

doi: 10.3788/gzxb20164507.0706006

# 基于光纤气泡级联的高灵敏度马赫曾德干涉液体折射率传感器

李辉栋, 傅海威, 邵敏, 闫旭, 贾振安

(西安石油大学 理学院 光电油气测井与检测教育部重点实验室, 西安 710065)

**摘 要:**通过化学腐蚀方法制作了一种基于光纤气泡级联马赫曾德干涉液体折射率传感器. 在细芯光纤两端熔接切割端面被腐蚀的单模光纤, 构成气泡-细芯光纤-气泡结构, 该结构中两个气泡耦合光场, 细芯光纤作为传感臂, 构成光纤马赫曾德干涉仪. 对该传感器的干涉谱能量随折射率的变化规律进行了研究, 结果表明: 干涉谱的能量与环境折射率之间存在较好的线性关系, 同时波长变化对环境折射率变化不敏感; 当外界折射率变化范围在 1.345~1.389 时, 传感器的灵敏度为 -216.21dB/RIU. 该传感器在生物化学领域有较好的应用前景.

**关键词:**气泡; 马赫曾德干涉仪; 折射率; 腐蚀; 细芯光纤

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0706006-5

## In-fiber Mach-Zehnder Interferometer Based on Cascading Fiber Air Bubble for High Sensitivity Liquid Refractive Index Measurement

LI Hui-dong, FU Hai-wei, SHAO Min, YAN Xu, JIA Zhen-an

(Ministry of Education Key Laboratory on Photoelectric Oil-gas Logging and Detecting, School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** A kind of optical fiber refractive index sensor based on a fiber core etched air-bubble in-fiber Mach-Zehnder interferometer was proposed and demonstrated. A core etched standard single mode fiber was spliced to a thinner core single mode fiber to form an air bubble at the connecting point. By this method, a section of thinner core fiber was cascaded between two air bubbles to form a structure of (Air-Bubble)-Thin core fiber-(Air-Bubble) in-fiber Mach-Zehnder interferometer as a refractive index sensor. The air-bubble in the sensor serves as an optical coupler for modes conversion and the thin core fiber serves as sensing beams. The transmission spectrum of sensor was studied by experiment. The results show that, the dip power of the interference fringes changes with respect to surrounding refractive index with a good linearity, at the same time, the dip wavelength keeps low dependence on RI. The sensitivity of the sensor is -216.21dB/RIU in the range of 1.345~1.389. The sensor is a good potential candidate for bio-chemical measurements.

**Key words:** Air bubble; Mach-Zehnder interferometer; Refractive index; Corrosion; Thin core fiber

**OCIS Codes:** 060.2310; 060.2370; 280.4788; 220.2560; 220.4610

## 0 引言

用光纤传感测量液体折射率的方法有光纤迈克尔逊干涉法<sup>[1-2]</sup>、法布里珀罗干涉法<sup>[3-6]</sup>、光纤光栅<sup>[7-9]</sup>与光

纤马赫曾德干涉<sup>[10-15]</sup> (Mach-Zehnder interferometer, MZI)法等. 这几种方法中 MZI 检测法灵敏度高, 且 MZI 传感器制作简单、成本低廉. 其结构有纤芯失配<sup>[12]</sup>、熔融拉锥<sup>[13-14]</sup>、光纤错位<sup>[14]</sup>、光纤气泡<sup>[15]</sup>等. 其

**基金项目:**国家自然科学基金 (Nos. 61275088, 61505160), 陕西省教育厅科研计划项目 (Nos. 14JS073, 14JK1580) 和西安石油大学青年科技创新基金 (No. 2014QN005) 资助

**第一作者:**李辉栋 (1988-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: 123703316@qq.com

**收稿日期:** 2015-12-09; **录用日期:** 2016-02-26

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

中光纤气泡制作法有激光打点法<sup>[14]</sup>、化学腐蚀法<sup>[15-16]</sup>。激光打点法是用高频激光器在光纤的切割端面打出一个微孔,这种方法对光纤损害较小,但操作复杂,文献<sup>[15]</sup>使用高功率飞秒激光器打点,形成双光纤微腔级联结构,但在测量折射率在 1.333~1.3797 范围内的液体折射率时,波长最大漂移量为-0.453 8 nm,波长漂移量微小,且能量变化未超过 4dB。化学腐蚀法是一种方便快捷的方法,控制好腐蚀试剂的浓度与腐蚀时间,可得到理想的光纤端面微腔<sup>[16]</sup>。文献<sup>[5]</sup>将化学腐蚀法制作的气泡运用到法布里珀罗干涉仪中,在测量折射率时其灵敏度为 160 dB/RIU,得到了较好的测量效果。由于光纤气泡结构的应用使传感器的灵敏度得到明显提高,但光纤气泡结构在 MZI 传感中的应用鲜有报道。

本文使用化学腐蚀法,制作成光纤气泡级联结构的 MZI 液体折射率传感器。通过监测传感器光谱响应能量变化来反映环境液体折射率的变化。实验研究了干涉谱波谷值能量与环境液体折射率之间的关系。该传感器灵敏度高、结构紧凑,可应用于液体折射率的测量,是一种优良的能量型检测器件。

## 1 传感器的制作

实验中所用的光纤腐蚀溶剂为 40% HF 溶液,去除单模光纤涂覆层之后,用涂有酒精的擦镜纸将光纤擦拭干净,然后使用光纤切刀将光纤端面处理平整后,将光纤的切割端没进盛有氢氟酸的腐蚀槽中。由参考文献<sup>[16]</sup>可知,光纤切割端面经 40% HF 溶液腐蚀 7 min 后,会形成 6.125  $\mu\text{m}$  深的凹槽,光纤端面腐蚀装置与腐蚀前后如图 1。这是因为光纤纤芯主要由  $\text{SiO}_2$  成,同时掺杂有  $\text{GeO}_2$ ,但光纤包层成分为  $\text{SiO}_2$ 。由于光纤纤芯与包层的材料不同,导致腐蚀速率不同,由于掺杂纤芯的腐蚀速率比包层快,因此形成凹槽。切割端面腐蚀之后,使用超声清洗仪将凹槽中残留的氢氟酸清洗掉。将清洗之后的光纤与细芯光纤(Thin Core Fiber, TCF)对芯弱熔接,因为光纤腐蚀之后正常的放电强度会熔化凹槽形成熔接塌陷,影响气泡形成。实验

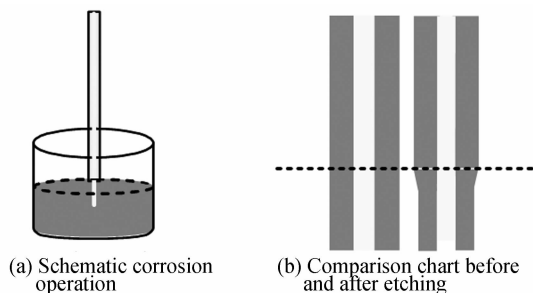


图 1 腐蚀操作与腐蚀前后对比

Fig. 1 Schematic corrosion operation and comparison chart before and after etching

所用熔接机为古河 s177,熔接机参量调整:首次放电开始强度为 50,结束强度为 60,预熔时间为 200 ms,首次放电时间为 200 ms。

用上述制作方法,在一段长为 20.0 mm 的 TCF 两端熔接经过腐蚀的单模光纤,形成 Air Bubble-TCF-Air Bubble 结构。其中单模光纤的纤芯芯径/外径为 9  $\mu\text{m}$ /125  $\mu\text{m}$ ,TCF 的芯径/外径为 5  $\mu\text{m}$ /120  $\mu\text{m}$ 。

## 2 理论分析

传感器结构如图 2,该传感器结构中,长度为 20.0 mm 的 TCF 作为传感臂,两个气泡起到耦合器的作用。导入光纤中传输的光经过第一个气泡时,一部分光会耦合进入 TCF 的纤芯传输,另一部分光会耦合进入 TCF 的包层传输,在 TCF 中传输的纤芯模和包层模在第二个气泡处耦合成为单模光纤纤芯模输出,从而形成光纤 MZI。在该传感器结构中第一个气泡增大了光的发散角,使更多的光能够进入到 TCF 包层中,增加了包层模的能量,提高了干涉条纹对比度,同时对外界环境折射率变化的响应更为灵敏。

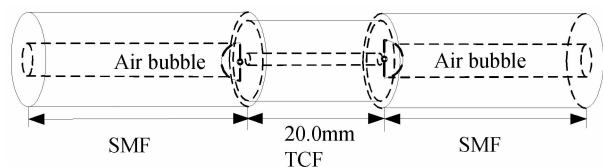


图 2 传感器结构示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the sensor

传感器的传输光强表示为

$$I = I_{\text{core}} + \sum_m I_{\text{cladding}}^m + \sum_m 2 \sqrt{I_{\text{core}} I_{\text{cladding}}^m} \cdot \cos \left[ \frac{2\pi(n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m})}{\lambda} (\text{RI})L \right] \quad (1)$$

式中, $I, I_{\text{core}}, I_{\text{cladding}}^m$  为干涉光强,光在纤芯模与第  $m$  阶包层模传输。 $L, n_{\text{eff}}^{\text{core}}$  与  $n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}$  分别为 TCF 的长度,纤芯模与包层模的有效折射率。 $\lambda$  表示空气中自由空间光波长。对式(1)的折射率求导,即关于折射率灵敏度的计算式为<sup>[17-19]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{dI}{d\text{RI}} &= \frac{d \sum_m I_{\text{cladding}}^m (\text{RI})}{d\text{RI}} + \sum_m [I_{\text{core}} I_{\text{cladding}}^m (\text{RI})]^{-1/2} \cdot \\ &\frac{I_{\text{core}} dI_{\text{cladding}}^m (\text{RI})}{d\text{RI}} \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} [n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m} (\text{RI})]L \right\} + \\ &\sum_m \sqrt{I_{\text{core}} I_{\text{cladding}}^m (\text{RI})} \sin \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} [n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m} (\text{RI})]L \right\} \cdot \\ &\frac{4\pi L}{\lambda} \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cladding},m} (\text{RI})}{d\text{RI}} \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可知,环境折射率发生变化会引起 TCF 包层模有效折射率  $n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}$  的变化,从而引起相位差发生变化,表示为

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

式中,  $\lambda$  为中心波长,  $\Delta n_{\text{eff}}$  是纤芯模有效折射率  $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$  与包层模有效折射率  $n_{\text{eff}}^{\text{cladding},m}$  之差. 在中心波长处的泰勒展开式, 并且忽略其高阶项, 有

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

然而, 式(4)依然是无效的, 因为它忽略了模间色散问题, 因而式(4)应修改为

$$\Delta\varphi \approx \Delta\varphi_0 - \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta m_{\text{eff}} (\lambda - \lambda_0) \quad (5)$$

式中  $\Delta m_{\text{eff}} = \Delta n_{\text{eff}} - \lambda_0 \frac{\partial}{\partial \lambda} \Delta n_{\text{eff}}$ , 可以看出相位差与波长漂移量和模式群折射率差呈线性关系.

溶液折射率的变化会引起纤芯模与包层模有效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}$  变化, 导致第  $m$  阶峰值波长变化  $\delta\lambda_m$ . 干涉条纹中的峰值波长变化量表示为<sup>[20-21]</sup>

$$\delta\lambda_m = \delta \left( \frac{\Delta n_{\text{eff}} L}{m} \right) = \left( \frac{\delta \Delta n_{\text{eff}}}{\Delta n_{\text{eff}}} \right) \lambda_m \quad (6)$$

由式(6)可知, 峰值波长变化量  $\delta\lambda_m$  与有效折射率差变化量  $\delta\Delta n_{\text{eff}}$  成正比. 由 OptiFiber 软件计算可知, 折射率变化范围为 1.345~1.389RIU 时, 基模与 2 阶到 5 阶包层模有效折射率差变化量在  $10^{-7} \sim 10^{-6}$  量级, 故纤芯模与包层模有效折射率差的变化量  $\delta\Delta n_{\text{eff}}$  很小, 由式(6)可知波长漂移量也很小, 在  $10^{-2} \sim 10^{-1}$  nm 量级.

将所制传感器在不同折射率溶液下的响应光谱进行傅里叶变换, 如图 3, 图中给出了传感器在空气、折射率为 1.345 与折射率为 1.389 溶液下的傅里叶变换谱. 从图中可以看出, 空气与折射率溶液中的光谱傅里叶变换峰值一样, 均为  $3.36 \times 10^{-3}$ , 说明传感器的干涉模式并未随外界环境折射率的变化而变化, 干涉模式稳定. 从图中还可以看出, 傅里叶频谱中存在几个较低的峰, 且峰值明显低于主峰峰值, 较低峰峰值对应的空间频率高于主要峰值的空间频率, 所以在干涉中起主要作用的包层模为低阶模, 可认为该干涉是由纤芯模与某低阶包层模形成.

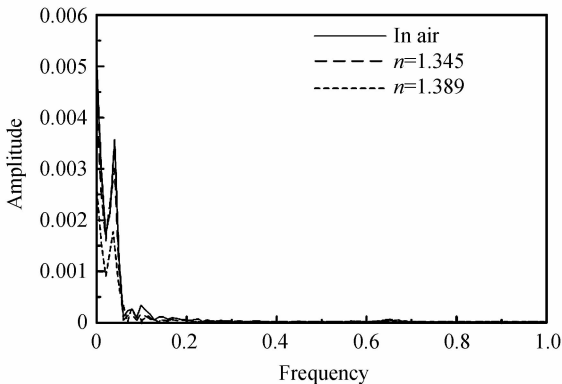


图3 传感器的傅里叶变换谱

Fig. 3 Spatial frequency of the sensor

### 3 实验及结果分析

利用 ASE C+L 光源, 光经导入光纤, 入射到该传感器中, 实验所用光谱仪为安立 MS740A, 传感系统如图 4. 整个实验过程在 25.6℃ 室温环境下进行, 将传感器抽直固定在载玻片上, 每次测量时将不同折射率的液体滴在传感器上, 然后监测传感器光谱响应, 测量后, 用无水乙醇清洗传感器, 晾干之后, 直到响应光谱与传感器置于空气中的初始光谱一致时, 再进行下一组折射率实验. 实验中配置不同浓度的蔗糖溶液作为折射率样品, 经阿贝折射率检测仪测试之后其折射率分别为 1.345、1.359、1.365、1.372、1.381、1.389. 图 5 为传感器在空气中的光谱响应, 从图中可以发现干涉图样清晰, 最大条纹对比度大于 15dB, 满足实际测量的需求.

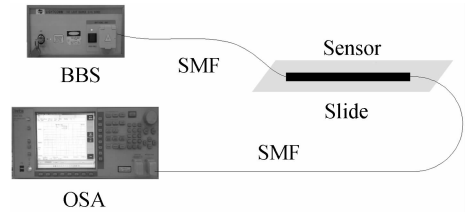


图4 传感系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental

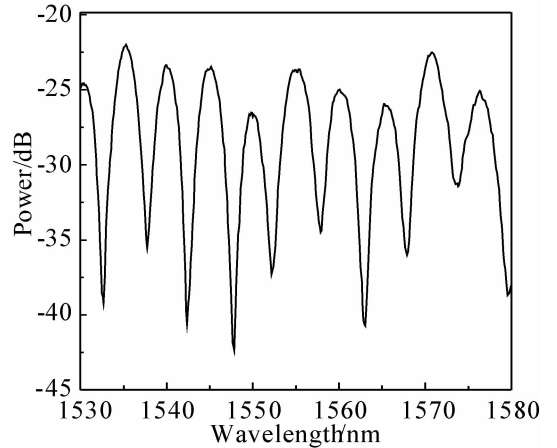


图5 传感器在空气中的光谱响应

Fig. 5 Transmission spectrum of the sensor in air

图 6 是在不同折射率环境下 MZI 的光谱响应. 图 6 表明随着折射率的增加, 光谱能量不断下降, 这是由于环境折射率的不断增大, 导致更多的包层模能量耦合至外界倏逝场, 总能量不断减少. 图 7 是中心波长漂移量随外界环境折射率变化的规律, 图中黑点为实验数据, 实线为线性拟合直线. 当溶液折射率在 1.345~1.389 范围内变化, 1537.5 处中心波长能量变化了 9.77 dB, 中心波长能量漂移量与折射率的变化呈良好的线性关系, 灵敏度为  $-216.21$  dB/RIU, 线性耦合度为 0.983. 光谱仪的分辨率为 0.01 dB, 传感器的折射率分辨率为  $4.63 \times 10^{-5}$  RIU. 在外界折射率变化

的同时光谱波长向长波方向漂移,但最大漂移量仅为 0.012 nm,这与理论分析一致.干涉谱峰值能量的变化量远比峰值波长变化量明显,且灵敏度更高,便于测量.与文献[15]相比,本文在波长漂移量微小的同时,能量变化明显,实现了对液体折射率的监测.

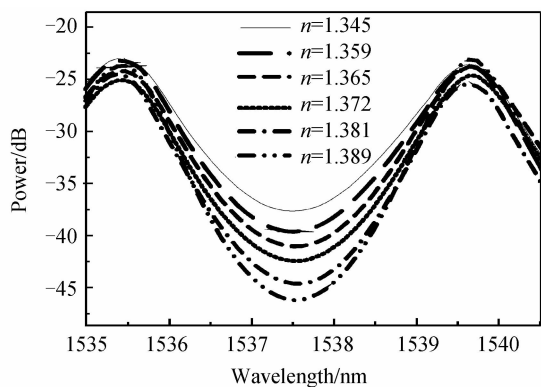


图6 传感器在不同折射率溶液中的光谱响应

Fig. 6 Interference spectra response to ambient RI change

环境温度的变化对传感器测量的影响见图8.温箱温度由室温加热至 95℃,实验依然选择中心波长 1537.5 nm 处的波谷作为监测点.记录传感器在不同环境温度下的能量变化,实验结果表明环境温度升高

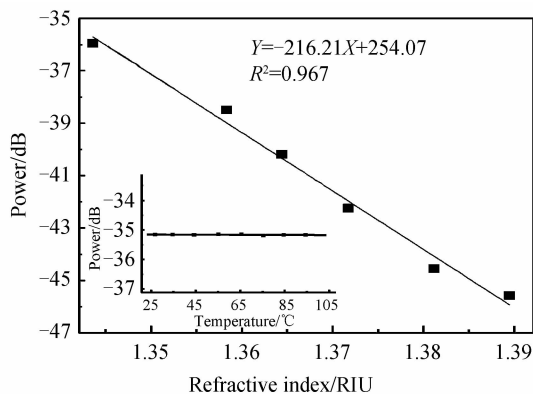


图7 能量与环境折射率、温度变化的关系

Fig. 7 Power response of interference dips to RI & temperature

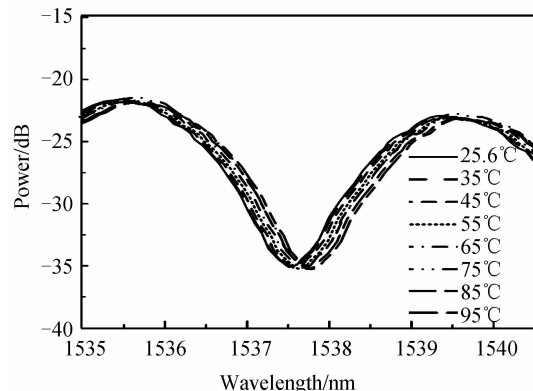


图8 传感器在不同温度下的光谱响应

Fig. 8 Interference spectra response to ambient temperature change

时,波长向长波方向漂移,但能量变化量微小,仅为 0.23 dB,如图7所示插图部分.

## 4 结论

本文设计了一种基于光纤气泡的 MZI 液体折射率传感器,通过腐蚀单模光纤端面,接入 TCF,形成气泡,构成 Air Bubble-TCF-Air Bubble 型光纤 MZI 折射率传感器.对该传感器的干涉谱能量随折射率的变化规律进行了实验研究,当外界折射率变化范围在 1.345~1.389 时,传感器的灵敏度为 -216.21 dB/RIU,当光谱仪的分辨率为 0.01 dB 时,传感器的折射率分辨率为  $4.63 \times 10^{-5}$  RIU.该折射率计体积小、结构简单、灵敏度高;使用光纤为普通的商用光纤,易于制作.该传感器在生物化学传感方面有较好应用.

### 参考文献

- [1] MENG H, SHEN W, ZHANG G, *et al.* Michelson interferometer-based fiber-optic sensing of liquid refractive index[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, **160**(1): 720-723.
- [2] TIAN Z, YAM S S H, LOOCK H P. Single-mode fiber refractive index sensor based on core-offset attenuators[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(16): 1387-1389.
- [3] GAO R, JIANG Y, DING W, *et al.* Filmed extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors for the measurement of arbitrary refractive index of liquid [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, **177**: 924-928.
- [4] NGUYEN L V, VASILIEV M, ALAMEH K. Three-wave fiber Fabry-Pérot interferometer for simultaneous measurement of temperature and water salinity of seawater [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(7): 450-452.
- [5] GONG Y, ZHAO T, RAO Y J, *et al.* A ray-transfer-matrix model for hybrid fiber Fabry-Perot sensor based on graded-index multimode fiber [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(15): 15844-15852.
- [6] XIA T, ZHANG A, GU B, *et al.* Fiber-optic refractive-index sensors based on transmissive and reflective thin-core fiber modal interferometers [J]. *Optics Communications*, 2010, **283**: 2136-9.
- [7] LUO B, ZHAO M, ZHOU X, *et al.* Refractive-index gradient sensor based on the structured fiber Bragg grating [C]. Asia Pacific Optical Sensors Conference. International Society for Optics and Photonics, 2012: 835118.
- [8] YAO Q, MENG H, WANG W, *et al.* Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a core-offset Mach-Zehnder interferometer combined with a fiber Bragg grating [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, **209**: 73-77.
- [9] LUO H, SUN Q, XU Z, *et al.* Simultaneous measurement of refractive index and temperature using multimode microfiber-based dual Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(13): 4049-4052.
- [10] MA Y, QIAO X, GUO T, *et al.* Reflective fiber-optic refractometer based on a thin-core fiber tailored Bragg grating reflection [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(3): 323-325.
- [11] SUN Miao, XU Ben, LI Yi. A Strain sensor based on in-line Mach-Zehnder interferometer with thin-core fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**: 416-419.

- [12] XIA T H, ZHANG A P, GU B, *et al.* Fiber-optic refractive-index sensors based on transmissive and reflective thin-core fiber modal interferometers[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(10): 2136-2139.
- [13] SHAO M, QIAO X, FU H, *et al.* A Mach-Zehnder interferometric humidity sensor based on waist-enlarged tapers[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, **52**: 86-90.
- [14] YIN Guo-lu, SHU Qin-lou, ZOU Hui. Refractive index sensor with asymmetrical fiber Mach-Zehnder interferometer based on concatenating single-mode abrupt taper and core-offset section[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, **45**: 294-300.
- [15] JIANG L, YANG J, WANG S, *et al.* Fiber Mach-Zehnder interferometer based on microcavities for high-temperature sensing with high sensitivity[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(19): 3753-3755.
- [16] 郭宇. 2010, 基于化学腐蚀方法制作的特种光纤珙珀传感器 [M].
- [17] ZHANG Yun-shan, QIAO Xue-guang, SHAO Min, *et al.* Humidity sensor based on waist enlarged fiber tapers cascade wstructure[J]. *Acta Photonica Sinica*, **44**(3): 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*, **44**(3): 0328004.
- [18] FU Hai-wei, LI Hui-dong, SHAO Min, *et al.* TCF-MMF-TCF fiber structure based interferometer for refractive index sensing[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, **69**: 58-61.
- [19] ZHAO Na, FU Hai-wei, SHAO Min, *et al.* Research on high sensitivity temperature sensor based on Mach-Zehnder interferometer nith 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.
- [20] GUO Shi-liang, HU Chun-hai, LI Xin, *et al.* A novel high sensitivity optical microresonator humidity sensor [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(8): 1009-1013.
- 郭士亮, 胡春海, 李欣, 等. 一种新型高灵敏光学微环湿度传感器[J]. *发光学报*, 2014, **35**(8): 1009-1013.
- [21] SHAO M, QIAO X, FH H, *et al.* Refractive index sensing of sms fiber structure based mach-zehnder interferometer[J]. *Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(5): 437-439.