

# 飞秒激光制作的光纤高温和折射率传感器

董航宇, 刘昌宁, 孙四梅, 江超\*, 张傲岩, 胡荟灵, 王解

湖北师范大学物理与电子科学学院, 湖北 黄石, 435002

**摘要** 将多模光纤两端与单模光纤正对拼接在一起, 通过光纤微孔及不同芯径光纤拼接构成一个复杂的马赫-曾德尔干涉仪, 利用该干涉仪构成一款新型高温与折射率传感器。实验发现, 传感器透射谱中谐振峰波谷 dip 1 的波长只随环境温度发生线性漂移, 波谷 dip 1 的峰值强度只随环境折射率发生线性漂移。据此利用波谷得到一个关于温度与折射率的测量矩阵, 实验测得高温灵敏度达到  $18.55 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , 折射率灵敏度达到  $-155.2 \text{ dB}/\text{RIU}$  (RIU 为折射率单元)。利用波谷 dip 1 的这个特性实现了高温与折射率同时测量, 不存在交叉敏感。该传感器结构紧凑简单、性能稳定、灵敏度高。

**关键词** 光纤光学; 温度与折射率传感器; 光纤传感; 飞秒激光微加工

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170633

## Optical Fiber High-Temperature and Refractive Index Sensor Fabricated by Femtosecond Laser

Dong Hangyu, Liu Changning, Sun Simei, Jiang Chao\*, Zhang Aoyan, Hu Huiling, Wang Jie

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

**Abstract** With two ends of the multi-mode fiber and a single-mode fiber spliced together, a complex Mach-Zehnder interferometer is constructed by splicing fiber micropores with fibers of different core diameters. A new fiber optic sensor with high temperature and refractive index is constructed via the interferometer. Through experiment, it is found that the wavelength of the resonant peak valley in the transmission spectrum of the sensor linearly drifts only with the ambient temperature, while the peak intensity of the wave valley dip 1 linearly drifts only with the refractive index in the environment. A measurement matrix for temperature and refractive index of wave valley dip 1 can be obtained. The experimental results show that the high temperature sensitivity is  $18.55 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  and the refractive index sensitivity is  $-155.2 \text{ dB}/\text{RIU}$  (RIU is refractivity unit). Simultaneous measurement of the high temperature and refractive index is realized, and there is no cross sensitivity. The sensor has the advantages of compact and simple structure, stable performance and high sensitivity.

**Key words** fiber optics; temperature and refractive index sensor; optical fiber sensing; femtosecond laser micromachining

**OCIS codes** 060.2370; 060.2340; 060.2300

## 1 引言

光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)具有不带纤端反射镜的优点,克服了迈克耳孙干涉仪回波干扰的缺点,因而在光纤传感技术领域得到更为广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。在各种应用检测中,光纤折射率传感器和光

纤温度传感器是两个重要的传感器。近年来,人们对同时测量折射率和温度的光纤传感器进行了深入研究,开发出了各种结构的温度和折射率传感器<sup>[5-9]</sup>,其中“单模-多模-单模”光纤拼接结构得到广泛研究<sup>[7-13]</sup>。将单模-多模-单模光纤正对拼接构成的温度传感器,在低温时灵敏度相对较低,而单模-

收稿日期: 2019-04-24; 修回日期: 2019-05-29; 录用日期: 2019-06-24

基金项目: 湖北省自然科学基金(2016CFC742)、湖北师范大学研究生创新教育基金(20190136)、湖北师范大学 2015 年优秀中青年科技创新团队项目(T201502)

\* E-mail: jiangchao1969@126.com

多模-单模光纤错位拼接构成的温度传感器,虽然灵敏度较高,但结构不易重复、易断。单模-多模-单模光纤拼接构成的折射率传感器一般灵敏度较小,如文献[12]所述,单模-多模-单模结构传感器强度调制受噪声影响很大,呈现无规律起伏,不易检测,同时容易受应力、弯曲形变等交叉影响,因此单模-多模-单模折射率传感器强度调制尚不能使用。飞秒激光作为一种新的微纳加工手段具有脉冲窄、瞬时功率高、聚焦区域小、加工区不产生热影响(属于冷加工)等优点,在光学微加工领域得到广泛应用<sup>[14]</sup>。近年来,利用飞秒激光在光纤中制作微腔构成的温度与折射率传感器得到关注<sup>[15-23]</sup>,制作的光纤温度传感器一般都能够测量高温<sup>[24-25]</sup>,而制作的光纤折射率传感器依赖于孔的大小。

本文利用“单模-多模-单模”光纤拼接设计一款新型温度与折射率传感器,该传感器的多模光纤中利用飞秒激光微纳加工技术制作一个微型孔,通过拼接不同芯径光纤与微型孔一起构成一个复杂的马赫-曾德尔干涉仪(MZI),该传感器相比于普通单模光纤传感器<sup>[22]</sup>,除具有敏感的高温特性外,也大大增强了传感器折射率灵敏度。该新型传感器通过对多模光纤打孔的方式增强了外界参量对纤芯中传输光的影响,使传感器在较宽的折射率范围内具有良好的线性特性,使强度调制呈现规律性起伏。该传感器具有高分辨率、性能稳定、耐腐蚀、抗电磁干扰等优点,可有效实现单模-多模-单模光纤拼接,完成的传感器的温度和折射率参数测量。

## 2 传感器的制备与工作原理

传感器采用的光纤为普通标准单模光纤(SMF)和大芯径多模光纤(MMF),单模光纤纤芯直径为  $9\ \mu\text{m}$ ,包层直径为  $125\ \mu\text{m}$ ;大芯径多模光纤的纤芯直径为  $105\ \mu\text{m}$ ,包层直径为  $125\ \mu\text{m}$ 。

### 1) 单模光纤与多模光纤拼接

剪一段多模光纤,去掉涂覆层,用丙酮清洗干净,用光纤熔接机(Fujikura FSM-100+, YOKOGAWA, 日本)将多模光纤与输入单模光纤熔接在一起,然后用光纤切割刀(TC-6S, 藤友, 日本)将多余的多模光纤切掉,保留合适的长度,再将多模光纤另外一端与输出单模光纤熔接在一起。将输入单模光纤接入到宽带光源(BBS),输出单模光纤接入到光谱分析仪(OSA, AQ6370D, YOKOGAWA, 日本),观察拼接结构的透射谱,通过观察光谱的变化,反复前面的操作过程,最终找

到一个合适的多模光纤长度。经过多次尝试,当大芯径多模光纤长度为  $4\ \text{cm}$  时,获得波长范围在  $1300\sim 1370\ \text{nm}$  且具有三个稳定谐振峰的透射谱。

### 2) 飞秒激光在多模光纤上打孔

图1为飞秒激光加工示意图。将拼接好的结构固定在三维(3D)移动平台上,飞秒激光器(Libra-USP-HE+, COHERENT, 美国)输出中心波长为  $800\ \text{nm}$ 、脉冲宽度为  $35\ \text{fs}$  的激光,输出的飞秒激光先后通过衰减片和光阑,再经过  $20\times$  物镜聚焦后照射到多模光纤的包层上,飞秒激光功率稳定在  $4.5\ \text{mW}$ ,利用 CCD 实时观察微孔的形成过程,只需十几秒就完成一个微孔的制作。在光纤上打孔时,由于光纤呈现圆柱形,光纤折射率与空气折射率失配,这将会导致很严重的球面像差,因此必须采用折射率匹配液。当符合要求的微孔制作好后,将其放入浓度为  $10\ \text{mol/L}$  的氢氧化钾溶液的超声波清洗机中清洗  $3\ \text{h}$ ,再用蒸馏水冲洗干净。

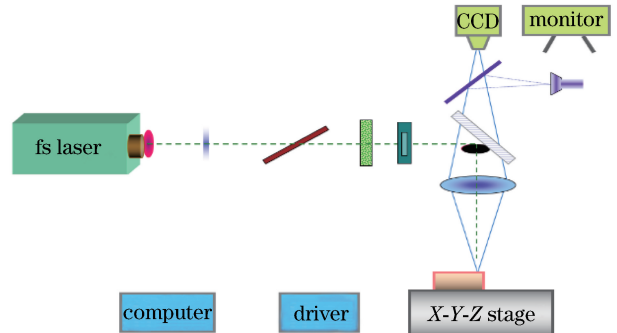


图1 飞秒激光加工示意图

Fig. 1 Schematic of femtosecond laser processing

然后用金相显微镜拍摄光纤表面微孔的形貌,如图2所示。经测量表面孔径约为  $25\ \mu\text{m}$ ,从侧面看孔形状大概呈锥形,孔深约  $53\ \mu\text{m}$ 。传感器结构示意图如图3所示,大芯径多模光纤上微孔已经深入到纤芯里面,但还未到达光纤中心。

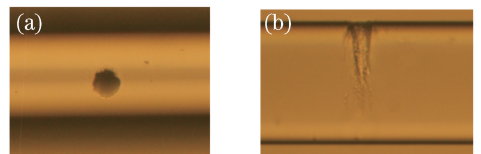


图2 多模光纤中微腔显微镜图。(a)正面图;(b)侧面图

Fig. 2 Microcavity microscopy in multimode fiber.

(a) Front view; (b) side view

### 3) 传感器光路示意图说明

传感器光路示意图如图4所示,当光从 SMF 进入 MMF 时,由于 SMF 和 MMF 直径严重不匹配,



图 3 传感器结构示意图

Fig. 3 Schematic of sensor structure

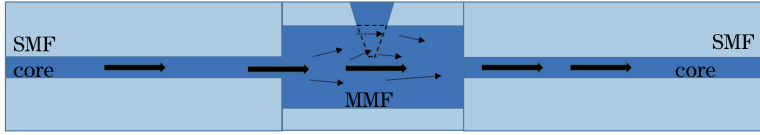


图 4 传感器光路示意图

Fig. 4 Light path diagram of sensor

#### 4) MZI 工作原理

由于光路复杂,为简化分析,在这里主要考虑光在纤芯与锥形腔两个路径传播的情形。根据光学基本原理,从 MZI 输出的光强度为<sup>[20]</sup>

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

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

$$\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cavity}}, \quad (3)$$

式中: $\lambda$  为入射光波长; $I_1$  和  $I_2$  分别为光在纤芯中传播强度和在锥形腔中传播强度; $L$  为空气腔长度; $\phi$  为两路光的相位差; $\Delta n_{\text{eff}}$  为纤芯和空气腔的有效折射率差; $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$  和  $n_{\text{eff}}^{\text{cavity}}$  分别为纤芯有效折射率和空气腔有效折射率。当相位差  $\phi = (2n + 1)\pi$  时,马赫-曾德尔干涉条件得到满足,依据(2)式可以推导出透射谱的  $n$  阶谐振峰的波长  $\lambda_n$  (对应波谷)为

$$\lambda_n = \frac{2\Delta n_{\text{eff}} L}{2n + 1}. \quad (4)$$

当传感器周围温度发生改变时,主要考察传感器透射谱的谐振峰值波长随环境温度变化情况,根据(4)式近似分析测量温度的灵敏度。当传感器周围折射率发生变化时,由于传感器的微腔直接与测量的液体接触,不同的液体浓度会造成通过微腔的光强发生较大改变,从而可能对透射谱的峰值强度造成更大的影响。通过考察传感器透射谱谐振峰值强度与外界折射率的变化关系可以进行折射率测量。由于在测量环境温度与环境折射率时,考察传感器透射谱的变化量不一样,有可能通过波长调制法与强度调制法实现两个量的同时测量,消除交叉敏感。

### 3 实验结果与讨论

图 5 是测得的传感器透射谱,与没有打孔的拼

会激发出多种光模式。当光经过 MMF 的锥形腔时,光路被分成两个主要部分,一部分光还是沿纤芯中心继续向前传播,另一部分光进入空气腔传播,形成的几个光路又在 SMF 中耦合输出。由于不同光模式传播路径不一样,在传播过程中有光程差,形成干涉,构成 MZI。

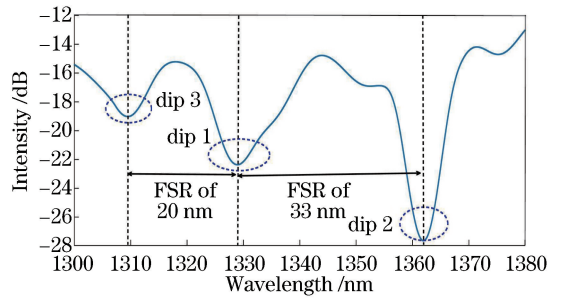


图 5 传感器透射光谱图

Fig. 5 Transmittance spectrum of sensor

接结构的透射谱相比,透射谱的强度略微减小,这估计是微孔对传输光强的影响造成的。透射谱有三个比较强的谐振峰,波长范围在 1300~1370 nm 之间,波谷 dip 1 对应的谐振峰波长  $\lambda_1 = 1329$  nm,强度  $A_1 = 10$  dB;波谷 dip 2 对应的谐振峰波长  $\lambda_2 = 1363$  nm,强度  $A_2 = 16$  dB;波谷 dip 3 对应的谐振峰波长  $\lambda_3 = 1309$  nm,强度  $A_3 = 7$  dB。三个谐振峰之间的自由光谱范围 (FSR) 分别为 20 nm 与 33 nm,FSR 较大能够满足波长调制要求。

为定性分析传感器透射谱中各个模式在功率上的贡献大小,利用傅里叶变换得到图 6 的空间频谱图。从图中可以发现有一个占主导地位的纤芯模,它贡献了透射谱的大部分功率,有 3 个低阶包层模

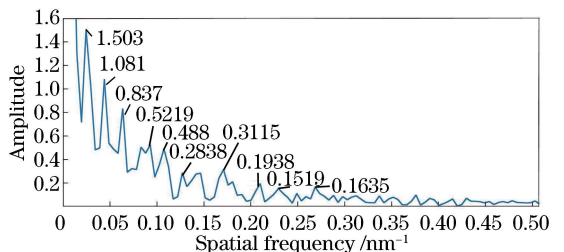


图 6 传感器的空间频谱图

Fig. 6 Spatial spectrum of sensor

对透射谱贡献了一部分功率。另外,从图中还可以发现,存在7个高阶包层模对透射谱贡献了较小功率,它们属于弱包层模。这些说明传感器的透射谱是由许多不同模式相互干涉形成的结果,是一个复杂的过程,从而导致不同谐振峰值波长或强度对不同参量的灵敏度不一样。

### 3.1 温度实验

将传感器结构按图7所示装置图连接,输入端接宽带光源,输出端接光谱分析仪,将传感器结构放置在管式炉中间,并用一个5g砝码将光纤水平拉直固定,避免光纤弯曲影响测量结果。将实验装置连接好后,分别进行低温和高温实验,发现相对高温实验,低温实验光谱变化较小,灵敏度较低,因此未深入研究。根据其他文献中介绍的光纤微孔结构一般对高温有比较敏感的特性<sup>[24-25]</sup>,对传感器进行高温实验,温度测量范围为300~720℃,每间隔80℃记录一次传感器光谱的变化情况。每次实验达到设定温度时保持静置15min,直到传感器光谱趋于稳定才记录数据,确保测量数据的准确度。

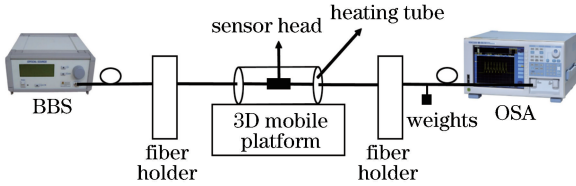


图7 温度实验装置图示意图

Fig. 7 Schematic of temperature experimental device

图8为传感器在不同温度下的透射光谱图。从图8中可以看出波谷dip1和波谷dip2在不同温度下随温度的升高发生明显红移。对于波谷dip1,当温度在300~720℃时,波谷dip1的波长变化量约为8nm,强度保持不变;对于波谷dip2,当温度在300~720℃时,波谷dip2的波长变化量约为8nm,强度变化约为1dB。图9为传感器高温实验

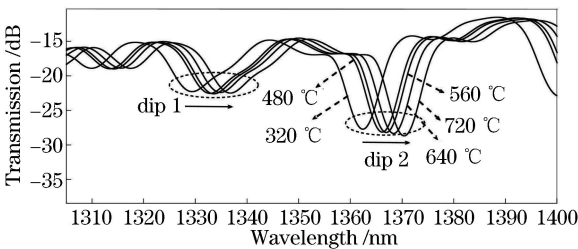


图8 不同温度下传感器透射光谱图

Fig. 8 Transmittance spectra of sensors at different temperatures

时,波谷dip1和波谷dip2的波长 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 随温度变化的线性拟合图,两个线性拟合系数分别为0.9949和0.9844,说明 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 与环境温度 $T$ 之间存在很好的线性关系。波谷dip1对应的温度灵敏度为18.55 pm/℃,波谷dip2对应的温度灵敏度为19.53 pm/℃,两者相差不大。升温实验结束后,又马上进行了720~300℃的降温实验,测得的实验数据与升温时一致,显示为降温后的光谱跟升温前光谱一致。当温度重新降到室温时,传感器光谱又重新恢复到初始状态。

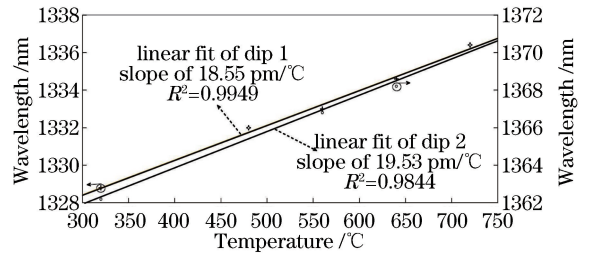


图9 高温实验线性拟合图

Fig. 9 Linear fitting diagram of high temperature experiment

### 3.2 折射率实验

将传感器按图10装置连接,实验时将水槽中的传感器结构用一个5g的小砝码拉直,避免结构弯曲影响测量结果。折射率实验所用液体为饱和食盐水,将不同浓度的饱和食盐水依次注入水槽中静置,待输出光谱稳定后,记录透射光谱。每次实验结束时用蒸馏水把水槽与传感头清洗干净,以免影响下一个折射率实验的准确度。

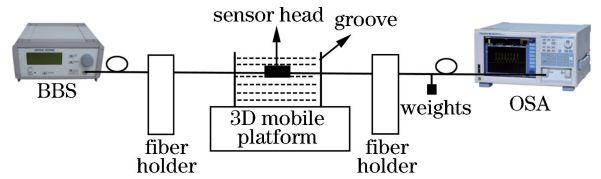


图10 折射率实验装置图

Fig. 10 Schematic of refractive index experimental device

图11为不同折射率时传感器的透射谱图。 $n_1 \sim n_5$ 分别代表不同折射率,随着折射率变化,波谷dip1和波谷dip2的强度发生明显变化。对于波谷dip1,当折射率从1.3451到1.3812逐渐变大时,波谷dip1的波长保持不变,而强度增大了4.75dB;对于波谷dip2,当折射率从1.3451到1.3812变化时,波谷dip2的波长变化量约为1nm,强度减小了1.29dB。主要是由于传感器的微腔直



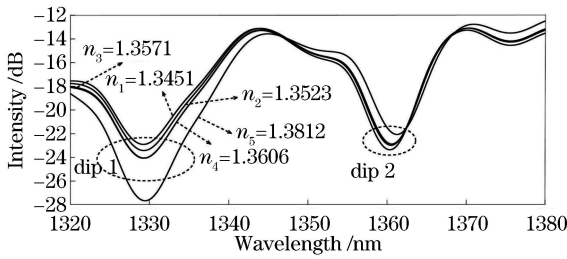


图 11 不同折射率时传感器的透射谱图

Fig. 11 Transmittance spectra of sensor in different refractive indexes

接与被测量的液体接触,不同的液体浓度会造成通过微腔的光强发生较大改变,进而对透射谱的峰值强度造成更大的影响(比波长漂移大)。图 12 为不同浓度饱和食盐水时,传感器透射谱的谐振峰强度随折射率变化的线性拟合图,两个线性拟合系数分别达到 0.9616 和 0.9861,说明  $A_1$  和  $A_2$  与环境折射率之间存在较好的线性关系。由线性拟合图得到波谷 dip 1 和波谷 dip 2 的折射率测量灵敏度分别为  $-155.2$  dB/RIU 和  $41.71$  dB/RIU (RIU 为折射率单位)。当折射率从 1.3812 到 1.3451 逐渐变小时,得到和图 11 相同的结果。

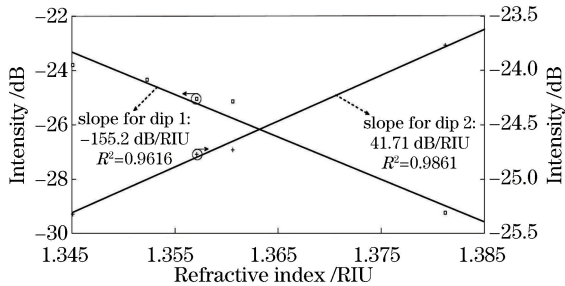


图 12 折射率实验线性拟合图

Fig. 12 Linear fitting diagram of refractive index experiment

### 3.3 实验结果

通过综合考察温度实验与折射率实验,发现传感器透射谱波谷 dip1 存在一个比较有趣的现象,在测量温度时,波谷 dip 1 的波长发生左右线性漂移,而峰值强度不变;在测量折射率时,波谷 dip 1 的波长不变,而峰值强度发生上下线性漂移。因此,利用波谷 dip 1 的这个特性可以实现温度与折射率的同时测量,而不产生交叉敏感。根据测得的实验数据,得到关于波谷 dip 1 的测量矩阵为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta A_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 18.55 & 0 \\ 0 & -155.2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中,  $\Delta\lambda_1$  和  $\Delta A_1$  分别为波谷 dip 1 的波长变化量与峰值强度变化量,  $\Delta T$  和  $\Delta n$  分别为传感器周围环

境的温度变化量与折射率变化量。那么测得的温度变化量与折射率变化量为

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 18.55 & 0 \\ 0 & -155.2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta A_1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

## 4 结 论

利用飞秒激光微纳加工技术在大芯径多模光纤的包层中制作微腔,将该多模光纤两端与单模光纤拼接制备成 MZI。利用干涉仪透射谱受环境温度与折射率变化的影响,完成对环境温度与环境折射率的测量。在高温时获得较好的测量效果。波谷 dip 1 与 dip 2 的温度灵敏度达到  $18.55$  pm/°C 和  $19.53$  pm/°C。波谷 dip 1 与 dip 2 的折射率灵敏度达到  $-155.2$  dB/RIU 和  $41.71$  dB/RIU。通过实验数据分析,利用传感器透射谱波谷 dip 1 得到关于环境温度与折射率的测量矩阵,可以实现温度和折射率的同时测量,而不存在交叉敏感。该传感器具有结构紧凑简单、成本低、灵敏度高优点,在光纤传感领域有广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Yang M, Wang D N, Wang Y, *et al.* Fiber in-line Mach - Zehnder interferometer constructed by selective infiltration of two air holes in photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 636-638.
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Fu H W, Yan X, Li H D, *et al.* Study of fiber sensor for simultaneous measurement of refractive 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.
- [10] Li E B, Wang X L, Zhang C. Fiber-optic temperature sensor based on interference of selective higher-order modes [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(9): 091119.
- [11] Huang Z J, Li Q, Xu Y Q, *et al.* Research on temperature sensing characteristics based on modular interference of single-mode-multimode-single-mode fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 0605001.  
黄泽铄, 李强, 徐雅芹, 等. 基于单模-多模-单模光纤模间干涉的温度传感特性研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0605001.
- [12] Wang Q, Farrell G. All-fiber multimode-interference-based refractometer sensor: proposal and design[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(3): 317-319.
- [13] Qian C L, Chen M Y. Investigation on refractive index sensing based on interference effect in multimode optical fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 050601.  
钱春霖, 陈明阳. 基于多模干涉效应的光纤折射率传感技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 050601.
- [14] Huang H, Yang L M, Liu J. Micro-hole drilling and cutting using femtosecond fiber laser[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(5): 051513.
- [15] Hu Y H, Jiang C, Liu J B. High sensitivity fiber sensor by femtosecond laser micromachining[J]. *Laser Journal*, 2017, 38(5): 20-22.  
胡义慧, 江超, 刘继兵. 飞秒激光制作的高灵敏度光纤传感器[J]. *激光杂志*, 2017, 38(5): 20-22.
- [16] Dong X R, Wang W Y, Hu Y W. Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser micromachining and its sensing properties research[J]. *Applied Laser*, 2017, 37(3): 420-423.  
董欣然, 王伟莹, 胡友旺. 飞秒激光加工全光纤马赫泽德尔干涉仪的传感特性研究[J]. *应用激光*, 2017, 37(3): 420-423.
- [17] 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.
- [18] Wei T, Han Y K, Tsai H L, *et al.* Miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer fabricated with a femtosecond laser [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(6): 536-538.
- [19] Ma J, Ju J, Jin L, *et al.* Fiber-tip micro-cavity for temperature and transverse load sensing [J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12418-12426.
- [20] 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.
- [21] Liao C R, Hu T Y, Wang D N. Optical fiber Fabry-Perot interferometer cavity fabricated by femtosecond laser micromachining and fusion splicing for refractive index sensing [J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22813-22818.
- [22] Wang Y, Wang D N, Yang M W, *et al.* Refractive index sensor based on a microhole in single-mode fiber created by the use of femtosecond laser micromachining[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3328-3330.
- [23] 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.
- [24] Lai Y, Zhou K, Zhang L, *et al.* Microchannels in conventional single-mode fibers[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(17): 2559-2561.
- [25] Liu Y, Qu S L, Li Y. Single microchannel high-temperature fiber sensor by femtosecond laser-induced water breakdown[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(3): 335-337.