

# 基于少模光纤组合传感器的温度及折射率传感特性研究

齐跃峰<sup>1,2</sup>, 贾翠<sup>1\*</sup>, 许丽媛<sup>1</sup>, 张鑫<sup>1</sup>, 丛碧彤<sup>1</sup>, 刘燕燕<sup>1,2</sup>, 刘雪强<sup>1,2</sup>

1. 燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004

2. 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 基于模式干涉理论和布拉格光纤光栅的传感特性, 提出了一种单模-少模光纤布拉格光栅(FBG)-单模结构的组合传感器。利用光纤熔接机将一定长度的少模光纤(FMF)熔接在两段单模光纤(SMF)中间构成SFS结构干涉仪, 再在FMF上刻制FBG, 通过光谱仪得到模式干涉与耦合共同作用后的传输光谱。首先分析了组合传感器的传感原理, 由于外界环境的改变会引起FMF中纤芯模式有效折射率的改变, 从而导致SFS结构的干涉光谱和FBG的波长发生移动, 因此可以通过检测组合传感器传输光谱的波长漂移量, 实现对待测参数的测量。然后仿真了FMF长度对干涉光谱的影响, FMF越长, 干涉光谱越明显, 自由光谱范围FSR越小, 为了便于观测组合传感器的整体光谱, 最终选择长度为110 mm的FMF进行传感实验。实验所用FMF可稳定传输LP<sub>01</sub>, LP<sub>11</sub>, LP<sub>21</sub>和LP<sub>02</sub>四种模式, 通过对比分析不同模式间的干涉和耦合, 确定此组合传感器的干涉光谱是由LP<sub>01</sub>-LP<sub>11</sub>干涉形成, FBG透射谱是由LP<sub>02</sub>-LP<sub>02</sub>, LP<sub>11</sub>-LP<sub>11</sub>, LP<sub>01</sub>-LP<sub>02</sub>和LP<sub>01</sub>-LP<sub>01</sub>耦合形成。最后进行温度和折射率的传感实验, 结果表明, 随着外界温度的升高, SFS结构的干涉光谱发生明显的蓝移, 而FBG透射谱发生红移, 其温度灵敏度分别为-62.04和10.87 pm·°C<sup>-1</sup>, 线性度良好; 将FMF包层直径腐蚀至22 μm, 在1.366~1.455的折射率变化范围内, 组合传感器的传输光谱并未发生明显的移动, 灵敏度最大仅为3.933 nm·RIU<sup>-1</sup>。该传感器利用干涉峰和谐振峰同时监测外界的变化, 提高了检测准确度, 减小测量过程中出现的偶然误差, 结构简单新颖、灵敏度高、易于制备, 且FBG的4个谐振峰具有很强的传感一致性, 使得传感变得更加灵活方便。

**关键词** 光纤光学; 模式干涉; 少模光纤布拉格光栅; 温度; 折射率

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)03-0855-06

## 引言

基于模式干涉的单模-少模-单模(single mode-few mode-single mode, SFS)结构光纤传感器因其结构简单、可靠性强、抗电磁干扰等特性, 被广泛应用于温度、应变、位移等参数测量<sup>[1]</sup>。少模光纤(few mode fiber, FMF)传输的模式数目介于单模光纤(single mode fiber, SMF)和多模光纤之间, 易于实现对传输模式的控制与分析, 具有有效面积大、模式数量有限、模式限制能力强等优点, 在新型传感领域受到越来越多的关注<sup>[2-3]</sup>。布拉格光纤光栅作为一种反射型光纤无源器件, 其反射带宽窄、反射率高, 在通信及传感领域应用广泛。相较于单模光纤布拉格光栅, 少模光纤布拉格光栅

(few mode fiber Bragg grating, FBG)具有更窄的谐振峰带宽, 大大提高了传感器的检测精度, 且其传输光谱中含有多个不同强度的反射峰, 丰富了光纤光栅谐振波长的选择, 使传感变得更加灵活方便。本文将SFS结构与少模光纤布拉格光栅进行结合, 利用少模纤芯中不同模式之间的干涉和耦合进行传感实验, 结构简单新颖、易于制备、成本低廉。

温度作为环境变化的重要参量, 可以直观地监测外界变化, 是食品安全、生物测量、环境监测等领域的重要研究对象<sup>[4-7]</sup>。王洁玉等<sup>[8]</sup>提出一种单模-多模-单模(single mode-multimode-single mode, SMS)结构与单模长周期光纤光栅(single mode long period fiber grating, SMF-LPFG)级联同时测温度和折射率的传感器, SMS结构和SMF-LPFG的温度灵敏度分别为17和60 pm·°C<sup>-1</sup>。童峥嵘等<sup>[9]</sup>提出一种多

收稿日期: 2019-03-07, 修订日期: 2019-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(61735011), 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2018D01A25), 河北省研究生创新资助项目(CXZZBS2018056), 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2017141), 燕山大学青年教师自主研究计划(15LGA008)资助

作者简介: 齐跃峰, 1972年生, 燕山大学信息科学与工程学院教授 e-mail: yfqi@ysu.edu.cn

\* 通讯联系人 e-mail: jia602@qq.com

模-单模-多模 (multimode-single mode-multimode, MSM) 结构与单模光纤布拉格光栅 (single mode fiber Bragg grating, SMF-FBG) 级联的传感器, MSM 结构和 SMF-FBG 的温度灵敏度分别为  $55.2$  和  $15.8 \text{ pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。本文设计的单模-少模光纤布拉格光栅-单模结构的组合传感器对温度的多峰值监测大大提高了其检测准确度, 且 FBG 四个谐振峰具有很好的温度特征一致性, 使得传感器变得更加灵活、方便。

## 1 传感原理

图 1 是单模-少模光纤布拉格光栅-单模结构组合传感器的实验装置图, 传感单元由 SFS 结构干涉仪和 FBG 组成。光从输入端沿 SMF 纤芯向前传播, 在经过第一个 SMF 与 FMF 熔接点时, SMF 中传输的基模耦合进入 FMF, 激发 FMF 中稳定的高阶模式, 当光波继续传输至 FBG 时满足相位匹配条件的模式之间将会发生耦合, 在干涉光谱范围内形成谐振峰, 随着光波的继续传输, 不同模式间会产生光程差, 在到达第二个 SMF 与 FMF 熔接点时, 这些模式会重新耦合进入输出端的 SMF 纤芯中, 发生模间干涉形成马赫-曾德尔干涉光谱, 通过光谱分析仪得到模式干涉与耦合共同作用后的传输光谱。

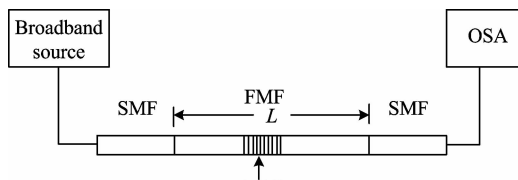


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental device

发生干涉后的  $m$  级干涉光谱对应的特征波长  $\lambda_m$  为

$$\lambda_m = \frac{(n_{\text{eff}}^1 - n_{\text{eff}}^m)L}{m} \quad (1)$$

式中  $n_{\text{eff}}^1$  和  $n_{\text{eff}}^m$  分别为 FMF 纤芯中基模  $\text{LP}_{01}$  和某一高阶模式的有效折射率;  $L$  为 FMF 的长度。光沿 FMF 纤芯向前传播经过栅区时, FMF 中满足相位匹配条件的模式间将会发生耦合形成反射谱。由耦合模理论可知, FBG 的谐振波长  $\lambda_D$  为

$$\lambda_D = (n_{\text{eff}}^1 + n_{\text{eff}}^m)\Lambda \quad (2)$$

式中  $\Lambda$  为 FBG 的周期。当环境发生变化时, FMF 中纤芯模式有效折射率随之改变, 导致干涉光谱和 FBG 的波长发生移动, 通过检测传输光谱的波长漂移量达到传感的目的。由式(1)推出, 环境变化引起的干涉光谱波长漂移量  $\Delta\lambda_m$  为

$$\Delta\lambda_m = \frac{L}{m} (\Delta n_{\text{eff}}^1 - \Delta n_{\text{eff}}^m) \quad (3)$$

式中  $\Delta n_{\text{eff}}^1$  和  $\Delta n_{\text{eff}}^m$  分别为 FMF 纤芯中  $\text{LP}_{01}$  和某一高阶模有效折射率的变化量。

SFS 结构干涉光谱的特征波长  $\lambda_m$  除了与 FMF 纤芯模式的有效折射率有关, 还与 FMF 的长度  $L$  有关, 因此, 仿真了 FMF 长度对干涉光谱的影响如图 2 所示。

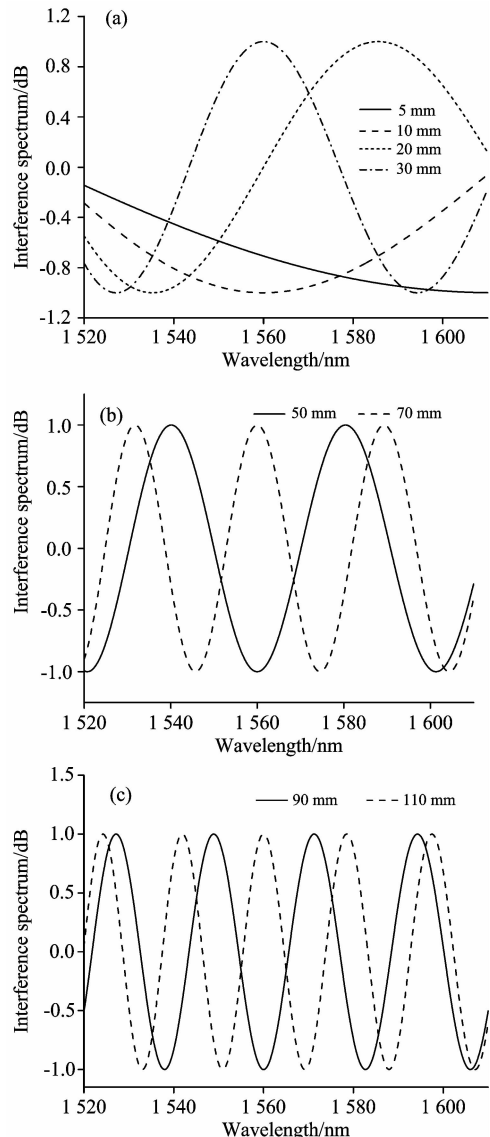


图 2 FMF 长度对干涉光谱的影响

Fig. 2 Effects of the length of FMF on the interference spectrum

由图 2 可以看出, 随着  $L$  的增加, 干涉光谱变得越来越明显, 自由光谱范围 FSR 逐渐减小。由于 FBG 谐振峰带宽较窄, 为了便于观察组合传感器的整体光谱, 干涉光谱的 FSR 不宜过大, 最终选择 110 mm 的 FMF 进行传感实验。

实验所用 FMF 产自长飞光缆有限公司, 可稳定传输  $\text{LP}_{01}$ ,  $\text{LP}_{11}$ ,  $\text{LP}_{21}$  和  $\text{LP}_{02}$  四种模式。由模式干涉理论可知, SFS 结构的干涉光谱是由 FMF 中  $\text{LP}_{01}$  和某一高阶模干涉形成。将  $L$  设置为 110 mm,  $\text{LP}_{01}$  与不同高阶模式之间发生干涉形成的传输光谱如图 3 所示, 通过与图 2 中  $L$  为 110 mm 的干涉光谱进行对比, 可确定此 SFS 结构的干涉光谱是由  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{11}$  干涉形成。

实验利用相位掩模法刻制 FBG, 图 4 为组合传感器的传输光谱, 通过对比分析模式间耦合系数和谐振波长的大小, 可确定此 FBG 的 4 个透射谱从左至右依次为  $\text{LP}_{02}$ - $\text{LP}_{02}$ ,  $\text{LP}_{11}$ - $\text{LP}_{11}$ ,  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{02}$  和  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{01}$  之间耦合形成的。

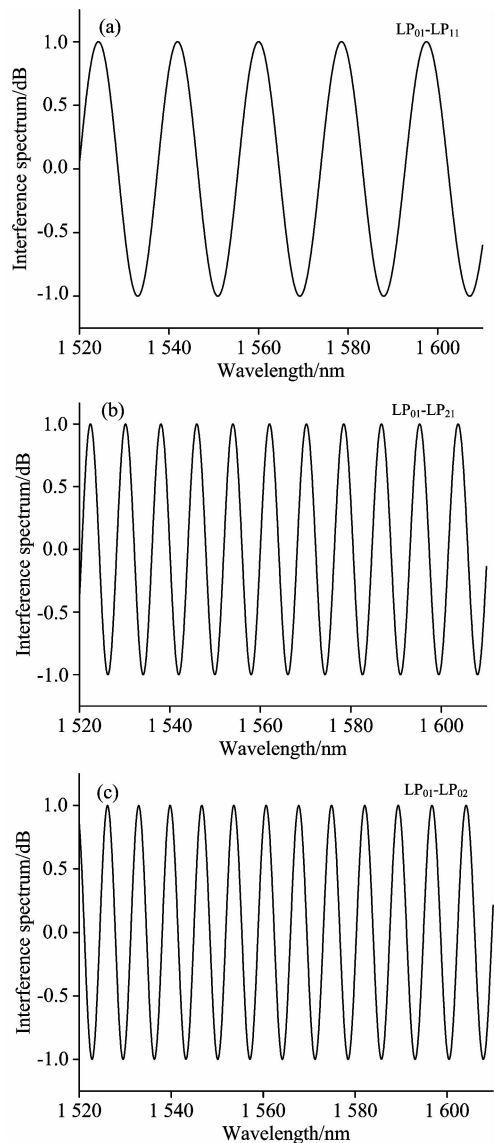


图 3 LP<sub>01</sub>与不同高阶模式之间的干涉光谱  
 Fig. 3 Interference spectra between LP<sub>01</sub> and different higher modes

## 2 实验部分

### 2.1 温度传感实验

传感器主要利用温度变化产生的热光效应影响 FMF 纤芯模式的有效折射率, 导致波长发生移动, 通过检测波长漂移量实现温度传感<sup>[10]</sup>。在 30~80 °C 温度范围内, 实验测得不同温度对应的传输光谱如图 5 所示, 图 5(b)为 FBG 透射谱的局部放大图。可见, 随着温度的升高, SFS 结构干涉光谱的特征波长发生明显的蓝移, 而 FBG 谐振波长发生红移。主要是由于随着温度的升高, FMF 纤芯模式有效折射率随之增加, 且高阶模对温度变化更为敏感, 即  $\Delta n_{\text{eff}}^2$  和  $\Delta n_{\text{eff}}^1$  为正,  $\Delta n_{\text{eff}}^2$  大于  $\Delta n_{\text{eff}}^1$ , 由式(2)、式(3)可知干涉光谱发生蓝移, FBG 透射谱发生红移。

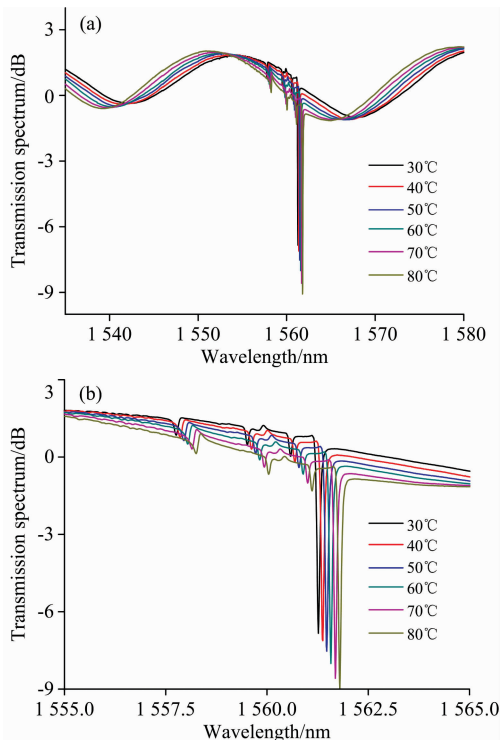


图 5 温度测量

(a): 传输光谱; (b): FBG 透射谱

Fig. 5 Temperature measurement

(a): Transmission spectra; (b): Transmission spectra of FBG



图 4 组合传感器的传输光谱

Fig. 4 Transmission spectrum of the combined sensor

将 1 540 nm 附近的干涉波谷和 FBG 的 4 个谐振峰作为观测点, 得到组合传感器的温度响应特性如图 6 所示, 为了便于表述, 将 FBG 的 4 个谐振峰从左至右依次简记为峰 1, 2, 3 和 4, 计算得出干涉光谱的温度灵敏度为  $-62.04 \text{ pm} \cdot \text{°C}^{-1}$ , FBG 谐振峰 1, 2, 3 和 4 的温度灵敏度分别为 9.81, 10.4, 10.87 和 10.47  $\text{pm} \cdot \text{°C}^{-1}$ 。实验结果线性度良好, 且 FBG 的 4 个峰具有很强的温度传感一致性, 当传感器用作对其他参数测量时, 可通过计算波长差的方法消除温度变化对实验结果的影响。

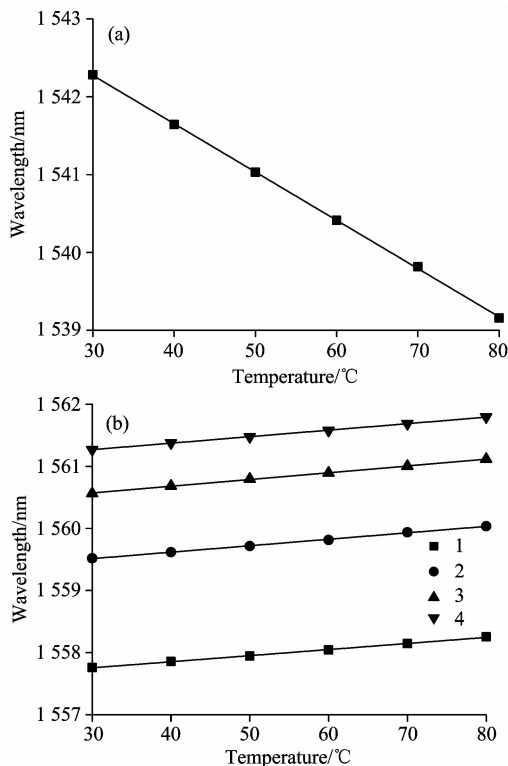


图 6 温度响应特性

(a): 干涉光谱; (b): FBG 透射谱

Fig. 6 Temperature response characteristics

(a): Interference spectrum; (b): Transmission spectrum of FBG

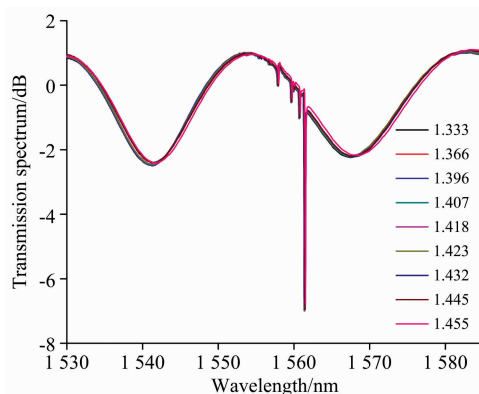


图 8 折射率传感实验的传输光谱

Fig. 8 Transmission spectra of the refractive index sensing experiments

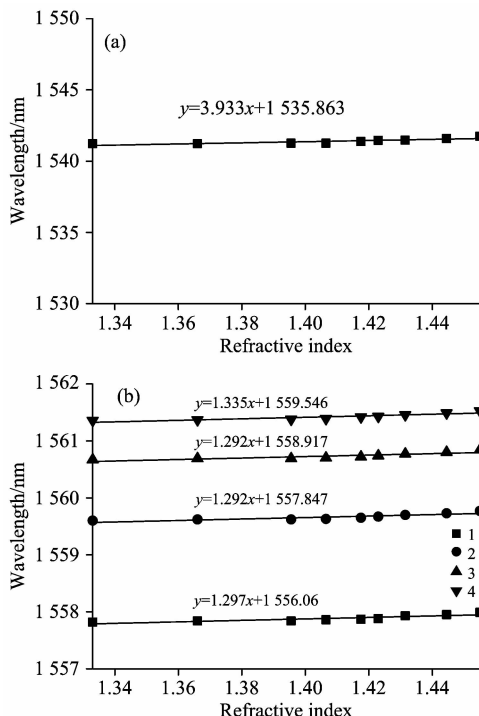


图 9 折射率响应特性

(a): 干涉光谱; (b): FBG 透射谱

Fig. 9 Refractive index response characteristics

(a): Interference spectrum; (b): Transmission spectrum of FBG

### 2.2 折射率传感实验

对于该组合传感器, 由于 FMF 基模和高阶模的能量主要集中在纤芯内, 因此传感器对外界折射率的改变并不敏感。由倏逝波理论可知, 减小光纤包层的厚度, 可以增加传输模式电磁场与外界折射率的相互作用<sup>[11]</sup>。本实验采用 HF 腐蚀法减小包层厚度, FMF 包层直径腐蚀至 22 μm 的传感单元显微图像如图 7 所示。



图 7 腐蚀后的传感单元显微图像

Fig. 7 Microscopic image of the sensing unit after corrosion

在室温状态下, 将蒸馏水和不同浓度的甘油溶液覆盖于传感区, 得到不同折射率溶液对应的传输光谱如图 8 所示, 同样将 1540nm 附近的波谷和 FBG 的四个谐振峰作为观测点, 得到传感器的折射率响应特性如图 9 所示。可见在将 FMF 包层腐蚀的前提下, 随着外界折射率的增加, 组合传感器的传输光谱并未发生明显的移动, 灵敏度最大仅为 3.933 nm · RIU<sup>-1</sup>。

### 3 结论

提出了一种单模-少模光纤布拉格光栅-单模结构的组合式传感器, 对其温度及折射率传感特性进行了研究。通过分析其传输光谱, 确定该组合传感器的干涉光谱是由 LP<sub>01</sub>-LP<sub>11</sub>干涉形成, FBG 透射谱是由 LP<sub>02</sub>-LP<sub>02</sub>, LP<sub>11</sub>-LP<sub>11</sub>, LP<sub>01</sub>-LP<sub>02</sub> 和 LP<sub>01</sub>-LP<sub>01</sub>耦合形成。实验结果表明, 随着温度的升高, SFS 结构的干涉光谱向短波方向发生明显移动, FBG 透射谱向长波方向发生移动, SFS 结构和 FBG 的温度灵敏度分别为 -62.04 和 10.87 pm · °C<sup>-1</sup>, 线性度良好。在

对 FMF 包层进行腐蚀的前提下,随着折射率的增加,传输光谱并未发生明显的移动,最大灵敏度仅为  $3.933 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。该传感器实现了对外界变化进行多峰监测,提高了

传感器的准确度,减小实验过程中出现的偶然误差,且 FBG 四个谐振峰具有很强的传感一致性,使传感变得更加灵活方便,实际应用和发展前景良好。

## References

- [ 1 ] LIU Qiang, BI Wei-hong, WANG Si-wen, et al(刘 强, 毕卫红, 王思文, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2018, 38(2): 0206001.
- [ 2 ] XIE Yi-wei, FU Song-nian, ZHANG Min-ming, et al(谢意维, 付松年, 张敏明, 等). Study on Optical Communications(光通信研究), 2013, 39(3): 1.
- [ 3 ] FU Xing-hu, ZHANG Shun-yang, LIU Qiang, et al(付兴虎, 张顺杨, 刘 强, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(11): 3726.
- [ 4 ] Gouveia C, Jorge P A S, Baptista J M, et al. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1): 17.
- [ 5 ] Zhang Y C, Zhang H M, Yao M Y. Chinese Optics Letters, 2012, 10(3): 030606.
- [ 6 ] TANG Chun-xiao, LI En-bang, WANG Chang-le, et al(唐春晓, 李恩邦, 王长乐, 等). Journal of Optoelectronics Laser(光电子·激光), 2011, (8): 1138.
- [ 7 ] SUN Hao, HU Man-li, QIAO Xue-guang, et al(孙 浩, 忽满利, 乔学光, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2012, 39(2): 0205001.
- [ 8 ] WANG Jie-yu, TONG Zheng-rong, YANG Xiu-feng, et al(王洁玉, 童峥嵘, 杨秀峰, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2012, 39(9): 0905003.
- [ 9 ] TONG Zheng-rong, GUO Yang, YANG Xiu-feng, et al(童峥嵘, 郭 阳, 杨秀峰, 等). Optics & Precision Engineering(光学精密工程), 2012, 20(5): 921.
- [10] LIU Ming-sheng, LIANG Li-li, LI Yan, et al(刘明生, 梁丽丽, 李 燕, 等). Laser & Optoelectronics Progress(激光与电子学进展), 2014, 51(1): 010501.
- [11] CHEN Shao-hua, HAO He, LENG Wen-xiu, et al(陈少华, 郝 赫, 冷文秀, 等). Physics and Engineering(物理与工程), 2018, 28(1): 66.

## Temperature and Refractive Index Sensing Properties Based on Combined Sensor for Few Mode Fiber

QI Yue-feng<sup>1, 2</sup>, JIA Cui<sup>1\*</sup>, XU Li-yuan<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, CONG Bi-tong<sup>1</sup>, LIU Yan-yan<sup>1, 2</sup>, LIU Xue-qiang<sup>1, 2</sup>

1. College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

2. The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, China

**Abstract** Based on the theory of mode interference and the sensing characteristics of fiber Bragg grating, a combined sensor composed of a single mode fiber (SMF)-few mode fiber Bragg grating (FBG)-SMF structure is proposed. The SFS structure interferometer is constructed by fusing a certain length of few mode fiber (FMF) between two SMFs with a fiber fusion splicer, and then FBG is etched on FMF. The transmission spectrum is obtained by the optical spectrum analyzer after the interaction of mode interference and coupling. Firstly, the sensing principle is analyzed. Since the change of environment will cause the effective refractive index change of the core mode in FMF, which will cause the wavelength shift of interference spectrum and FBG, the measured parameters can be realized by detecting the wavelength shift of transmission spectrum. Then the effects of FMF length on interference spectrum are simulated. The longer FMF is, the more obvious the interference spectrum is and the smaller the free spectrum range is. In order to observe the transmission spectrum of the combined sensor, the length of FMF is chosen as 110 mm for sensing experiment. FMF can stably transmit four modes with  $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$  and  $LP_{02}$ . By comparing and analyzing the interference and coupling between different modes, it is determined that the interference spectrum is formed by  $LP_{01}$ - $LP_{11}$ , and the transmission spectrum of FBG is formed by  $LP_{02}$ - $LP_{02}$ ,  $LP_{11}$ - $LP_{11}$ ,  $LP_{01}$ - $LP_{02}$  and  $LP_{01}$ - $LP_{01}$ . Finally, the temperature and refractive index sensing experiments are carried out. The results show that the interference spectrum of SFS structure appears obvious blue shift and the transmission spectrum of FBG appears red shift with the increase of temperature. Their temperature response sensitivities are  $-62.04$  and  $10.87 \text{ pm} \cdot \text{}^\circ\text{C}^{-1}$  respectively with good linearity. When the cladding of FMF is corroded to  $22 \mu\text{m}$ , there is no obvious shift phenomenon in the transmission spectrum within the range of  $1.366 \sim 1.455$  and the maximum sensitivity is only  $3.933 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ . The interference peak and transmission peak are used to monitor the en-

vironment changes at the same time, which improves the detection accuracy and reduces the accidental errors. The structure has the advantages of novel structure, high sensitivity, easy preparation, and the four resonance peaks of FBG have strong sensing consistency, which makes the sensing more flexible and convenient.

**Keywords** Fiber optics; Mode interference; Few mode fiber Bragg grating; Temperature; Refractive index

(Received Mar. 7, 2019; accepted Jun. 18, 2019)

\* Corresponding author