

硬塑料包层光纤构成的多功能光纤传感器

胡义慧, 董航宇, 江超, 黄会玲, 夏果

湖北师范大学物理与电子科学学院, 湖北 黄石 435002

摘要 在单模光纤(SMF)中接入一段硬塑料包层光纤(HPCF),构成一个全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪,利用该干涉仪制备出一种可同时测量温度和折射率的光纤传感器。由于 SMF 纤芯和 HPCF 纤芯直径不匹配,通过 HPCF 的透射光会产生干涉谱,干涉谱随外界环境温度与折射率的变化而变化,从而可实现温度与折射率的测量。实验结果表明:利用该传感器测量温度与折射率的灵敏度分别达到了 $13.3 \text{ pm} \cdot \text{C}^{-1}$ 和 $52.56 \text{ nm} \cdot (\text{RIU})^{-1}$ 。该传感器具有体积小、结构简单、制作容易和灵敏度较高等特点,特别适合在电噪声环境中工作。

关键词 光纤光学; 光纤传感; Mach-Zehnder 干涉仪; 硬塑料包层光纤; 温度传感器; 折射率传感器; 光纤熔接

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.070605

Multifunctional Optical Fiber Sensor Based on a Hard Plastic Cladding Fiber

Hu Yihui, Dong Hangyu, Jiang Chao, Huang Huiling, Xia Guo

College of Physics and Electronic Science, Hubei Normal University, Huangshi, Hubei 435002, China

Abstract A fiber sensor which can measure the temperature and refractive index simultaneously is fabricated based on an all-fiber Mach-Zehnder interferometer (MZI). This MZI is formed when a section of a hard plastic cladding fiber (HPCF) is spliced between two sections of single-mode fiber (SMF). Because of mismatching of the core diameters of SMF and HPCF, interference spectrum is generated by the transmission light from the HPCF. As the interference spectrum varies with the change of ambient temperature and refractive index, the simultaneous measurement of temperature and refractive index is realized. Experimental results show that the sensitivity of temperature and refractive index can achieve to $13.3 \text{ pm} \cdot \text{C}^{-1}$ and $52.56 \text{ nm} \cdot (\text{RIU})^{-1}$, respectively. This optical fiber sensor has the characteristics of small volume, simple structure, easy to fabrication and high sensitivity, which is suitable to operate in electrical noisy surroundings.

Key words fiber optics; optical fiber sensing; Mach-Zehnder interferometer; hard plastic cladding fiber; temperature sensor; refractive index sensor; optical fiber splicing

OCIS codes 060.2370; 280.4788; 230.2285; 250.0040

1 引言

光纤传感器作为一种新型传感器,具有一些独特的性能,例如:体积小,抗电磁干扰,抗腐蚀,易于分布式测量,易于多分复用等^[1-2]。一些特殊结构的光纤传感器还可以同时测量多个物理量。随着光纤传感器应用的深入,各种功能的光纤传感器层出不穷^[3-4]。特别是基于 Mach-Zehnder 干涉原理构成

的光纤传感器是当前大家都比较关注的传感器^[5-11]。在实际应用中,经常会遇到要环境温度与折射率同时测量的问题。在同时测量过程中,必须解决温度和折射率交叉敏感问题。由于全光纤的 Mach-Zehnder 干涉仪(MZI)具有结构紧凑、灵敏度高、成本低等优点^[11],通过精心设计结构,MZI 能够用于温度与折射率的同时测量,并解决温度和折射率交叉敏感问题。现在人们已经提出了一些 MZI

收稿日期: 2017-11-26; 收到修改稿日期: 2017-12-20

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2014CFB349,2016CFC742)、湖北师范大学研究生创新教育基金(20170135)、湖北师范大学 2015 年优秀创新团队项目(T201502)

作者简介: 胡义慧(1991—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 809674922@qq.com

导师简介: 江超(1969—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事光纤传感方面的研究。

E-mail: jiangchao1969@126.com (通信联系人)

结构,能够实现温度与折射率的同时测量,例如:锥形光纤与微纳光纤^[12]、不同光纤纤芯错位熔接而成的光纤^[13-15]、不同类型光纤正对熔接而成的光纤^[16-18]、光纤光栅与光纤混合熔接而成的光纤^[19-22]、带有特殊微结构的光纤^[23-24]、带有微结构的光子晶体光纤等^[25]。这些结构各有特点,都能够实现折射率与温度同时测量,没有交叉敏感。但也存在一些问题,譬如:有的结构制作难度大,控制困难,重复性差;有的需要传感器光谱具有多个谐振峰;有的需要用到飞秒激光精密加工与化学腐蚀等微处理技术;有的灵敏度较低等。

由于硬塑料包层光纤(HPCF)纤芯直径(200 μm)比普通单模光纤(SMF)纤芯直径(8~10 μm)大很多,在连接过程中HPCF更易与SMF耦合,传输过程中的损耗极低。另外,HPCF的包层厚度比较薄(30 μm),当HPCF的包层暴露在外界环境中时,其对外界环境温度和折射率的变化更为敏感。为了实现高精度的折射率与温度的同时测量,本文利用光纤熔接技术构造了一种结构简单的新型光纤传感器。该传感器由SMF-HPCF-SMF纤芯正对熔接构成。由于SMF与HPCF纤芯直径不同,在耦合时存在纤芯失配,形成MZI,利用该干涉仪构成光纤传感器,并对该传感器实现的温度和折射率同时测量进行了分析与实验研究。

2 传感器原理与结构

2.1 传感原理分析

如图1所示,光纤传感器的传感头由输入SMF、HPCF、输出SMF依次正对连接构成。由于SMF纤芯直径与HPCF纤芯直径不匹配,当光由输入SMF传输到HPCF时,光在HPCF中将会沿不同的方向传播。由于不同光模式在HPCF纤芯内传播的路径不一样,不同模式在传输过程中产生光程差,在输出端形成干涉图谱。图1为光在光纤中传输的示意图, L 为HPCF的长度。

当光在传感器中发生干涉时,按照光学基本原理可推导出输出谐振峰波谷对应的特征波长为^[11,21]

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

式中: m 为0,1,2,3...; $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$, $n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$ 分别为HPCF纤芯与包层的有效折射率。

1) 光在光纤中传播既有纤芯模也有包层模。由于HPCF纤芯比较大,包层特别薄,塑料包层中

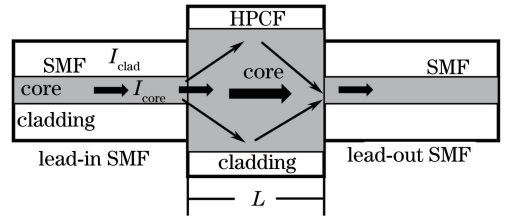


图1 MZI传感器结构与光路示意图

Fig. 1 Schematic of proposed MZI sensor structure and light path

的包层模的倏逝场分布特别容易延伸到包层外的介质中,因此环境折射率变化会对包层的有效折射率产生较大影响,对纤芯有效折射率产生一定的影响。当外界折射率变化(其他量不变)时,根据(1)式可推导出传感器输出光谱的谐振峰值波长随外界折射率的变化关系^[11,21-22]

$$\frac{\partial \lambda_{\text{dip}}}{\partial R_1} = \frac{2}{2m+1} \left[\Delta n_{\text{eff}} \frac{\partial L}{\partial R_1} + L \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}^{\text{core}}}{\partial R_1} - \frac{\partial n_{\text{eff}}^{\text{clad}}}{\partial R_1} \right) \right], \quad (2)$$

式中: R_1 为外界折射率; Δn_{eff} 为光纤纤芯有效折射率与光纤包层有效折射率之差; $\partial L / \partial R_1$ 为HPCF长度随外界折射率的变化量, $\partial n_{\text{eff}}^{\text{core}} / \partial R_1$ 和 $\partial n_{\text{eff}}^{\text{clad}} / \partial R_1$ 分别为HPCF的纤芯有效折射率和包层有效折射率随外界折射率的变化量。

2) 假设外界环境温度变化而其他量不变时,由于光纤具有弹光效应和热光效应,环境温度的变化会引起光纤纤芯和包层的有效折射率变化。但HPCF的纤芯较厚,包层很薄,导致外界环境温度变化对纤芯有效折射率的影响很小,对包层有效折射率的影响较大,所以温度变化主要影响包层的有效折射率变化。因此可根据(1)式推导出传感器输出光谱的谐振峰值波长随外界环境温度的变化关系^[11,21-22]:

$$\frac{\partial \lambda_{\text{dip}}}{\partial T} = \frac{2}{2m+1} \left[\Delta n_{\text{eff}} \frac{\partial L}{\partial T} + L \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}^{\text{core}}}{\partial T} - \frac{\partial n_{\text{eff}}^{\text{clad}}}{\partial T} \right) \right], \quad (3)$$

式中: T 为环境温度; $\partial L / \partial T$ 为HPCF长度随外界环境温度的变化量; $\partial n_{\text{eff}}^{\text{core}} / \partial T$ 和 $\partial n_{\text{eff}}^{\text{clad}} / \partial T$ 分别为HPCF的纤芯有效折射率和包层有效折射率随外界环境温度的变化量。

由(2)式和(3)式可得干涉光谱中峰值特征波长与外界环境折射率和温度的变化关系。取两个对折射率和温度较敏感的谐振波谷(dip1和dip2)作为测量对象,传感器的测量系数矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta R_1 \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{R_{11}} & K_{T_1} \\ k_{R_{12}} & K_{T_2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中： ΔR_1 和 ΔT 分别为光纤传感器周围环境折射率和温度的变化量； $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 为选定的两个谐振波谷(dip1 和 dip2)波长的变化量； $k_{R_{11}}$ $k_{R_{12}}$ 和 K_{T_1} K_{T_2} 分别表示两个波谷(dip1 和 dip2)对应的折射率和温度的测量灵敏度。通过这个矩阵能够测量折射率和温度，消除交叉敏感。

2.2 传感器的制作与透射谱测量

传感器使用的光纤均由武汉长飞公司生产，SMF 采用普通标准 SMF，其纤芯直径为 $8.2 \mu\text{m}$ ，包层直径为 $125 \mu\text{m}$ ；HPCF 选用 HP2140-A，其纤芯为纯二氧化硅玻璃(纤芯直径为 $200 \mu\text{m}$)，包层为高强度低折射率树脂(包层为 $30 \mu\text{m}$)，图 2 为所用 HPCF 结构示意图。HPCF 对电磁干扰不敏感，也不发生辐射，由它构成的光纤传感器特别适合在电噪声环境中使用^[26-27]。

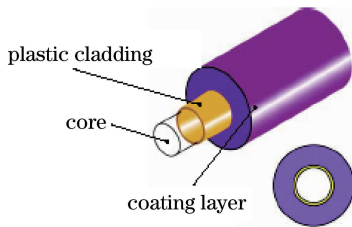


图 2 HPCF 结构图

Fig. 2 Schematic of HPCF structure

光纤传感器的制作过程为：1) 利用智能光纤熔接机(日本横河 Fujikura FSM-100+)将输入 SMF 与一段较长的 HPCF 和输出 SMF 正对熔接在一起，将输入光纤接入到宽带光源(BBS)上，将输出光纤接入到光谱分析仪(OSA, AQ6370D)上。2) 仔细观测输出的光谱，如果光谱不理想，就在输出端切掉一部分 HPCF，再重新熔接上输出 SMF。经过多次反复实验操作，直到获得较好的透射光谱。实验所获得的传感器透射光谱如图 3 所示，透射光谱有两个较大的谐振峰 dip1 与 dip2，它们对应的特征波长分别为 $\lambda_1 = 1357 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1562 \text{ nm}$ ，峰值强度分别为 14.5 dB ， 14.1 dB 。在该传感器中，HPCF 长度约为 1.5 cm ，整个传感器只有几厘米长，结构比较紧凑。

3 实验结果

如图 4 所示，在室温下将制作好的传感器输入端与 BBS 连接，将传感器的输出端与 OSA 连接。BBS 采用 SLD(superluminescent diode)光源，输出光波长范围为 $650 \sim 1650 \text{ nm}$ ；光谱分析仪为日本横河公司的 AQ6370D，测量波长范围 $600 \sim 1700 \text{ nm}$ ，

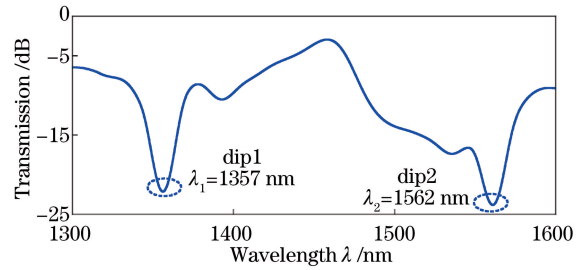


图 3 光纤传感器的透射光谱图

Fig. 3 Transmission spectrum of optical fiber sensor

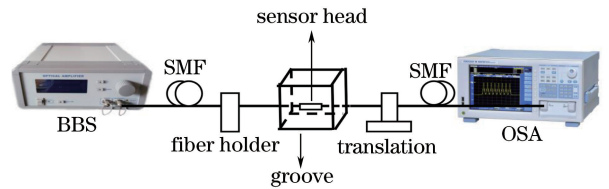


图 4 折射率实验装置图

Fig. 4 Refractive index experimental setup

最小分辨率为 $\pm 0.1 \text{ nm}$ 。进行折射率测量实验时，用一个固定夹具和一个可移动夹具将传感器光纤拉直，然后用支架台固定牢固，避免传感器在测量过程中发生弯曲。最后把传感器部分浸入水槽中，在水槽中加有不同浓度的 NaCl 溶液，通过改变 NaCl 溶液浓度来模拟传感器周围折射率值的改变^[21]。

在实验时，逐步改变水槽中 NaCl 溶液的浓度，每次改变浓度后保持 15 min 左右然后再测量传感器的透射光谱，得到波谷波长与环境折射率之间的变化关系如图 5 所示。从图中可以发现，随着外界折射率的增加，波谷 dip1 和 dip2 的特征波长 λ_1 ， λ_2 均发生了明显的红移，当外界折射率降低时也能够获得相同的变化曲线。

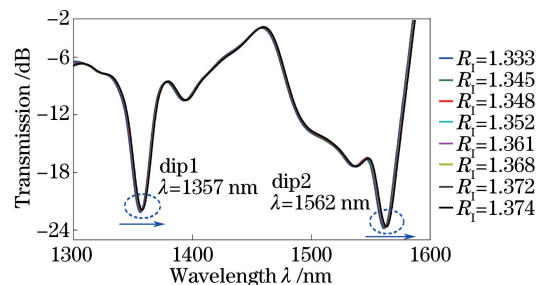


图 5 不同折射率下传感器的透射光谱图

Fig. 5 Transmission spectrum of sensor under different refractive indexes

图 6 为外界折射率变化引起波谷波长变化的线性拟合图，波谷 dip1 的线性拟合度 R^2 达到 0.996 ，dip2 的线性拟合度 R^2 达到了 0.991 。这说明波谷波长与外界环境折射率之间有较好的线性关系，而且外界折射率变化时波谷波长变化较大，说明折射

率的测量灵敏度较高,波谷 dip1 和 dip2 的折射率测量灵敏度分别达到 $k_{R_{11}} = 39.18 \text{ nm} \cdot (\text{RIU})^{-1}$ 和 $k_{R_{12}} = 52.56 \text{ nm} \cdot (\text{RIU})^{-1}$, RIU 表示单位折射率。这主要是由于外界折射率改变引起光纤内部有效折射率改变,从而引起传感器透射谱线性漂移。

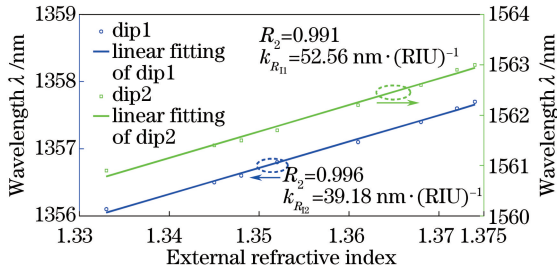


图 6 不同折射率下谐振峰值波长变化的线性拟合图

Fig. 6 Linear fitting of resonant peak wavelength under different refractive indexes

图 7 为温度实验示意图,实验装置由 BBS、OSA、可控温度炉、固定平台和移动平台等组成。BBS 和 OSA 采用与图 4 一样的设备。温度炉采用合肥科晶公司生产的 GSL-1600X,温度精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。在温度实验时,首先将传感器部分放入温度炉内;然后利用固定平台和移动平台把传感器光纤拉紧并固定牢固,确保传感器光纤保持水平不弯曲;最后把 BBS 与输入 SMF 相连,OSA 与输出光纤相连。用控制器控制炉内温度,让温度从 50°C 上升到 120°C (然后从 120°C 降低到 50°C),每隔 10°C 用 OSA 记录一次传感器的透射谱数据,在每一个温度测量点至少保持半个小时温度不变,以保证传感器温度数据的准确性。

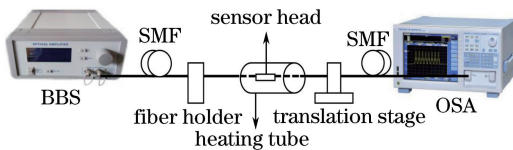


图 7 温度实验装置图

Fig. 7 Setup diagram of temperature experimental setup

图 8 为不同外界环境温度下的传感器透射光谱变化图。从图中可以看出,当温度增加时,波谷 (dip1 和 dip2) 波长发生了明显的红移,当温度降低时能够获得相同的曲线。

外界环境温度变化造成的波谷 (dip1 和 dip2) 波长变化的线性拟合如图 9 所示,dip1 和 dip2 的线性拟合度 R^2 达到了 0.977 和 0.970,说明波谷波长的漂移和温度有较好的线性关系。从图 9 中可以得到 dip1 和 dip2 的温度灵敏度 K_{T_1} , K_{T_2} 分别为 $12.0 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $13.3 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

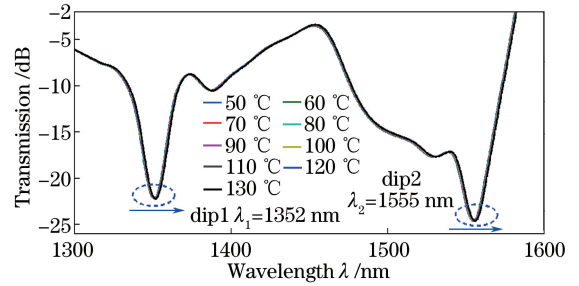


图 8 不同温度下传感器透射光谱图

Fig. 8 Transmission spectra of sensor under different temperatures

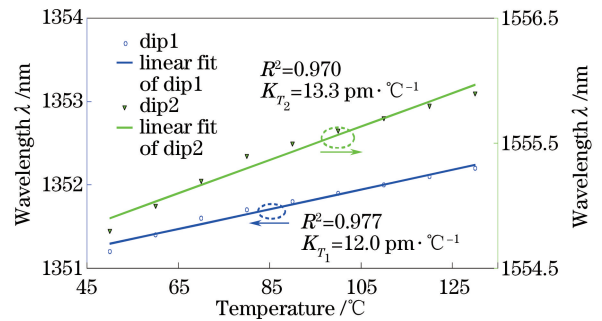


图 9 不同温度下谐振峰值波长变化的线性拟合图

Fig. 9 Linear fitting of resonant peak wavelength under different temperatures

利用波长调制法分别对外界环境温度与折射率进行了测量,测量获得 dip1 和 dip2 的折射率灵敏度分别为 $39.18 \text{ nm} \cdot (\text{RIU})^{-1}$ 和 $52.56 \text{ nm} \cdot (\text{RIU})^{-1}$,温度灵敏度分别为 $12.0 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $13.3 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。利用矩阵理论,可以得到测量矩阵

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 39.18 & 12.0 \\ 52.56 & 13.3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta R_1 \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (5)$$

通过求解(5)式的逆矩阵就可以获得测量的折射率与温度值。

4 结 论

利用 SMF-HPCF-SMF 熔接构成一种新颖的全光纤结构 Mach-Zehnder 干涉仪光纤传感器。当传感器透射谱的两个谐振峰值波长随外界环境折射率与温度变化时,利用波长调制法与矩阵理论,能够实现折射率和温度的同时测量。实验结果表明:传感器透射光谱第一个谐振峰(dip1)测量得到的温度和折射率的灵敏度分别为 $12.0 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $39.18 \text{ nm} \cdot (\text{RIU})^{-1}$,传感器透射光谱第二个谐振峰(dip2)测量获得的温度和折射率灵敏度分别为 $13.3 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $52.56 \text{ nm} \cdot (\text{RIU})^{-1}$ 。该传感器具有结构紧凑、制作特别简单、体积小、成本低等优点。

在医学、物理、生物与化学等领域具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Grattan K T V, Sun T. Fiber optic sensor technology: an overview [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, 82(1/2/3): 40-61.
- [2] Ma J, Yu H H, Xiong J G, *et al.* Research progress of photonic crystal fiber sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 070006.
马健, 余海湖, 熊家国, 等. 光子晶体光纤传感器研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 070006.
- [3] Chen L, Zhu J L, Li Z Y, *et al.* Optical fiber Fabry-Perot pressure sensor using corrugated diaphragm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0306002.
陈露, 朱佳利, 李泽焱, 等. 波纹膜片式光纤法布里-珀罗压力传感器 [J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0306002.
- [4] Zhang S, Huang Z H, Li G F, *et al.* Temperature-insensitive strain sensing based on few mode fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0210002.
张珊, 黄战华, 李桂芳, 等. 温度不敏感的少模光纤应变传感 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0210002.
- [5] 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.
- [6] Li Z Y, Liao C R, Wang Y P, *et al.* Highly-sensitive gas pressure sensor using twin-core fiber based in-line Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6673-6678.
- [7] Pawar D, Kale S N. Birefringence manipulation in tapered polarization-maintaining photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer for refractive index sensing [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 252: 180-184.
- [8] Liao C R, Wang D N, Wang Y. Microfiber in-line Mach-Zehnder interferometer for strain sensing [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 757-759.
- [9] Hu T Y, Wang Y, Liao C R, *et al.* Miniaturized fiber in-line Mach-Zehnder interferometer based on inner air cavity for high-temperature sensing [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(24): 5082-5084.
- [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] Li L C, Xia L, Xie Z H, *et al.* All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11109-11120.
- [12] Lu P, Men L Q, Sooley K, *et al.* Tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(13): 131110.
- [13] Fu H W, Yan X, Li H D, *et al.* Study of fiber sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a core-mismatch Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1106001.
傅海威, 闫旭, 李辉栋, 等. 基于纤芯失配型马赫-曾德尔光纤折射率和温度同时测量传感器的研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1106001.
- [14] 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: 73-77.
- [15] Tong Z R, Han W, Cao Y. 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.
- [16] Chen Y F, Wang Y, Chen R Y, *et al.* A hybrid multimode interference structure-based refractive index and temperature fiber sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(2): 331-335.
- [17] Li L C, Li X, Xie Z H, *et al.* Simultaneous measurement of refractive index and temperature using thinned fiber based Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(19): 3945-3949.
- [18] Luo H P, Sun Q Z, Xu Z L, *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.
- [19] Zhao C L, Yang X F, Demokan M S, *et al.* Simultaneous temperature and refractive index measurements using a 3° slanted multimode fiber

- Bragg grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(2): 879-883.
- [20] Li L C, Xia L, Wang Y W, *et al.* Novel NCF-FBG interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(24): 2268-2271.
- [21] Liao C R, Wang Y, Wang D N, *et al.* Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer embedded in FBG for simultaneous refractive index and temperature measurement [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(22): 1686-1688.
- [22] Yu X J, Chen X F, Bu D, *et al.* In-fiber modal interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(2): 189-192.
- [23] Wang H H, Meng H Y, Xiong R, *et al.* Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on asymmetric structures modal interference[J]. Optics Communications, 2016, 364: 191-194.
- [24] Ma Q F, Ni K, Huang R. Simultaneous temperature and refractive index measurement based on optical fiber sensor[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2017, 28(2): 123-127.
马启飞, 倪凯, 黄然. 同时测量温度和折射率的光纤传感器[J]. 光电子·激光, 2017, 28(2): 123-127.
- [25] 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.
- [26] Wang Y J, Cai X M, Du F. Analysis of the optical properties of the PCS optical fibers [J]. Laser & Infrared, 1996, 26(4): 253-255.
王友军, 蔡小妹, 杜非. 塑料包层光纤的光学性能 [J]. 激光与红外, 1996, 26(4): 253-255.
- [27] Tu F, Qian X W, Liu D M, *et al.* New concept big core polymer cladding silica optical fiber [J]. Optical Communication Technology, 2009, 33(6): 51-53.
涂峰, 钱新伟, 刘德明, 等. 新型大芯径塑料包层光纤 [J]. 光通信技术, 2009, 33(6): 51-53.