

基于大偏置量熔接的反射式光纤型干涉仪的 折射率传感特性

苏达顺, 马宽明, 孙立朋, 武创, 李杰*, 关柏鸥

暨南大学光子技术研究院广东省光纤传感与通信技术重点实验室, 广东 广州 510632

摘要 提出并实现了一种基于大偏置量熔接的单端反射式光纤 Mach-Zehnder(M-Z)干涉仪。在一段数百微米长的单模光纤两端以大偏置量对称地错位熔接两段光纤,将其中一段光纤的端面镀制薄金膜作为反射镜面,使在外界环境和光纤包层材料内传输的光产生相位差,并在器件反射端能够观测到较强的干涉光谱。实验发现,该干涉光谱随外界折射率(RI)变化可发生较高灵敏度的漂移,当偏置量为 $62.5\ \mu\text{m}$ 和空腔长度为 $554\ \mu\text{m}$ 时,测得其水环境的折射率灵敏度和空气中的温度灵敏度分别为 $-13257\ \text{nm}/\text{RIU}$ (RIU 为单位折射率)和 $37.33\ \text{pm}/^\circ\text{C}$ 。与已报道的同类型器件相比,所提传感器具有折射率灵敏度高、结构紧凑、可单端测量以及稳定性好等优点,在生物化学传感和环境污染监控等领域中具有良好的应用前景。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 光纤干涉仪; 反射式结构; 偏置熔接

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.080603

Refractive Index Sensing Characteristics of Reflective Fiber Interferometer Based on Large Offset Splicing

Su Dashun, Ma Kuanming, Sun Lipeng, Wu Chuang, Li Jie*, Guan Bai'ou

Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract We have demonstrated a kind of single-end reflective optical fiber Mach-Zehnder (M-Z) interferometer based on large lateral-offset splicing joints. Several hundred microns of standard single-mode fiber (SMF) was spliced between two other SMFs with the same lateral offset. One fiber has its end-face coated by gold film, acting as a reflector. The beams propagating in the environmental medium and the fiber cladding material interfere and produce a phase difference. The reflected interference spectra were measured at the same side of the broadband source by an optical spectrum analyzer. The pattern of interference spectrum shifts with the change of the external refractive index (RI). The sensor with a cavity length of $554\ \mu\text{m}$ and a lateral offset of $62.5\ \mu\text{m}$ is demonstrated. The achieved RI sensitivity in water and the temperature coefficient in air are $-13257\ \text{nm}/\text{RIU}$ and $37.33\ \text{pm}/^\circ\text{C}$, respectively. Compared with the reported counterparts, the sensor has the advantages of high refractive index sensitivity, compact structure, single-ended measurement and good stability, and has good application prospects in the fields of biochemical sensing and environmental pollution monitoring.

Key words fiber optics; fiber optic sensors; fiber interferometer; reflection structure; offset splicing

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 280.4788

1 引言

光纤折射率传感器因其体积小、耐腐蚀、精度高等优点而被广泛应用于医学、生化、环境等领域。目

前,科研人员已致力于开发基于不同原理的光纤折射率传感器,其中包括:带有倏逝场的布拉格光栅^[1-2]、长周期光纤光栅^[3-4]、倾斜光栅^[5-6]、微纳光纤^[7-8]器件等。然而这些传感器通常仅采用光的倏

收稿日期: 2018-02-02; 修回日期: 2018-03-15; 录用日期: 2018-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(61575083)、广东省自然科学基金杰出青年基金(2014A030306040)

* E-mail: tjiali@jnu.edu.cn

势场效应进行传感,具有较低的传感灵敏度。为了提高器件灵敏度,常需要减小光纤尺寸,这样会影响光纤整体结构的稳定性。相比较而言,基于错位熔接的光纤 Mach-Zehnder(M-Z)干涉仪具有结构紧凑、制作成本低和稳定性较好等特点而受到许多青睐。过去所报道的错位熔接的 M-Z 干涉仪所采用的光纤类型包括单模光纤^[9-10]、多模光纤^[11]、光子晶体光纤^[12]、微纳光纤^[13-14]等。一般情况下这种结构采取以较小偏置量熔接光纤的方式,干涉光谱主要由包层和纤芯模式的相位差提供,此时外界环境仍通过与光纤中传输的光的倏逝场作用来影响干涉光谱,使其发生漂移,这种传感器的灵敏度一般相对较低^[15]。为此,科研人员又提出了开腔式干涉仪结构,即通过大错位熔接,使一部分光场在光纤外的空腔中传输,直接与外界物质相互作用,不仅缩短了器件尺寸,还大幅提高了器件折射率灵敏度^[16-17],在生化折射率等传感领域具有较大的应用潜力。然而,目前这种基于大错位熔接光纤的干涉仪仍仅限于采用透射式的结构,即采用“导入光纤-干涉仪-导出光纤”的结构,在工作时需要将样品置于光源输入端和光谱检测端中间,在应用方面受到较大的局限,尤其不适用于狭小封闭空间的传感测量。

为了解决上述问题,可以将传统“透射式”结构转化为“反射式”结构,即在传感器的导入光纤单侧同时完成信号的输入和检测,使其便于插入待测生物样品之中,实现微量生物样品和狭小空间的检测。单端反射式的探针结构在生物体检测中具有较大的应用前景,不仅可以降低对检测目标造成额外的损伤,还可以结合机械穿刺,使封装好的功能探针直接到达探测区域,实现即时检测。此外,采用反射式的光纤干涉仪能够提高器件紧凑性和降低系统维护难度^[18]。然而,基于大偏置量熔接光纤的反射式传感器的研究,目前国内外尚未报道。

针对上述问题,本文提出了一种基于大偏置量熔接光纤的反射式 M-Z 干涉仪。一方面,外界折射率变化直接改变其中一路参与干涉光的相位,从而大幅提升传感灵敏度,在水环境(折射率 1.333 附近)所测得的折射率灵敏度可达 -13257 nm/RIU (RIU 为单位折射率)。另一方面,通过在光纤端面镀制高反膜,将传统的透射式器件结构改造成反射式结构,使制作的干涉仪结构更加紧凑,实现更少生化量样品的检测,极大地扩大了器件的适用范围,使其适用于远距离以及狭小、封闭空间的生化量的现场原位测量,具有良好的应用前景。

2 基本原理与制作方案

图 1 展示了设计的光纤干涉仪原理图,传感探针部分主要采用三明治结构,即将三段普通单模光纤(Corning, SMF-28)通过大偏置距离错位熔接起来,错位距离约为光纤半径长度($62.5 \mu\text{m}$),再将反射端的光纤端面平整切断并镀上一层金膜形成反射镜面。图 2 为折射率传感装置示意图,实验过程中,由宽带光源(Broadband source, BBS)产生的入射光经过光环行器(circulator)传输至 lead in/out fiber 中。到达第一个错位熔接点(COJ1)时,因为界面折射率的突变,入射光被分成两个通路进入干涉区域,其中一路通过光纤的包层传输,另外一路通过空腔内的介质传输。由于中间空腔的距离极短,腔内传输的光在到达第二个错位熔接点(COJ2)时大部分能量得以保留。两路光在第二个错位熔接点合并成一路耦合入反射端的纤芯。经过端面的金膜反射后,反射光沿着相反的方向再次通过传感区域经光环行器进入光谱分析仪(OSA)。两束光通过干涉区域时,由于光纤包层与外界介质之间的折射率不同,各自通路传输的光之间存在一定的相位差。传输光正向、反向两次经过传感区域后相位差叠加,最终以干涉光的形式耦合进入光谱仪,因此在光谱仪中可以观察到明显的干涉图样。干涉图样的形状主要由干涉长度、光纤包层与外界介质的折射率差决定。根据光的叠加原理,可得干涉光谱的强度 I :

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

式中: I_1 和 I_2 分别为在外界介质和光纤包层传输光的强度; φ 为干涉相位差。由图 1 可知, φ 包括正向传输和反向传输的相位差 φ_1 和 φ_2 两部分之和,这里 $\varphi_1 = \varphi_2$, 因此:

$$\varphi = (2\pi/\lambda) \cdot \Delta n \cdot 2L, \quad (2)$$

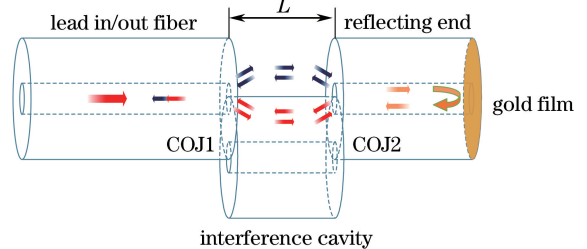


图 1 基于金属镀膜和大偏置熔接光纤的单端反射式光纤干涉仪原理图

Fig. 1 Schematic of the reflective fiber interferometer based on large lateral-offset splicing fibers and the gold-film reflector

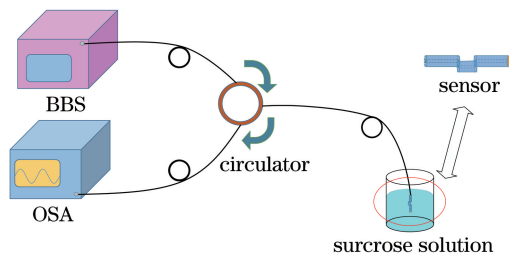


图2 折射率传感装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental setup for refractive index sensing

式中: $\Delta n = |n_{\text{clad}} - n_{\text{cav}}|$ 为有效折射率差, n_{clad} 为光纤包层折射率, n_{cav} 为外界介质折射率; L 为干涉光纤的长度; λ 为谐振波长。当(2)式满足相位匹配条件时, 相干光谱的强度会达到极小值, 因此可以在光谱仪中观察到对应波长处呈现一个波谷, 第 m 阶干涉波谷的中心波长 λ_m 满足:

$$\lambda_m = 2L \cdot \Delta n / (2m + 1). \quad (3)$$

在折射率测量实验中, 可以认为光纤包层的折射率与干涉长度都保持不变, 而当外部环境的折射率改变时, Δn 随之改变, λ_m 也会相应地发生漂移。因此, 传感器的波长漂移主要由基体材料的折射率变化引起, 在其他因素(例如温度等)不变的情况下, 通过测量光谱波长的漂移量可推知折射率变化的大小。

由(3)式得到光谱中相邻两个波谷之间的波长间隔(FSR)为

$$R_{\text{FS}} = \lambda^2 / (2 \cdot \Delta n_{\text{ref}} L), \quad (4)$$

式中: Δn_{ref} 为两种介质的相对折射率差。

图3为传感探头在显微镜下的实物图, 图中所示传感器的腔长为 $544.71 \mu\text{m}$, 偏置距离约为 $62.5 \mu\text{m}$, 反射光纤长度为 $549.54 \mu\text{m}$ 。在传感器制作过程中, 使用商用熔接机(藤仓, FSM-45PM), 采用手动模式将两段单模光纤进行错位熔接, 调节熔接机的 X 轴马达使左右光纤在横向方向形成错位, 两个对称的错位熔接点的偏置距离均为 $62.5 \mu\text{m}$ 。实验发现, 在设置熔接机的放电时间为 1000 ms 和放电强度为 10 bit (bit 为熔接机标注的放电量, 为相对量) 的情况下, 熔接效果最佳。熔接完成后, 使用切割刀对右端光纤进行切割, 得到完整的错位结构。将错位结构放入离子溅射仪(中科科仪, SBC-12)中将光纤端面镀上一层金膜, 设置镀膜时间为 60 s , 金膜厚度约为 20 nm 。为防止金颗粒附着在空腔内而影响实验效果, 镀膜过程需要将空腔区域封装到毛细管内。

将传感器分别置于空气与去离子水中进行测试, 发现反射光谱呈现典型的干涉现象。如图4所

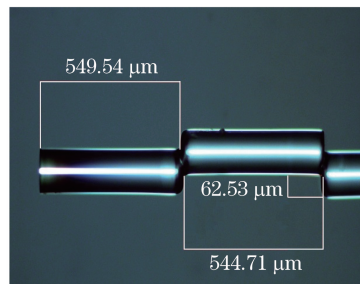


图3 传感探头的显微镜实物图

Fig. 3 Microscope photograph of the sensing probe

示, 在空气环境中传感器的反射光谱平均消光比约为 5 dB ; 而将传感器浸泡于去离子水中, 反射光谱的消光比明显提高, 最高接近 12 dB , 足以满足光纤传感系统的需要。光谱消光比主要由包层光路与介质光路的光强比决定^[19], 本器件在水中的插入损耗低于空气中的插入损耗, 导致包层光路与介质光路的光强更为接近。在空气中测得的干涉光谱的 FSR 约为 10 nm , 而在去离子水中干涉光谱的 FSR 明显增大, 可达 24 nm 。这是因为, 光谱的 FSR 主要由干涉光纤的长度 L 和有效折射率差 Δn 决定, 如(4)式所示, 在长度 L 保持不变的情况下, 传感器在去离子水中的 Δn 更小, 从而 FSR 更大。

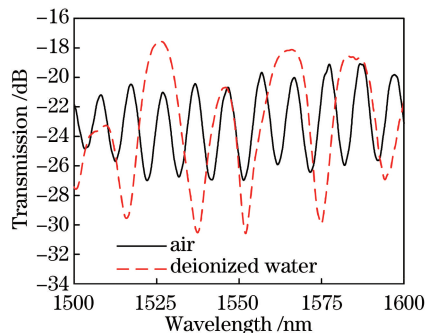


图4 传感器在空气和去离子水中的干涉光谱

Fig. 4 Interference spectrum of sensor surrounded with air and deionized water

3 实验结果与分析

为了进一步得到传感器的折射率响应特性, 实验中将传感探针完全浸泡在不同浓度的蔗糖溶液中进行定量测试。实验中使用去离子水和蔗糖颗粒混合得到蔗糖溶液, 在室温 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 下, 测得蔗糖溶液的折射率随着蔗糖浓度的升高而增加, 呈现良好的线性关系。通过对折射率为 $1.333 \sim 1.343$ 范围内的数据进行拟合, 得到蔗糖溶液折射率 n 与质量分数 c 的变化关系为 $n = 1.33165 + 0.00158c$, 测试结果与文献基本一致^[20]。实验表明, 随着外界环境折射率

逐渐升高,干涉光谱发生明显的蓝移现象,如图 5(a)所示。以折射率为 1.333、位于波长 1636 nm 处的干涉波谷为例,当外界折射率从 1.333 增加至 1.338 时,波谷从 1636 nm 漂移到 1572 nm。这是因为随着外界折射率增加,有效折射率差 Δn 减小,由(3)式可知,干涉波长发生蓝移,实验与理论的结果一致。

如图 5(b)所示,列出了实验中测得的波谷波长随折射率的变化关系,折射率变化范围为 1.333 至 1.343,而光谱漂移范围为 1636 nm 至 1555 nm。分别给出了三次重复实验所获得的测量结果,对比发现该系统具有较好的可重复性和稳定性。如图所示,干涉波长随温度增加而红移,二者呈现良好的线性关系。

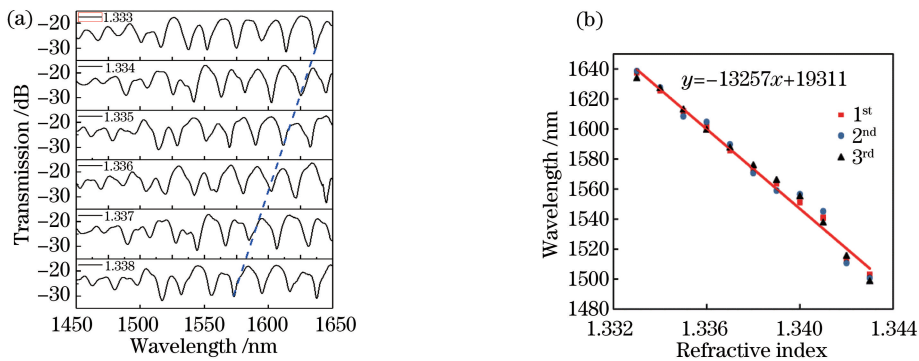


图 5 (a)外界折射率变化范围为 1.333~1.338 时传感器的干涉光谱;(b)干涉波长随外界折射率的变化关系

Fig. 5 (a) Interference spectra of the sensor with external refractive index changing from 1.333 to 1.338;

(b) relationship between interference wavelength and refractive index

为了获得传感器的温度响应特性,将传感器置于温控盒中,从 25 °C 至 91.7 °C 逐渐改变温控盒的温度,在每个温度点稳定 10 min 后再记录与之对应的光谱数据。图 6(a)为传感器干涉光谱在不同温度下的温度漂移特性,观察波长为 1583 nm 附近的谐振峰的变化情况可知,温度改变使干涉波谷从 1581.15 nm 逐渐漂移至 1584.35 nm。图 6(b)为干

涉波长随温度的变化关系,分别给出了三次重复实验的测量结果,发现该测量结果具有良好的可重复性或再现性。波长随温度增加而红移,二者呈现良好的线性关系,通过线性拟合获得传感器的温度灵敏度约为 37.33 pm/°C。因此,该传感器对温度具有一定的灵敏特性。

在折射率测量中,温度变化可能会对系统带来

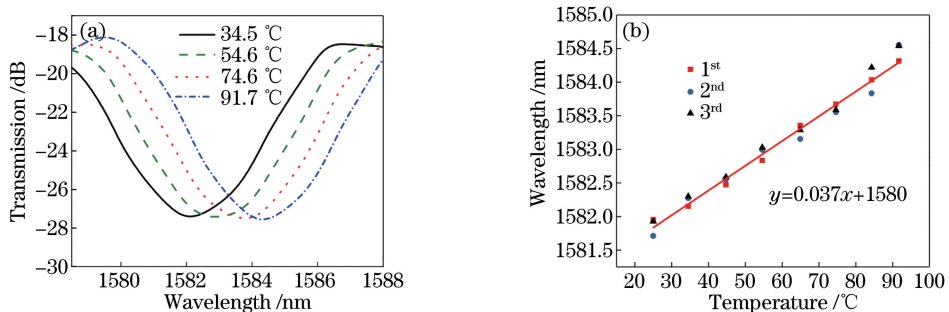


图 6 (a)传感器在不同温度下的干涉光谱;(b)干涉波长随温度的变化关系

Fig. 6 (a) Interference spectra of the sensor at different temperatures; (b) relationship between the interference

wavelength and temperature

一定交叉影响。根据图 5(b)和图 6(b)测量的结果,相当于温度每升高 1 °C,产生的等效折射率变化为折射率降低 2.79×10^{-6} 。在实际应用中,为了尽量减小甚至消除温度带来的交叉影响,应使折射率测量中的温度保持稳定。例如在图 5(b)所示的实验中,将周围温度保持在室温 25 °C 下进行。另外,在折射率和环境温度同时发生变化的场所,应综合考虑温度的交叉影响作用,从光谱漂移中减掉温度影响的部分,从而获得折射率引起的效应。

4 结 论

提出了一种基于大偏置量熔接的反射式光纤干涉仪,并研究其传感特性。该干涉仪是在两段单模光纤之间以偏置量为 62.5 μm 熔接一段单模光纤,并在其光纤末端镀上反射膜。这种结构不仅能大幅提升折射率灵敏度,而且使干涉仪结构更为紧凑,可作为一种探针式传感器,实现更少生化量样品的检测与复杂环境的现场原位测量。实验所测得的折射率灵敏度可达 $-13257 \text{ nm}/\text{RIU}$,相比文献的结果几乎提高了一个数量级。所提传感器因其制作简单、结构紧凑、灵敏度高以及应用范围广等优点,在生化检测领域具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Liang W, Huang Y Y, Xu Y, *et al.* Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(15): 151122.
- [2] Li J, Wang H, Sun L P, *et al.* Etching Bragg gratings in Panda fibers for the temperature-independent refractive index sensing [J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 31917-31923.
- [3] Chong J H, Shum P, Haryono H, *et al.* Measurements of refractive index sensitivity using long-period grating refractometer [J]. *Optics Communications*, 2004, 229(1): 65-69.
- [4] Fan P C, Sun L P, Yu Z P, *et al.* Higher-order diffraction of long-period microfiber gratings realized by arc discharge method[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25380-25388.
- [5] Cai Z Y, Liu F, Guo T, *et al.* Evanescently coupled optical fiber refractometer based a tilted fiber Bragg grating and a D-shaped fiber [J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 20971-20976.
- [6] Huang M, Gu C S, Sun B, *et al.* Refractive index sensor based on tilted-fiber Bragg grating coated with graphene [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44

(12): 1210001.

黄梦, 顾昌晟, 孙兵, 等. 基于石墨烯涂覆倾斜光纤光栅的折射率传感[J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1210001.

- [7] Ji W B, Liu H H, Tjin S C, *et al.* Ultrahigh sensitivity refractive index sensor based on optical microfiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(20): 1872-1874.
- [8] Wo J H, Wang G H, Cui Y, *et al.* Refractive index sensor using microfiber-based Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(1): 67-69.
- [9] Tian Z B, Yam S H, Looock H P. Single-mode fiber refractive index sensor based on core-offset attenuators[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(16): 1387-1389.
- [10] Wang Q, Zou H, Wei W. Strain and refractive index sensor based on core offset splicing fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1006005.
王旗, 邹辉, 韦玮. 基于偏芯熔接光纤的应力与折射率传感器[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1006005.
- [11] Shao M, Qiao X G, Fu H W, *et al.* Refractive index sensing of SMS fiber structure based Mach-Zehnder interferometer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(5): 437-439.
- [12] Cao Y, Liu W, Zhao S, *et al.* A fiber sensor based on the core-offset structure of PCF to SMF [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(7): 1233-1237.
曹晔, 刘文, 赵舜, 等. 基于光子晶体光纤和单模光纤错芯结构的光纤传感器[J]. *光电子 • 激光*, 2015, 26(7): 1233-1237.
- [13] Zhao Y, Li X G, Cai L. A highly sensitive Mach-Zehnder interferometric refractive index sensor based on core-offset single mode fiber [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 223: 119-124.
- [14] Gao S C, Zhang W G, Zhang H, *et al.* Reconfigurable and ultra-sensitive in-line Mach-Zehnder interferometer based on the fusion of microfiber and microfluid [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(8): 084103.
- [15] Wang Y, Yang M W, Wang D N, *et al.* Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser micromachining for refractive index measurement with high sensitivity[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(3): 370-374.
- [16] Duan D W, Rao Y J, Xu L C, *et al.* In-fiber Mach-

- Zehnder interferometer formed by large lateral offset fusion splicing for gases refractive index measurement with high sensitivity[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 160(1): 1198-1202.
- [17] Baharin N F, Azmi A I, Abdullah A S, *et al.* Refractive index sensor based on lateral-offset of coreless silica interferometer[J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, 99: 396-401.
- [18] Yang S, Rong Q Z, Sun H, *et al.* High temperature probe sensor with high sensitivity based on Michelson interferometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(8): 084218.
杨坤, 荣强周, 孙浩, 等. 基于 Michelson 干涉仪的高灵敏度光纤高温探针传感器[J]. *物理学报*, 2013, 62(8): 084218.
- [19] Dong B, Hao E J. Temperature-insensitive and intensity-modulated embedded photonic-crystal-fiber modal-interferometer-based microdisplacement sensor [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(10): 2332-2336.
- [20] Bai Z S, Liu Z Q, Xu H. An experienced formula about the connection of refraction index and consistence of several liquid [J]. *Journal of Yanan University (Natural Science Edition)*, 2004, 23(1): 33-34.
白泽生, 刘竹琴, 徐红. 几种液体的折射率与其浓度关系的经验公式[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2004, 23(1): 33-34.
- [21] Yao Q Q, Meng H Y, 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(1): 73-77.
- [22] Fan J L, Zhang J S, Lu P, *et al.* A single-mode fiber sensor based on core-offset inter-modal interferometer [J]. *Optics Communications*, 2014, 320: 33-37.