

# 基于纤芯失配多模干涉的光纤折射率传感器

孙 浩 忽满利 乔学光 荣强周 向光华 梁 磊 徐琴芳

(西北大学物理学系, 陕西 西安 710069)

**摘要** 基于多模干涉效应的单模-多模-单模(SMS)结构光纤折射率传感器通常需要进行包层腐蚀来提高灵敏度, 而且易受环境温度影响。为克服 SMS 结构的这些不足, 提出了一种新型的基于纤芯失配多模干涉的光纤折射率传感器, 由单模光纤-色散补偿光纤-单模光纤(SMF-DCF-SMF)级联光纤布拉格光栅(FBG)构成, 长度不超过 100 mm。对其灵敏度、线性范围和温度特性等进行了测试, 实验结果显示在测量折射率为 1.33~1.39 的折射率液时, 特征波长与折射率呈线性关系, 灵敏度为 232.8 nm, 级联的 FBG 具有良好的温度校准功能。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 折射率传感器; 色散补偿光纤

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0205001

## Fiber Refractive Index Sensor Based on Fiber Core Mismatch Multimode Interference

Sun Hao Hu Manli Qiao Xueguang Rong Qiangzhou Xiang Guanghua  
Liang Lei Xu Qinfang

(Department of Physics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

**Abstract** The refractive index sensor with single mode-multimode-single (SMS) mode structure based on multimode interference effect usually needs cladding corrosion to improve the sensitivity, and it is vulnerable to the influence of temperature. To solve these problems, a novel fiber refractometer based on fiber core diameter mismatch multimode interference is proposed. The refractometer structured of single-mode fiber/dispersion compensation fiber/single-mode fiber (SMF-DCF-SMF) and a fiber Bragg grating (FBG) has a total length less than 100 mm. The experiment results show that the sensitivity of the sensor in measuring liquid with a refractive index of 1.33~1.39 is 232.8 nm, and the FBG has a good function of temperature calibration.

**Key words** fiber optics; fiber sensor; refractive index sensor; dispersion compensation fiber

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 060.2430

## 1 引 言

光纤折射率传感器在生物和化学领域有着广泛的应用前景。相比于其他类型的折射率传感器, 光纤折射率传感器有体积小、成本低、灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀和可用于恶劣环境等优点。最近已经报道了诸多全光纤结构的折射率计, 如基于光纤布拉格光栅(FBG)<sup>[1]</sup>、长周期光纤光栅(LPG)<sup>[2]</sup>、表面等离子体共振(SPR)<sup>[3]</sup>、法布里-珀罗干涉仪<sup>[4]</sup>、

光环共振器<sup>[5]</sup>和光子晶体光纤(PCF)<sup>[6]</sup>的折射率计, 但是这些结构的传感器都存在诸如在测量折射率为 1.3~1.4 的液体时灵敏度不高, 或者结构复杂, 成本过高, 不利于大规模应用的缺点。而基于多模干涉效应的单模-多模-单模(SMS)结构光纤折射率传感器由于采用波长调制, 其传感信息不会受到光波强度变化的影响, 抗电磁干扰能力强, 而且结构简单、成本低廉, 近年来得到了广泛的研究<sup>[7~10]</sup>。

**收稿日期:** 2011-09-23; **收到修改稿日期:** 2011-10-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(61077006)、西北大学教学改革项目(07YKC22)和西北大学研究生自主创新项目(09YSY11)资助课题。

**作者简介:** 孙 浩(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: sunhao5526@126.com

**导师简介:** 忽满利(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信息光学、光电检测和非线性光学等方面的研究。

E-mail: huml@nwu.edu.cn(通信联系人)

但是这种传感器易受环境温度影响,且由于其采用的多模光纤(MMF)包层中的导模能量较弱,纤内光场与外界环境信息交换少,传感器的灵敏度较低,需要用化学腐蚀的方法降低包层厚度,增加纤内光场与外界环境的信息交换,以提高 MMF 感受外界折射率变化的灵敏度。但是腐蚀会增大光纤表面粗糙度并降低光纤机械强度,不利于实际应用。

为解决普通 SMS 结构传感器必须进行包层腐蚀来提高灵敏度以及易受环境温度影响等问题,本文提出了一种基于色散补偿光纤(DCF)的纤芯失配型光纤折射率传感器,由简单的单模光纤-色散补偿光纤-单模光纤(SMF-DCF-SMF)级联 FBG 构成。在 1.33~1.39 折射率范围内有很好的线性度和较高的灵敏度,级联的对折射率不敏感的 FBG 可用于温度校准,测量时有效地避免环境温度变化的影响。

## 2 传感器的设计与原理

SMF-DCF-SMF 传感器结构如图 1(a)所示,将一小段 DCF 夹熔在两段 SMF 之间,使用 500 倍光

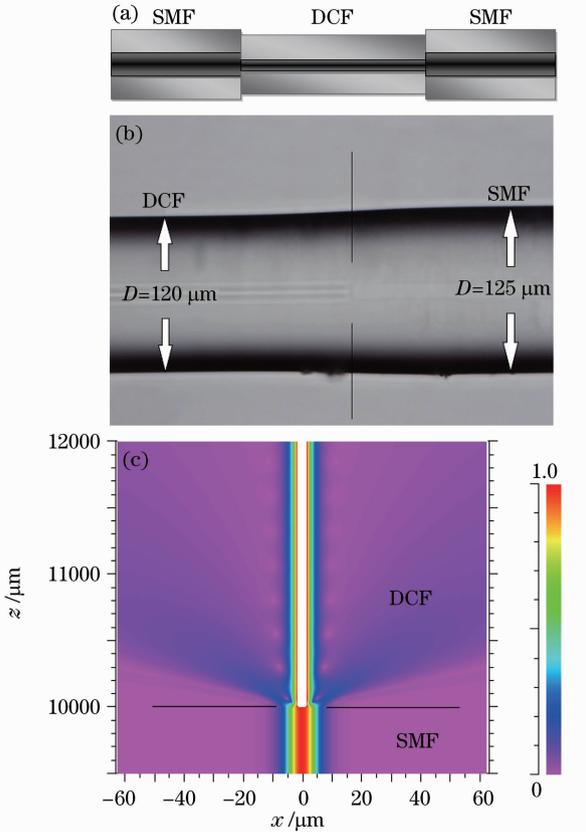


图 1 (a) SMF-DCF-SMF 传感器结构图;(b) DCF 与 SMF 连接处显微镜照片;(c) DCF 中的高阶模

Fig. 1 (a) Schematic configuration of the SMF-DCF-SMF sensor; (b) microscope image of the joint of SMF and DCF; (c) high-order mode in DCF

学显微镜拍摄的 DCF 与 SMF 熔接处照片如图 1(b)所示。DCF 为阶跃折射率光纤,其纤芯折射率略大于普通 SMF,包层直径和纤芯直径较小,具体参数如表 1 所示。

表 1 SMF 和 DCF 的参数

Table 1 Parameters of SMF and DCF

	Core diameter / $\mu\text{m}$	Core index of refraction	Cladding diameter / $\mu\text{m}$	Cladding index of refraction
SMF	9	1.4502	125	1.4450
DCF	5	1.4641	120	1.4584

由于采用的 DCF 的截止波长为 1663 nm,所以在波长小于 1663 nm 时可以将 DCF 看做是细芯的 MMF,其多模干涉原理与采用普通 MMF 的 SMS 结构相同。SMF 中的基模  $LP_{01}$  耦合进 DCF 时输入场可以分解为 DCF 的本征模  $LP_{mn}$ 。假设 SMF 与 DCF 之间没有轴向位移,由于光纤结构是旋转对称结构,只有线偏振高阶本征模  $LP_{0m}$  可以被激发<sup>[11,12]</sup>,如图 1(c)所示。激发出的高阶包层模和纤芯模在 DCF 中传播时会发生相长干涉或相消干涉,透射谱会形成局部的极大或极小,其极值处对应的波长就称为特征波长或谐振波长。

根据光的干涉理论,当两个不同的高阶模  $LP_{0m}$  和  $LP_{0n}$  之间的相位差  $\Delta\Phi^{m,n}$  为  $2\pi$  的整数倍时发生干涉,即相干条件为

$$\Delta\Phi^{m,n} = 2\pi\Delta n_{\text{eff}}^{m,n} \frac{L}{\lambda_D} = 2\pi N, \quad (1)$$

其中  $\Delta n_{\text{eff}}^{m,n}$  是  $LP_{0m}$  和  $LP_{0n}$  模的等效折射率差,  $L$  是 DCF 的长度,  $\lambda_D$  为特征波长,  $N$  为整数。由(1)式可知,特征波长与 DCF 的长度成正比,DCF 越长,特征波长越大。对于去掉涂覆层的 DCF,等效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}^{m,n}$  随环境折射率增大而增大,因此特征波长会随着环境折射率的增大向长波长方向漂移<sup>[8]</sup>,通过解调特征波长的漂移量即可获得环境折射率的传感信息,环境折射率每变化一个折射率单位时特征波长的漂移量就是传感器的灵敏度。(1)式中两个相邻的干涉极小值之间的波长间隔为

$$\Delta\lambda_D \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}}^{m,n} L}, \quad (2)$$

其中  $\lambda$  为自由空间光波长。由(2)式可见,两个干涉极值之间的波长间隔随 DCF 长度的增大而减小,DCF 越长在测量范围内可观测到的干涉峰就越多。

## 3 实验与分析

使用 Fujikura DT-30 切割刀和 Fujikura FMS-

60 电弧熔接机制作如图 1 所示的折射率计, DCF 的长度分别为 20, 50, 70, 100 mm。光从宽带光源发出, 经过传感器后进入一台分辨率为 0.05 pm 的光纤光谱仪, 通过光谱仪解调透射光谱的变化。实验在室温下进行, 为避免外界应力干扰, 将传感器固定在防震金属平台上, 使光纤处于拉直状态, 保持恒定的拉力不变, 然后将传感器分别浸没在具有不同折射率的甘油水溶液中, 通过光谱仪观察透射光谱的变化。所测甘油水溶液折射率范围为 1.335 ~ 1.384, 每次测量之前需用阿贝折射率计校准溶液的折射率, 测量之后用无水乙醇清洗传感头。为减小误差, 每组数据均测量 5 次取平均值。

DCF 长度为 20 mm 时, 传感器的透射谱随折射率的变化如图 2 所示, 在波长范围 1500 ~ 1620 nm 内可以观测到一个位于 1520 nm 处的明显的干涉极小值  $D_p$ , 且  $D_p$  随外界溶液折射率的增大向长波长方向漂移。同样在实验中当 DCF 长度为 50 mm 和 70 mm 时也可以观测到一个明显的干涉极小值。而当 DCF 长度为 100 mm 时出现了两个干涉极小值, 分别位于 1560 nm 和 1590 nm 处, 这与理论分析中两个干涉极值之间的波长间隔随 DCF 长度的增大而减小的结果相符合。由更高阶模式干涉形成的位于 1560 nm 处的干涉极值对折射率变化的响应更灵敏, 与文献[8]中的结论“形成多模干涉峰的模式阶越高折射率传感越灵敏”相一致。因此选择 1560 nm 的特征波长用作折射率传感, 当 DCF 长度分别为 20, 50, 70, 100 mm 时, 传感器特征波长随外界折射率的变化关系如图 3 所示, 对折射率的灵敏度分别为 94.4, 179.6, 251.3, 258.9 nm。对比可以看出随着 DCF 长度的增加, 传感器的分辨率逐渐提高。但是在 100 mm 时灵敏度比 70 mm 时提高得十分有限。因此长度为 70 mm 的 DCF 更适合实际应用,

则整个传感器长度不超过 10 cm, 体积小、结构紧凑, 在折射率为 1.33 ~ 1.39 范围内有较高的灵敏度 (251.3 nm)。

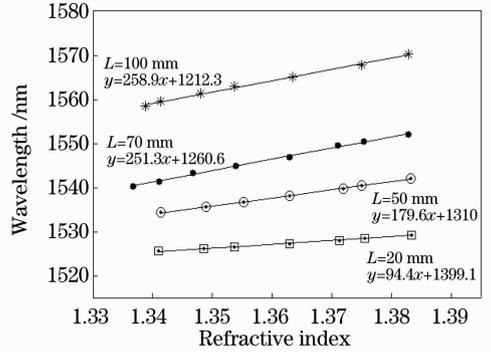


图 3 DCF 长度分别为 20, 50, 70, 100 mm 时特征波长随外界折射率的变化

Fig. 3 Resonance wavelength versus the surrounding refractive index with the length of DCF being 20, 50, 70 and 100 mm, respectively

当外界环境的温度发生改变时, 光纤的长度、半径、折射率等参数都会发生相应的改变, 影响 DCF 中各高阶模式的干涉, 导致干涉峰漂移<sup>[13~15]</sup>, 这会严重影响折射率传感信息的精确度。为了测量环境温度的变化对折射率传感器性能的影响并进行温度校准, 对图 1 中的传感器结构进行了改进, 在传感器一端级联一根对折射率不敏感的 FBG, 如图 4 所示, 通过 FBG 对折射率传感器进行温度校准。改进型传感器由 DCF 长度为 70 mm 的 SMF-DCF-SMF 级联一根 10 mm 长的 FBG 组成, FBG 的中心波长为 1541 nm。在室温下, 其透射谱随折射率的变化关系如图 5 所示, 可见当温度不变时 FBG 的中心波长并不随环境折射率的改变而发生漂移, FBG 可用于折射率传感器的温度校准。而干涉峰随环境折射率的增大向长波长方向漂移, 其漂移量随折射率的变化关系如图 6 所示, 相比于图 1 中 DCF 长度同为 70 mm 的 SMF-DCF-SMF 结构传感器, 级联了 FBG 的传感器对折射率的灵敏度变为 232.8 nm, 这是由于两次实验过程中环境条件的细微不同造成的。



图 4 SMF-DCF-SMF 级联 FBG 传感器结构图  
Fig. 4 Schematic of the SMF-DCF-SMF combined with FBG sensor

当环境(空气)折射率不变时, 改进型传感器的透射谱随温度的变化关系如图 7 所示, FBG 中心波

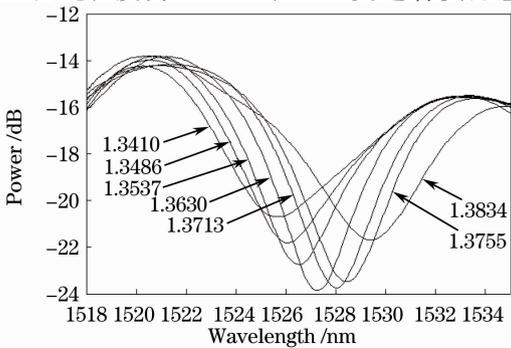


图 2 DCF 长度为 20 mm 时透射谱随外界折射率的变化  
Fig. 2 Transmission spectra versus the surrounding refractive index with the DCF length of 20 mm

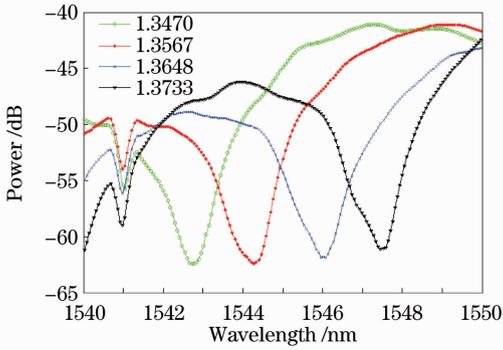


图 5 SMF-DCF-SMF 级联 FBG 传感器透射谱随环境折射率的变化

Fig. 5 Transmission spectra of SMF-DCF-SMF combined with FBG versus the surrounding refractive index

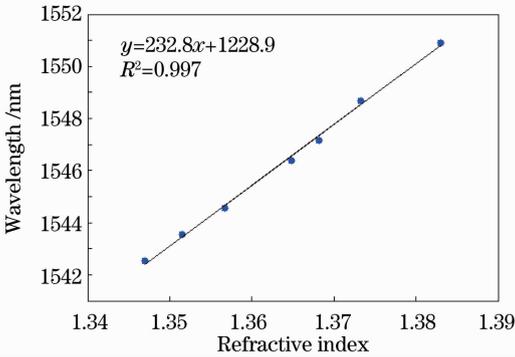


图 6 改进型 SMF-DCF-SMF 级联 FBG 传感器特征波长随外界折射率的变化

Fig. 6 Resonance wavelength of SMF-DCF-SMF combined with FBG sensor versus the surrounding refractive index

长 (1541 nm) 与干涉峰都随温度的增加向长波长方

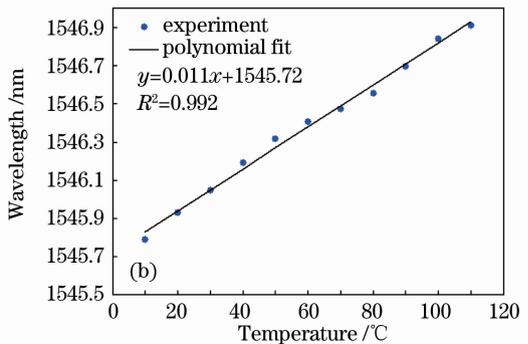
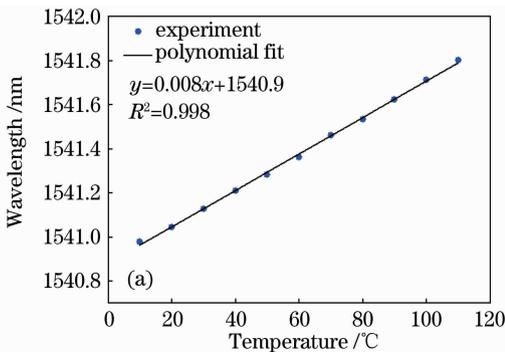


图 8 (a) FBG 中心波长随环境温度的变化; (b) SMF-DCF-SMF 特征波长随环境温度的变化

Fig. 8 (a) Center wavelength of FBG versus the surrounding temperature; (b) resonance wavelength of SMF-DCF-SMF versus the surrounding temperature

## 4 结 论

设计制作了一种基于纤芯失配多模干涉的折射率传感器, 采用了 SMF-DCF-SMF 级联 FBG 的结构, 传感器的长度不超过 100 mm, 体积小、结构简

单、抗干扰能力强, 具有良好的温度自校准功能, 在测量折射率范围为 1.33~1.39 的液体时灵敏度为 232.8 nm。实验结果显示 SMF-DCF-SMF 传感头对温度的灵敏度为 11 pm/°C, 对比传感头测折射率的灵敏度 232.8 nm, 可见单纯的 SMF-DCF-SMF 结构折射率传感器受温度变化的影响较大。而级联的 FBG 对温度的灵敏度为 8 pm/°C, 对折射率不敏感, 这样就可以通过测量 FBG 中心波长处峰值的漂移量来实现折射率传感器的温度校准, 有效地避免折射率的测量受外界环境温度变化的影响。至于传感头受到的机械应力和自身的形变带来的误差可以通过良好的封装来解决。这种 SMF-DCF-SMF 级联 FBG 结构的折射率传感器采用波长解调, 具有温度自校准功能, 抗干扰能力强, 在生物和化学领域具有较高的实用价值。

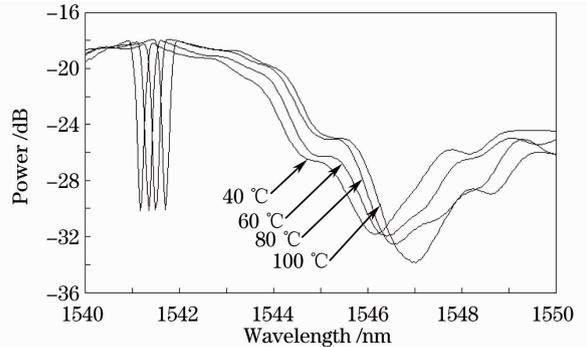


图 7 SMF-DCF-SMF 级联 FBG 传感器透射谱随环境温度的变化

Fig. 7 Transmission spectra of SMF-DCF-SMF combined with FBG versus the surrounding temperature

单、抗干扰能力强, 具有良好的温度自校准功能, 在测量折射率范围为 1.33~1.39 的液体时灵敏度为 232.8 nm。实验结果表明, 传感器中用于温度校准的 FBG 对温度的灵敏度为 8 pm/°C, 这在实用化系

统中就需要波长解调具有较高的分辨率。在进一步的研究工作中,可以采用对温度更加灵敏的结构代替 FBG。

### 参 考 文 献

- 1 X. Fang, C. R. Liao, D. N. Wang. Femtosecond laser fabricated fiber Bragg grating in microfiber for refractive index sensing[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(7): 1007~1009
- 2 Y. Fan, T. Zhu, L. Shi *et al.*. Highly sensitive refractive index sensor based on two cascaded special long-period fiber gratings with rotary refractive index modulation[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(23): 4604~4610
- 3 P. Bhatia, B. D. Gupta. Surface-plasmon-resonance-based fiber-optic refractive index sensor; sensitivity enhancement[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(14): 2032~2036
- 4 T. Wei, Y. Han, Y. Li *et al.*. Temperature-insensitive miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer for highly sensitive refractive index measurement[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(8): 5764~5769
- 5 I. M. White, H. Oveys, X. Fan. Liquid-core optical ring-resonator sensors[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1319~1321
- 6 Deng Ming, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. Refractive-index sensor based on photonic crystal fiber Fabry-Pérot interferometer with self temperature compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1790~1795  
邓明, 饶云江, 朱涛等. 基于光子晶体光纤法布里-珀罗干涉仪的温度自补偿折射率计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1790~1795
- 7 Q. Wang, G. Farrell. All-fiber multimode-interference-based refractometer sensor: proposal and design[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(3): 317~319
- 8 Zhao Yu, Jin Yongxing, Dong Xinyong *et al.*. Experimental studies of multimode interference based fiber optic refractive index sensors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1516~1519  
赵宇, 金永兴, 董新永等. 基于多模干涉的光纤折射率传感器的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1516~1519
- 9 Yang Jianchun, Xu Longjun, Zhang Peng *et al.*. Sensing characteristic of optical fiber refractive index sensor based on core diameter mismatch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1183~1187  
杨建春, 徐龙君, 章鹏等. 纤芯失配型光纤传感器折射率敏感性[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1183~1187
- 10 P. Wang, G. Brambilla, M. Ding *et al.*. High-sensitivity, evanescent field refractometric sensor based on a tapered, multimode fiber interference[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(12): 2233~2235
- 11 E. Li. Sensitivity-enhanced fiber-optic strain sensor based on interference of higher order modes in circular fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(16): 1266~1268
- 12 Li Enbang, Zheng Danying, Zhang Chenliang *et al.*. A refractive index sensor based on the multimode interference in a hollow fiber[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(10): 1439~1444  
李恩邦, 郑丹莹, 张晨亮等. 基于空心光纤多模干涉的折射率传感器研究[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(10): 1439~1444
- 13 Zhang Yan, Zhang Jianzhong, Liu Zhihai *et al.*. Multimode fiber based temperature sensor with the capability of wavelength encoding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 327~330  
张滢, 张建中, 刘志海等. 具有波长标定功能的多模光纤温度传感器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 327~330
- 14 L. V. Nguyen, D. Hwang, S. Moon *et al.*. High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(19): 11369~11375
- 15 E. Li, X. Wang, C. Zhang. Fiber-optic temperature sensor based on interference of selective higher-order modes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(9): 091119

栏目编辑: 谢婧