光纤的纤芯或包层上打孔形成缺陷激发高阶模.上述在线型光纤马赫-曾德干涉仪中,由于光纤锥锥区直径较细,对外界环境的折射率变化非常敏感,因此光纤锥型马赫-曾德干涉仪在折射率传感测量中引起了研究者的广泛关注,取得了很多研究成果.2009年,WEI Tao使用CO₂激光器在单模光纤上制作了光纤锥型马赫-曾德干涉仪^[15],实现了折射率测量.2011年,WU Di制作了基于三个光纤锥级联的折射率传感器,传感器的折射率灵敏度为28.6 nm/RIU^[16].2012年,BIAXOLI C R在多模光纤上拉制出光纤锥,形成单模-多模光纤锥-单模光纤结构,实现了折射率测量^[17].刘奇等人在光子晶体光纤上拉制出光纤锥,并得到了500 nm/RIU的折射率灵敏度^[18].同年,Yang Rui制作了S型光纤锥,最高灵敏度可达2 066 nm/RIU^[19].上述干涉仪中,单模光纤锥型马赫-曾德干涉仪制作方法更为简便、低廉,具有一定的实用价值,但其折射率灵敏度较低,仍需进一步提高.

常见的光纤锥制作法中,研磨法是使用机械研磨抛光的方法将光纤打磨成圆锥形;化学腐蚀法是使用氢氟酸等化学试剂对光纤进行腐蚀,通过控制酸液浓度和腐蚀时间,可以得到不同直径的光纤锥.与化学腐蚀法和研磨法相比,熔融拉锥法的工艺安全、简单、可操作性强.目前,熔融拉锥法多是利用火焰加热和激光加热,在加热时向两端拉伸光纤,可造成光纤直径在轴向方向发生变化.这种制作方法需要使用步进电机控制光纤的拉伸速度,增加了制作成本.而且拉制出的光纤锥较长,容易断裂,在应用中有一定的局限.基于此,本文利用普通光纤熔接机,使用电弧放电法,在单模光纤上拉制出两个光纤锥,构成在线型光纤马赫-曾德干涉仪,并将其应用在折射率传感测量中.该传感器的制作方法简便、易于操作、无需腐蚀或使用其他机械装

置,且灵敏度高,有一定的应用前景.

1 传感器原理

基于光纤锥的马赫-曾德干涉仪的基本原理如图1,第一个光纤锥将单模光纤中传输的高阶模LP_{0m}激发出来,然后高阶模LP_{0m}与纤芯基模LP₀₁在单模光纤中进行传输一段距离后,高阶模LP_{0m}与纤芯基模LP₀₁在第二个光纤锥中相遇耦合并经由单模光纤输出.由于高阶模和纤芯基模之间存在着有效折射率差,导致二者产生相位差,进而发生干涉.图1中L是两个光纤锥之间的距离,d是光纤锥的直径,l是光纤锥的长度.

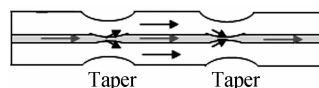


图1 传感器的结构

Fig.1 Scheme of the sensor

包层模LP_{0m}与纤芯基模LP₀₁的相位差可以表示为^[20]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}} L \quad (1)$$

式中 λ 是光波波长, $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl,m}}$ 是纤芯基模与高阶模的有效折射率之差.

透射光谱的强度为

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

式中 I_{clad} 和 I_{core} 分别是高阶模和纤芯基模的强度.由于高阶模与纤芯基模在单模光纤中传输时存在着相位差,所以当外界环境的温度、折射率、应变等发生改变时,相位差也随之改变,透射光谱的形状也会改变.实验中,可以通过监测传输光谱的改变,来确定外界环境的变化.

2 传感器制作

双光纤锥型马赫-曾德干涉仪的制作是通过商用光纤熔接机(Furukawa, S177B)实现的.具体的制作方法如下:选用一段单模光纤(SMF-28),剥去其涂覆层,酒精擦拭干净后,用光纤切刀(Furukawa, S325)将单模光纤的两个端面切除平整后放置在光纤熔接机上.为了拉制出光纤锥,需重新设置熔接机的熔接参量,选用SM-SM的熔接方式,将放电强度设为100,推进距离设为5 μm ,放电时间设置为1 400 ms.由于选用了较小的推进距离,使得两段光纤的重叠量变小.当熔接机放电时,两段光纤被向后推移,熔接点的直径逐渐变小,形成了光纤锥.实验中发现,放电强度、推进距离、和放电时间不同时,熔融得到的光纤锥尺寸不同.在同一设置参量下,光纤锥尺寸有较好的重复性.同时,光纤端面的质量对光纤锥的影响较大,因此实验中需严格控制光纤切割质量.

图2是光纤锥的照片.实验测得光纤锥的直径为

43.7 μm ,而普通光纤则为 125 μm . 光纤锥的长度约为 480 μm . 在单模光纤的另一端用同样的熔接方法拉制出第二个光纤锥,级联两个光纤锥就可制作出在线型光纤马赫-曾德干涉仪.

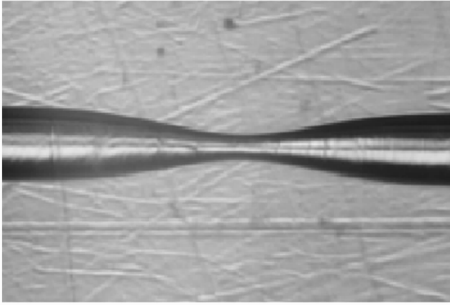


图2 光纤锥的照片

Fig. 2 Photograph of the fiber taper

图3是干涉长度为 9 mm 和 26 mm 的在线型光纤马赫-曾德干涉仪的输出光谱. 实验中使用的宽带光源的带宽为 80 nm,光谱仪的分辨率为 0.02 nm. 从图3可以看出干涉仪的干涉条纹清晰,最大对比度为 20 dB. 由于采用的是电弧放电熔接方法,造成了能量损耗,约为 5 dB. 随着干涉长度的增加,干涉条纹数目也在增加.

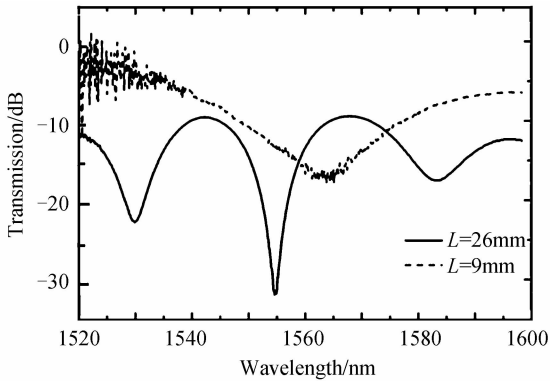


图3 不同干涉长度下 MZI 的透射光谱

Fig. 3 Transmission spectra of the MZI in different interference lengths

3 实验结果与讨论

由于干涉长度为 26 mm 的马赫-曾德干涉仪的干涉光谱清晰,自由光谱范围大于 20 nm,因此对该干涉仪进行折射率测量. 实验装置见图 4,传感器的一端接宽带光源,另一端接光谱仪. 由于在线型光纤马赫-曾德干涉仪的工作原理是模间干涉,因此这类传感器对弯曲较为敏感. 为保证实验数据的准确性,传感器绷直后,其两端被光纤夹具固定在载玻台上. 折射率传感实验中配置不同浓度的蔗糖溶液作为折射率测量样本,将蔗糖溶液用滴管滴在传感器上,记录传感器的透射光谱. 每组实验完毕后,用水和酒精反复清洗传感头,晾干后方可进行下一组测量.

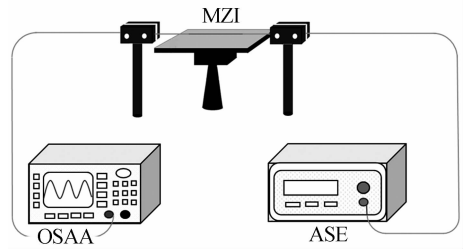


图4 实验装置

Fig. 4 Experimental setup

折射率传感实验中,实验室的温度为 28 $^{\circ}\text{C}$. 图5是传感器在不同环境溶液折射率下的透射光谱. 从图中可以发现,随着环境折射率的增加,传感器的透射光谱向短波方向移动,即蓝移.

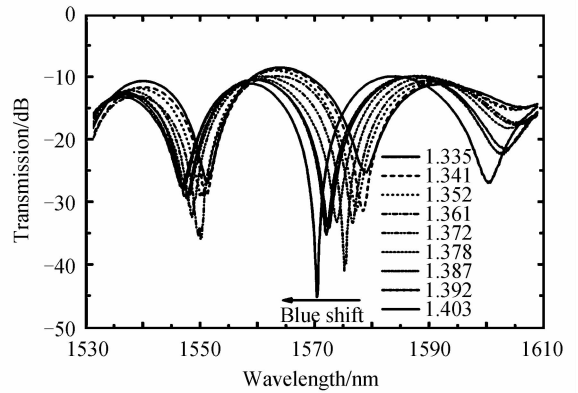


图5 不同环境折射率下传感器的透射光谱

Fig. 5 Transmission spectra of the MZI in different surrounding refractive indices

当环境折射率从 1.335RIU 增加至 1.403RIU,透射谱中的干涉谷(空气光谱中位于 1583.24 nm)向短波方向漂移了 8.5 nm. 图6是传感器的折射率灵敏度曲线,该图表明双光纤锥型马赫-曾德干涉仪的折射率灵敏度为 -128.333 nm/RIU ,不仅高于双单模光纤锥型马赫-曾德干涉仪^[21]的折射率灵敏(17.1 nm/RIU),也大于级联三单模光纤锥型马赫-曾德干涉仪的折射率灵敏度(28.6 nm/RIU)^[16],同时也高于基于纤芯失配型的单模-多模-细芯-单模光纤结构(-25.29 nm/RIU)

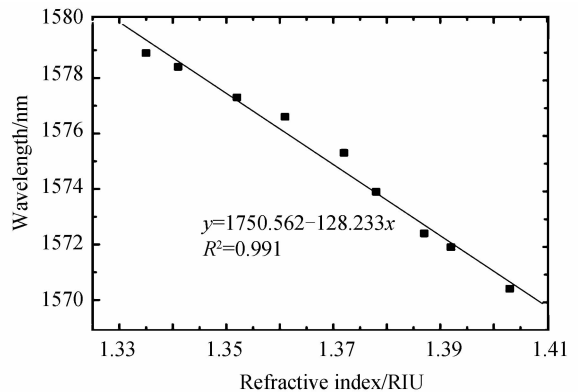


图6 传感器的折射率灵敏度曲线

Fig. 6 Refractive index sensitivity curve of the MZI

RIU)^[22].而且与上述干涉仪相比,本文提出的干涉仪制作过程更为简单.

为了进一步分析干涉仪的模间干涉原理,对传感器的折射率响应光谱(图5)进行快速傅里叶变换,得到相应的空间频谱,见图7.图7中传感器的空间频谱中有一个显著的峰值和几个较为微弱的峰值,表明有多个高阶模被光纤锥激发出来并与纤芯基模发生了耦合,但是干涉花样主要由某一个特定的高阶模决定.当环境溶液的折射率不同时,主峰的峰值频率保持不变,说明在折射率传感实验中参与干涉的主要高阶模式没有发生改变.从图7可以得到空间频谱的主峰峰值频率为 0.039 nm^{-1} .

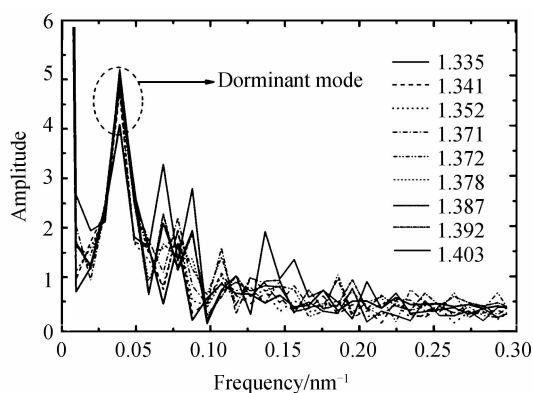


图7 不同环境折射率下传感器的空间频谱

Fig. 7 Spatial frequency spectra of the MZI in different surrounding refractive indices

空间频谱的峰值空间频率 ξ 与干涉花样之间的关系为

$$\cos(2\pi\xi\Delta\lambda) \quad (3)$$

对式(1)在中心波长 λ_0 处展开得到

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_0 - \frac{2\pi\Delta\lambda}{\lambda_0^2} \Delta n_{\text{eff}} L \quad (4)$$

将式(3)与式(4)进行比较,可以得到

$$\xi = \frac{1}{\lambda_0^2} \Delta n_{\text{eff}} L \quad (5)$$

令 $\lambda_0 = 1550\text{ nm}$,根据式(5)可计算出 $\Delta n_{\text{eff}} = 3.6 \times 10^{-3}$.使用三层阶跃单模光纤理论模型,取 $n_1 = 1.4681$, $n_2 = 1.4628$, $n_3 = 1.0$, $r_1 = 4.5\text{ }\mu\text{m}$, $r_2 = 62.5\text{ }\mu\text{m}$,计算出各高阶模式的 Δn_{eff} .进行对比后发现,LP₀₈与LP₀₁之间的有效折射率差与实验结果相符,这意味着该干涉仪中参与干涉的主要模式是LP₀₈.

当待测溶液的温度发生变化时,由于热光效应,会改变模式的有效折射率和传感臂的长度,同时溶液的折射率也会发生变化,这些都导致干涉光谱的漂移.因此本文讨论了温度对折射率测量结果的影响,温度实验中,将传感器放进水里,对水进行加热,记录不同水温下传感器的透射光谱.

图8为不同水温下传感器的透射光谱.该图表明

当水温从 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 增加至 $75\text{ }^\circ\text{C}$,传感器的透射光谱向长波方向移动了 4.7 nm .水温增加时,水的折射率减小,传感器的透射光谱应发生红移,当水温改变 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 时,水的折射率变化约为 -0.005 RIU ,根据传感器的折射率灵敏度可计算出传感器的透射光谱应红移 0.65 nm .这说明温度变化所改变溶液的折射率对温度传感实验结果的影响较小,温度变化主要体现在热光效应上.图9是传感器的温度灵敏度曲线,从图中可以得到传感器的温度灵敏度为 $0.111\text{ nm}/^\circ\text{C}$.

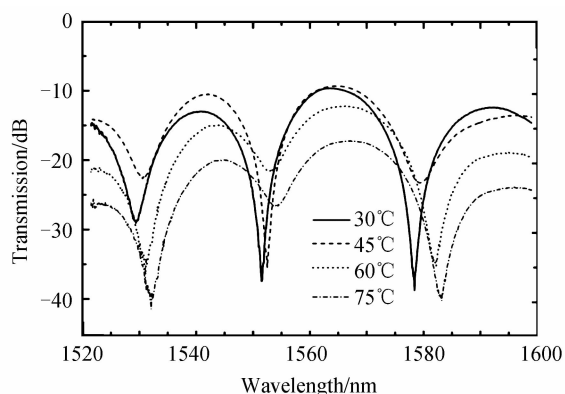


图8 不同水温下传感器的透射光谱

Fig. 8 Transmission spectra of the MZI in different temperatures

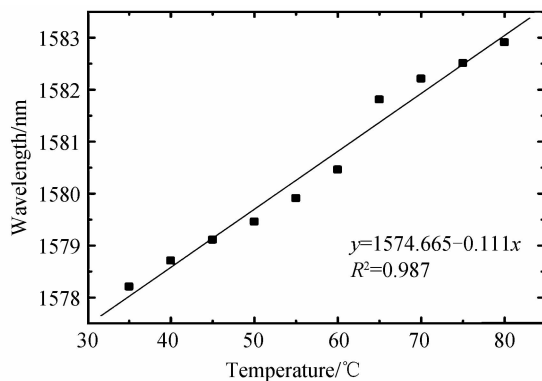


图9 传感器的温度灵敏度曲线

Fig. 9 Temperature sensitivity curve of the MZI

4 结论

本文提出并实现了一种利用商用熔接机制作光纤锥的方法,通过减少熔接时光纤重叠量和放电强度使得光纤熔点处直径减小形成光纤锥.制作好的光纤锥的直径为 $43.7\text{ }\mu\text{m}$,长 $480\text{ }\mu\text{m}$.在此方法的基础上制作了基于双光纤锥的马赫-曾德干涉仪,进一步的传感实验结果表明在 $1.335\sim 1.403\text{ RIU}$ 的折射率范围内,传感器的灵敏度为 $-128.233\text{ nm}/\text{RIU}$;在 $30\sim 75\text{ }^\circ\text{C}$ 的水溶液温度范围内,温度灵敏度为 $0.111\text{ nm}/^\circ\text{C}$.该干涉仪制作方法简单、成本较低、折射率灵敏度高,在生物传感中有一定的应用潜力.

参考文献

- [1] PANG Fu-fei, LIU Hao-ming, 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.
- [2] RONG Qiang-zhou, QIAO Xue-guang, WANG Ruo-hui, *et al.* High-sensitive fiber-optic refractometer based on a core-diameter-mismatch Mach-Zehnder Interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**(7): 2501-2505.
- [3] YU Xiang-zhi, LI Zheng-yong, WANG Zhi-hao, *et al.* Effect of temperature and vibration on optical fiber Mach-Zehnder interferometer and dynamic compensation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1041-1046.
余向志,李政勇,王志豪,等. 温度和振动对光纤马赫-曾德干涉仪的影响与动态补偿研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(9): 1041-1046.
- [4] GU Bo-bo, YIN Ming-jie, ZHANG A-ping, *et al.* Low-cost high-performance fiber-optic pH sensor based on thin-core fiber modal interferometer[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(25): 22296-22302.
- [5] TANG Chang-ping, DENG Ming, ZHU Tao, *et al.* Photonic crystal fiber based Mach-Zehnder interferometer for refractive index measurement [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2011, **22**(9): 1304-1308.
唐昌平,邓明,朱涛,等. 基于光子晶体光纤 M-Z 干涉仪的折射率传感器研究[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(9): 1304-1308.
- [6] TONG Zheng-rong, HAN Wei, CAO Ye. Fiber sensor for simultaneous measurement of temperature and refraction index based on multimode fiber core-offset[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(1): 0106004.
童峥嵘,韩伟,曹晔. 基于多模光纤偏芯熔接实现温度和折射率同时测量的光纤传感器[J]. *光学学报*, 2014, **34**(1): 0106004.
- [7] YANG Kai, XU Ben, LI Yi, *et al.* Highly sensitive temperature fiber sensor based on liquid-sealed Mach-Zehnder interferometer [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2014, **25**(7): 1259-1304.
杨凯,徐贲,李裔,等. 高灵敏度液封光纤马赫-曾德干涉仪温度传感器[J]. *光电子·激光*, 2014, **25**(7): 1259-1304.
- [8] RODRIGUEZ A J, BALDOVINO-PANTALEON O, DOMINGUEZ C R F, *et al.* Gasohol quality control for real time applications by means of a multimode interference fiber sensor[J]. *Sensors*, 2014, **14**(9): 17818-17828.
- [9] 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**(1): 204-207.
- [10] CHOI H Y, KIM M J, LEE B H. All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(9): 5711-5720.
- [11] XUE Lin-lin, YANG Li. Sensitivity enhancement of RI sensor based on SMS fiber structure with high refractive index overlay[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(10): 1463-1469.
- [12] WANG Peng-fei, BRAMBILA G, DING Ming, *et al.* Investigation of single-mode - multimode - single-mode and single-mode-tapered -multimode-single-mode fiber structures and their application for refractive index sensing[J]. *Journal of Optical Society American B*, 2011, **28**(5): 1180-1186.
- [13] LI Hui-dong, FU Hai-wei, SHAO Min, *et al.* In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on fiber core etched air-bubble and core diameter mismatch for liquid refractive index sensing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(21): 214-214.
李辉栋,傅海威,邵敏,等. 基于光纤气泡和纤芯失配的 Mach-Zehnder 干涉液体折射率传感器[J]. *物理学报*, 2013, **62**(21): 214-214.
- [14] ZHANG Yun-shan, QIAO Xue-guang, SHAO Min, *et al.* Humidity sensor based on waist-enlarged fiber tapers cascade structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0328004-0328004.
张芸山,乔学光,邵敏,等. 基于光纤锥级联结构的湿度传感器[J]. *光子学报*, 2015, **44**(3): 0328004-0328004.
- [15] WEI Tao, LAN Xin-wei, XIAO Hai, Fiber inline core-cladding-mode Mach-Zehnder interferometer fabricated by two-point CO₂ laser irradiations [J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2009, **21**(10): 669-671.
- [16] WU Di, ZHU Tao, DENG Ming, *et al.* Refractive index sensing based on Mach - Zehnder interferometer formed by three cascaded single-mode fiber tapers[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(10): 1548 -1553.
- [17] BIAXOLI C R, SILVA S, FRANCO M A R, *et al.* Multimode interference tapered fiber refractive index sensors [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(24): 5941-5945.
- [18] LIU Qi, WANG Qin. Refractive index sensor based on tapered PCF in-line interferometer [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, **10**(9): 090601.
- [19] 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): 3126-3133.
- [20] JEREMIE H, PING L, HUGO L, *et al.* Highly sensitive in-fiber interferometric refractometer with temperature and axial strain compensation[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(8): 9996-10009.
- [21] TIAN Zhao-bin, YAM S S H, BARNES J, *et al.* Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers [J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2008, **20**(8): 626-629.
- [22] LI Le-cheng, XIA Li, XIE Zhen-hai, *et al.* All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications[J]. *Optics Express*, 2011, **20**(10): 11109-11120.

Foundation item: The National Science Foundation of China under Grant (Nos. 61275088, 61327012), the Science Research Plan Projects of Shaanxi Education Department (No. 14JK1580), the Innovation Fund Project of Xi'an Shiyou University (No. YS28032509)