

## 激光与光电子学进展

## 基于多芯光纤超模干涉的温度传感器

闫栋, 陈南光\*, 田振, 姚一村, 张丽强

聊城大学物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252000

**摘要** 研究了锥型多芯光纤模间耦合所产生的干涉在温度传感中的应用。利用弱耦合多芯光纤拉锥后变成强耦合多芯光纤, 从而产生超模干涉的特点, 在单模光纤中熔接一段弱耦合七芯光纤。经氢气火焰匀速往返拉锥后, 该光纤直径变小, 芯间距减小到一定程度后产生超模干涉, 从而得到了结构简单、灵敏度高、特异性强的温度传感器。研究发现, 拉锥后的光纤直径越小、锥区长度越长, 模间耦合越强。选取锥区长度为  $1.8 \mu\text{m}$ 、锥区直径为  $31.36 \mu\text{m}$  的锥型多芯光纤, 所设计制作的温度传感器的灵敏度可达  $840 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , 比之前报道的高约 52.7 倍。

**关键词** 光纤光学; 多芯光纤; 超模干涉; 温度; 传感器

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0706007

## Temperature Sensor Based on Multicore Fiber Supermode Interference

Yan Dong, Chen NanKuang\*, Tian Zhen, Yao Yicun, Zhang Liqiang

*School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University,**Liaocheng, Shandong 252000, China*

**Abstract** This paper studies the application of interference caused by mode coupling in a tapered multicore fiber to temperature sensing. A weakly coupled multicore fiber becomes a strongly coupled multicore fiber after being tapered and has characteristics of supermode interference. A weakly coupled seven-core fiber is fused into a single-mode fiber after being pulled back and forth by a hydrogen flame at a uniform speed. When the diameter of the optical fiber decreases and distance between cores is reduced to a certain extent, supermode interference occurs, thus temperature sensor with simple structure, high sensitivity, and strong specificity is fabricated. It is determined that the smaller the fiber diameter and the longer the taper length, the stronger the mode coupling. A tapered multicore fiber with a cone length of  $1.8 \mu\text{m}$  and a cone diameter of  $31.36 \mu\text{m}$  was selected. The sensitivity of the designed temperature sensor reaches  $840 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , which is 52.7 times higher than the previously reported value.

**Key words** fiber optics; multi-core optical fiber; supermode interference; temperature; sensor

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 280.4788; 280.6780

## 1 引言

温度测量在油田、矿井<sup>[1]</sup>、电力传输<sup>[2]</sup>等领域都有着至关重要的作用。传统的温度传感器件是电学温度传感器, 但是由于其输出阻抗高、输出功率

小、负载能力差、易受外界干扰、集成度低等缺点, 限制了应用范围。光纤温度传感器具有耐高温、抗腐蚀、抗电磁干扰、体积小、重量轻、寿命长、制作工艺简单、灵敏度高优点, 在温度传感方面有显著的优势, 在生物科学、航天技术、环境检测、工业制

收稿日期: 2020-11-20; 修回日期: 2020-12-07; 录用日期: 2020-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(61875247)、聊城大学科技处高层次启动费(31805180101)、聊城大学发展规划与学科建设处建设经费(319190301)

\*E-mail: nankuang@gmail.com

造<sup>[3-6]</sup>等方面有着广泛的应用。光纤温度传感器有点式和分布式,常用的点式结构有芯径错位熔接光纤<sup>[7]</sup>、不对称光纤<sup>[8]</sup>、拼接多种光纤<sup>[9]</sup>、细芯光纤<sup>[10]</sup>等,但是这些结构存在灵敏度低、重复性差的问题,有些还需要飞秒激光器进行精密加工、化学腐蚀等复杂的操作。

本文提出了一种利用弱耦合的多芯光纤,通过熔接拉锥技术制作的光纤温度传感器由“单模光纤(SMF)-多芯光纤(MCF)-单模光纤”正对熔接。将弱耦合的多芯光纤通过氢气火焰拉锥成强耦合的多芯光纤,产生超模干涉,制作成温度传感器,这种多芯光纤温度传感器具有制作简单、重复性好、响应速度快、稳定性高的特点。实验结果表明,多芯光纤温度传感器透射谱的峰值波长(波谷)对环境温度敏感,所提传感器对温度的变化具有较高的灵敏度和良好的线性响应。

## 2 传感器结构与原理

所设计的传感器结构如图 1(a)所示,该传感器是在单模光纤中熔接一段长度为 8 cm 的七芯光纤,再经过氢气火焰匀速扫描拉锥制成的。图 1(c)为经过拉锥后用 1000 倍 CCD 拍摄的直径为 31.36  $\mu\text{m}$  的多芯光纤。选用标准单模光纤(G652,长飞公司),纤芯直径为 8.2  $\mu\text{m}$ ,包层直径为 125  $\mu\text{m}$ 。多芯光纤是七芯光纤(SM-7C1500, Fibercore 公司),其横截面如图 1(b)所示,光纤内有七个平行排列的纤芯,呈六角密排结构,纤芯直径为 6.1  $\mu\text{m}$ ,纤芯间距为 35  $\mu\text{m}$ ,包层直径为 125  $\mu\text{m}$ ,为弱耦合的多芯光纤。中间的纤芯在光纤的几何中心,且为单模,所以在几何结构上和两端的单模光纤具有良好的匹配性。使用多功能光纤熔接机(Fujikura FSM-100p+,日本藤仓公司)的单模进行自动熔接,即可对七芯光纤的中间芯和两端的单模进行良好的熔接,光源经单模光纤和熔接了一段七芯光纤后的光纤的光谱如图 1(d)密点线所示,损耗几乎为零,说明实验所用的七芯光纤和单模光纤具有良好的匹配性。透射光强的表达式为

$$I_T = I_H(\lambda) - I_Q(\lambda), \quad (1)$$

式中: $I_Q$ 为光源的输出光强; $I_H$ 为透射未经过拉锥多芯光纤的光强。

制作完成的多芯光纤放在自主研发的光纤拉锥机上进行拉锥。多芯光纤被氢气火焰加热并逐渐拉伸,随着光纤直径变小,各个纤芯直径也相应

变小,光的模场从纤芯中溢出,同时 6 个卫星纤芯与中心纤芯之间的距离也变小,进而形成一个强耦合的多芯光纤,中间芯的能量耦合到周围芯,形成超模,两种模式间发生超模干涉,从而获得周期性振荡的干涉谱。

为了获得超模产生的条件和规律,对七芯光纤在不同拉锥直径时的干涉谱进行了实验研究,所获得的干涉谱如图 1(d)所示。图 1(d)中实线为七芯光纤直径为 125  $\mu\text{m}$ ,未进行拉锥时的光谱,其和光源的输出光谱一致,这是由于实验所用的七芯光纤为弱耦合光纤,且纤芯直径为 6.1  $\mu\text{m}$ ,整根光纤相当于 7 根没有相互作用的单模光纤。图 1(d)中点划线、点线和虚线分别是拉锥直径为 62.43  $\mu\text{m}$ 、27.61  $\mu\text{m}$ 、13.35  $\mu\text{m}$  时的光谱减去光源输出光谱后的归一化透射光谱。从图 1(d)可见,与直径为 125  $\mu\text{m}$  时的光谱相比,直径为 62.43  $\mu\text{m}$  时的光谱在长波 1645 nm 附近出现了一个振荡,表明此时超模被激发并产生了模间干涉。随着拉锥直径减小,光谱振荡增多,干涉谱的自由光谱范围(FSR)变小。

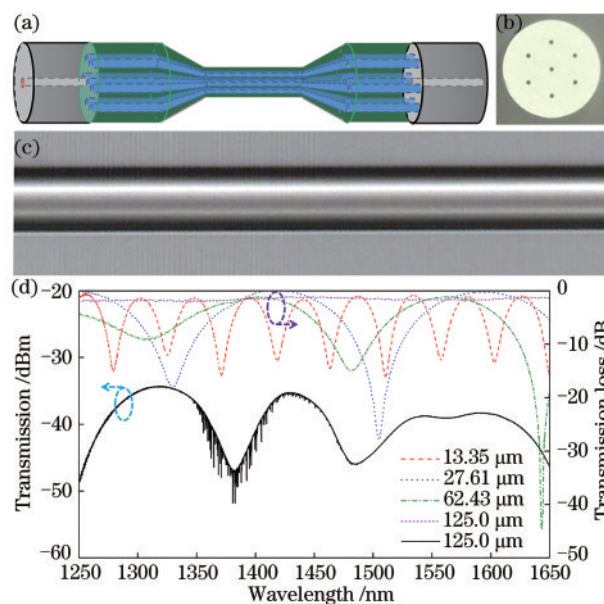


图 1 多芯光纤架构和透射测试光谱。(a) MCF 熔接结构示意图;(b) MCF 截面图;(c)1000 倍 CCD 镜头下的锥型 MCF;(d)未拉锥 MCF 和锥型 MCF 在室温下的光谱  
Fig.1 Multicore fiber architecture and transmission test spectra. (a) Schematic of MCF fusion structure; (b) sectional view of MCF; (c) cone-shaped MCF under 1000 $\times$  CCD lens; (d) spectra of untaper and taper MCFs at room temperature

根据强耦合多芯光纤耦合模理论,当多芯光纤的纤芯间距较小时,纤芯之间会产生功率耦合。当

光信号进入到一个强耦合多芯光纤中,会激发出多种超模并产生芯间耦合,因此多芯光纤传感结构的透射光谱通常为多个超模的叠加。这些超模叠加后的干涉强度<sup>[11]</sup>可以表示为

$$I = \sum_{i=1}^n I_i + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sqrt{I_i I_j} \cos[2\pi(n_i - n_j)L/\lambda], \quad (2)$$

式中: $I_i$ 和 $I_j$ 分别为第 $i$ 阶超模和第 $j$ 阶超模的光强; $n_i$ 和 $n_j$ 分别为第 $i$ 阶超模和第 $j$ 阶超模对应的有效折射率; $L$ 为多芯光纤长度; $\lambda$ 为输入光的中心波长。为了方便分析,将多芯光纤传感器结构内干涉光强简化为<sup>[12]</sup>

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi, \quad (3)$$

式中: $I_1$ 为多芯光纤第一阶超模的强度; $I_2$ 为多芯光纤第二阶超模的强度; $\phi$ 为两个超模间的相位差。相位差可表示为

$$\phi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda}, \quad (4)$$

式中: $\Delta n_{\text{eff}}$ 为第一阶超模与第二阶超模的有效折射率差。干涉峰的出现需要满足的条件是,两个超模之间的相位差为 $\phi = (2m + 1)\pi$ ,此时干涉峰的波

长可以表示为

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2m + 1}, \quad (5)$$

式中: $m$ 为干涉级数。

从(5)式可知自由光谱范围为

$$R_{\text{FSR}} = \Delta\lambda_m = |\lambda_m - \lambda_{m-1}| = \frac{4\Delta n_{\text{eff}}L}{(2m + 1)(2m - 1)} \approx \frac{\lambda_m^2}{\Delta n_{\text{eff}}L}. \quad (6)$$

由(6)式可知,当干涉长度 $L$ 或有效折射率差 $\Delta n_{\text{eff}}$ 减小时,自由光谱范围增大;当 $\lambda$ 减小时,自由光谱范围减小。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 传感器的干涉光谱

将多芯光纤温度传感器输入端 SMF 与宽频超荧光光源 (SLD) 相连,输出端 SMF 与光谱仪 (OSA) 相连,选取干涉条纹明显、熔接拉锥直径为  $31.36 \mu\text{m}$  的 MCF 来进行温度传感实验,其透射干涉光谱如图 2(a) 所示。光谱测量采用光谱仪 OSA (AQ6370D, 日本横河公司),光谱测量范围为  $1250 \sim 1650 \text{ nm}$ 。从图 2(a) 中可以得到,多芯光纤

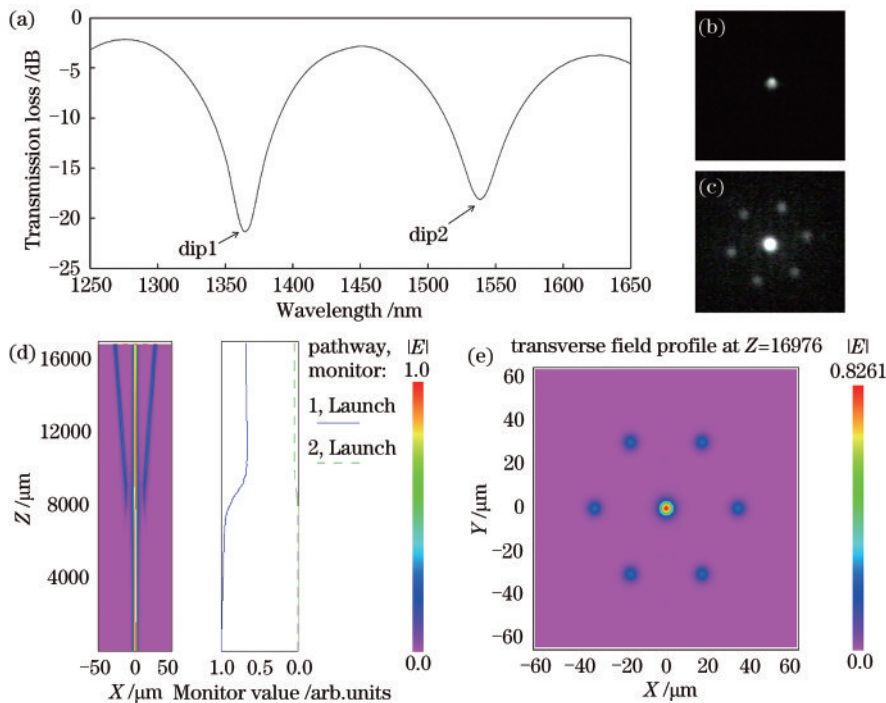


图 2 多芯光纤超模干涉和模场分布。(a)传感器的透射光谱;(b)弱耦合MCF的光强分布;(c)强耦合MCF光强分布;(d)MCF超模干涉平面仿真;(e)MCF超模干涉截面仿真

Fig. 2 Supermode interference and mode field distribution in multicore fiber. (a) Transmission spectrum of the sensor; (b) light intensity distribution of weakly coupled MCF; (c) light intensity distribution of strongly coupled MCF; (d) simulated MCF supermode interference plane; (e) simulated MCF supermode interference cross-section

温度传感器的透射光谱有两个明显的谐振峰(波谷),分别记为 dip1 和 dip2,FSR 分别为 177.3 nm 和 170.8 nm。图 2(b)是在 1000 倍 CCD 显微镜下观察到的未经过氢气火焰拉锥、包层直径为 125  $\mu\text{m}$  的弱耦合 MCF 的光强度截面模式图。图 2(c)是经过氢气火焰均匀扫描拉锥后,从拉锥均匀区切断的强耦合 MCF 光强度截面模式图,可以清楚地看到,拉锥后的 MCF 中间纤芯的能量耦合到周围纤芯,超模实际上是每个 MCF 核<sup>[13-14]</sup>支持的 LP 模式的组合(所用 CCD 显微镜中使用的硅检测器在 1350 nm 以下是灵敏的)。模拟时采用光束传输法(BPM),采用商用软件 Rsoft 2020, $x$  和  $y$  方向的网格精度设置为 0.1  $\mu\text{m}$ , $z$  方向(传输方向)的网格精度设置为 10  $\mu\text{m}$ 。经过收敛性研究,以上精度设置可以得到可信的结果。模拟中,采用 1550 nm 光纤基模作为入射信号,纤芯和包层的折射率分别为 1.459 和 1.444。芯直径和每个芯之间的距离分别设置为 6.1  $\mu\text{m}$  和 29  $\mu\text{m}$ 。均匀锥形区域的长度为 1 mm。图 2(d)为锥型直径为 57  $\mu\text{m}$  时能量由中间纤芯耦合到周围纤芯的仿真,实线为中间芯模式的能量随距离的演化规律,虚线为其中一个周围芯模式能量随距离的演化规律。图 2(e)是七芯超模干涉模场的截面图。Colorbar 数值为电场强度绝对值  $|E|$ (对入射信号进行归一化)。通过仿真结果可以发现,弱耦合七芯光纤经过氢气火焰均匀扫描拉锥后,中间芯的能量有耦合到周围芯,实验结果与仿真结果相吻合。

### 3.2 温度测量

光纤温度传感器测量实验装置如图 3 所示,实验装置包括 SLD、OSA、水温控制箱、固定平台和可移动平台。将多芯光纤温度传感器置于水温控制箱(控制箱温度精度为 0.1  $^{\circ}\text{C}$ )外接的铝板上,光纤

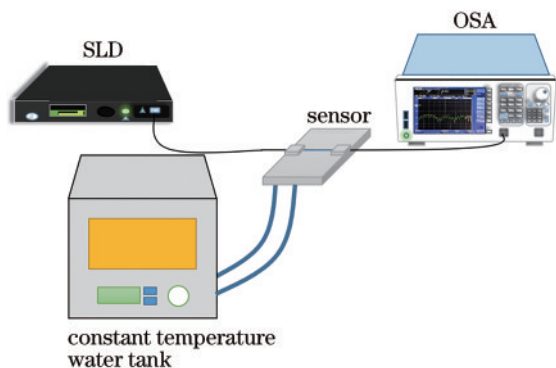


图 3 MCF 温度传感器系统

Fig. 3 MCF temperature sensor system

两端用固定平台的夹具拉紧固定,以 5  $^{\circ}\text{C}$  的温度间隔测量 25~70  $^{\circ}\text{C}$  不同温度下的透射光谱(波长为 1250~1650 nm)。为了保证温度的准确性,当温度达到测量点后保持 15 min,再记录光谱透射数据。

图 4(a)为升温时不同温度下透射光谱响应曲线。对于多芯光纤温度传感器,温度变化改变了多芯光纤第一阶超模和第二阶超模之间的有效折射率差。当升高温度时,多芯光纤第一阶超模和第二阶超模的有效折射率差变小,多芯温度传感器的谐振峰(波谷)发生红移现象,并且不同温度下的传输光谱有着相同形状的包络。根据图 4(b)线性拟合后得到的斜率,计算出在 25~70  $^{\circ}\text{C}$  温度下 dip1 和 dip2 的温度灵敏度分别为 629 pm/ $^{\circ}\text{C}$  和 840 pm/ $^{\circ}\text{C}$ ,线性拟合度  $R^2$  分别达到了 0.99459 和 0.9856,比文献报道的提高了 52.7 倍<sup>[15-22]</sup>,表明谐振峰波长的漂移和温度之间有良好的线性响应。在更长的波长下,谐振衰减变化更快。多芯光纤温度传感器具有高灵敏度,是因为有效折射率差的变化,在激发的超模有效模区较长波长处扩展较为明显。

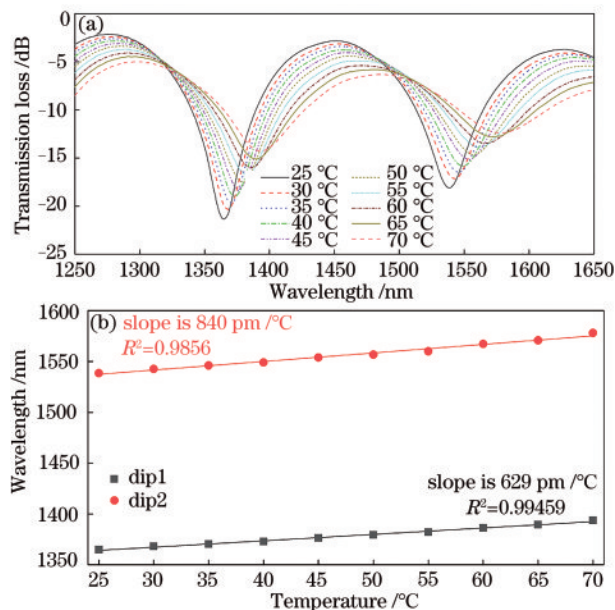


图 4 温度传感特性。(a)不同温度下 MCF 温度传感器的透射光谱;(b)透射光谱波长与温度的关系

Fig. 4 Temperature sensing characteristic. (a) Transmission spectra of MCF temperature sensor at different temperatures; (b) relationship between wavelength of transmission spectrum and temperature

## 4 结 论

多芯光纤温度传感器高折射率掺锗芯的锥形

多芯光纤被用于实现超模干涉,传感器透射谱的谐振中心波长对外界环境温度敏感,因此利用波长调制法实现环境温度的测量。将直径为  $31.36\ \mu\text{m}$  的锥型多芯光纤作为温度传感器,获得最佳的消光比为 19 dB,最佳的温度灵敏度为  $840\ \text{pm}/^\circ\text{C}$  (在  $25\sim 70\ ^\circ\text{C}$  的温度环境下)。多芯光纤的有效折射率差、拉锥直径、拉锥长度都是优化性能的关键因素。激发的超模有效模区在较长波长处的扩展对温度更加敏感。在多芯光纤周围纤芯外部刻蚀不同结构,可制作同时监测多种信号的传感器。

### 参 考 文 献

- [1] Sui W B, Zhang D, Wang M Y, et al. Review on application and theoretical models for temperature monitoring technology under intelligent well completion conditions in oil and gas field development [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(3): 129-138.  
隋微波, 张迪, 王梦雨, 等. 智能完井温度监测技术在油气田开发中的应用及理论模型研究进展 [J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(3): 129-138.
- [2] Zhou Y X, Zhao J K, Liu R, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(9): 2593-2612.  
周远翔, 赵健康, 刘睿, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望 [J]. *高电压技术*, 2014, 40(9): 2593-2612.
- [3] Xu H, Zhu Y K, Lu Y F, et al. Development and biomedical application of Raman probe [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110005.
- [4] García I, Zubia J, Durana G, et al. Optical fiber sensors for aircraft structural health monitoring [J]. *Sensors (Basel)*, 2015, 15(7): 15494-15519.
- [5] Xu F S, Yan G, Zhong G S, et al. Study on FBG sensor for satellite ambient temperature monitoring [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(6): 762-768.  
徐福胜, 闫光, 钟国舜, 等. 卫星环境温度监测的光纤光栅传感器研究 [J]. *激光与红外*, 2018, 48(6): 762-768.
- [6] Huang J L, Mao L H, Chen H D, et al. A MS/RF CMOS-process-compatible photodetector [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(10): 1995-2000.  
黄家乐, 毛陆虹, 陈弘达, 等. MS/RF CMOS 工艺兼容的光电探测器 [J]. *半导体学报*, 2005, 26(10): 1995-2000.
- [7] 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.
- [8] Chen J, Deng L, Niu Y P, et al. Ultranarrow dual-transmission properties of a two-cavity structure based on three asymmetric fiber Bragg gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0806001.
- [9] Xu X N, Chen Y J. Curvature sensing measurement based on seven-core fiber and few-mode fiber splicing structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0306001.  
许西宁, 陈雍君. 基于七芯光纤和少模光纤拼接结构的曲率传感测量 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0306001.
- [10] Sun M, Xu B, Li Y. A strain sensor based on in-line Mach-Zehnder interferometer with thin-core fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(s1): s114006.
- [11] Li C. Research on sensing characteristics and composite parameter measurement of new optical fiber mode interferometer [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.  
李超. 新型光纤模式干涉仪传感特性及复合参数测量的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [12] Zhang L Y, Zhang W G, Chen L, et al. A fiber bending vector sensor based on M-Z interferometer exploiting two hump-shaped tapers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(11): 1240-1243.
- [13] Salceda-Delgado G, van Newkirk A, Antonio-Lopez J E, et al. Compact fiber-optic curvature sensor based on super-mode interference in a seven-core fiber [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1468-1471.
- [14] Villatoro J, Arrizabalaga O, Antonio-Lopez E, et al. Multicore fiber sensors [C] // *Optical Fiber Communication Conference*, March 19-23, 2017, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2017: Th3H.1.
- [15] Harris J, Lu P, Larocque H, et al. Highly sensitive in-fiber interferometric refractometer with temperature and axial strain compensation [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9996-10009.
- [16] Zhao Y, Xia F, Hu H F, et al. A ring-core optical fiber sensor with asymmetric LPG for highly sensitive temperature measurement [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(12): 3378-3386.
- [17] Bae H, Yun D, Liu H J, et al. Hybrid miniature Fabry-Perot sensor with dual optical cavities for

- simultaneous pressure and temperature measurements [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(8): 1585-1593.
- [18] Zhu Z D, Liu L, Liu Z H, et al. Surface-plasmon-resonance-based optical-fiber temperature sensor with high sensitivity and high figure of merit [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(15): 2948-2951.
- [19] Liu G G, Han M, Hou W L. High-resolution and fast-response fiber-optic temperature sensor using silicon Fabry-Pérot cavity [J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7237-7247.
- [20] Tapetado A, Pinzón P J, Zubia J, et al. Polymer optical fiber temperature sensor with dual-wavelength compensation of power fluctuations [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(13): 2716-2723.
- [21] Jiang Y X, Fang Z J, Du Y Q, et al. Highly sensitive temperature sensor using packaged optical microfiber coupler filled with liquids [J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 356-366.
- [22] Weng S J, Pei L, Wang J S, et al. High sensitivity D-shaped hole fiber temperature sensor based on surface plasmon resonance with liquid filling [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(2): 103-107.