

基于纤芯失配和光纤布拉格光栅实现温度和应变同时测量

童峥嵘 王洁玉* 杨秀峰 曹 晔

(天津理工大学薄膜电子与通信器件重点实验室及智能计算及软件新技术重点实验室, 天津 300384)

摘要 基于纤芯失配理论,提出了一种多模-单模-多模(MSM)结构与光纤布拉格光栅(FBG)级联实现温度和应变同时测量的光纤传感器。利用 MSM 结构的干涉谱和 FBG 对温度和应变的不同响应灵敏度,实现了对温度、应变的同时测量。实验结果表明,在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,MSM 结构的干涉谱和 FBG 的温度灵敏度分别为 $0.091\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $0.0102\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$;在 $0\sim 650\text{ }\mu\epsilon$ 的应变范围内,应变灵敏度分别为 $-0.0013\text{ nm}/\mu\epsilon$ 和 $0.0012\text{ nm}/\mu\epsilon$ 。因此利用敏感矩阵,即可实现对温度和应变的同时测量,且温度和应变的最大测量误差分别为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 8.25\text{ }\mu\epsilon$ 。该结构灵敏度高,结构简单,且不易受电磁等干扰,实验结果具有良好的线性度,在工程领域应用前景良好。

关键词 光纤光学;纤芯失配;同时测量;光纤布拉格光栅;温度;应变

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1206001

Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Based on Core Diameter Mismatch and Fiber Bragg Grating

Tong Zhengrong Wang Jieyu Yang Xiufeng Cao Ye

(Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices and Key Laboratory of Intelligent Computing and Novel Software Technology, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract Based on the theory of core diameter mismatch, a kind of fiber-optic sensor composed of a multimode fiber-single mode fiber-multimode fiber (MSM) structure and a fiber Bragg grating (FBG) is proposed for simultaneous measurement of temperature and strain. Due to their different response sensitivities to temperature and strain, the temperature and strain are measured simultaneously. The experimental results show that the temperature sensitivities of the MSM structure and FBG are $0.091\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ and $0.0102\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ within the range of $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. The strain sensitivities are $-0.0013\text{ nm}/\mu\epsilon$ and $0.0012\text{ nm}/\mu\epsilon$ within the range of $0\sim 650\text{ }\mu\epsilon$, respectively. Using the sensitive matrix, simultaneous measurement of temperature and strain is realized. The maximum measurement errors of temperature and strain are $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\pm 8.25\text{ }\mu\epsilon$, respectively. With high sensitivity, simple structure, immunity to electromagnetic interferences and a good linearity of the experimental results, the structure has an excellent application prospect in engineering field.

Key words fiber optics; core diameter mismatch; simultaneous measurement; fiber Bragg grating; temperature; strain

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 050.2770; 120.3180

1 引 言

近年来,将干涉传感理论与光纤光栅相结合而形成的光纤传感器引起了广大学者的研究^[1~4]。这

种传感器因其体积小、结构简单、成本低、灵敏度高、抗腐蚀和抗电磁干扰等众多优点被广泛应用于机械、医学、生物化学和环境监测等领域,且因其不同

收稿日期: 2012-05-14; 收到修改稿日期: 2012-07-20

基金项目: 天津市自然科学基金(11JCYBJC00100)资助课题。

作者简介: 童峥嵘(1971—),女,教授,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: zhrong@sohu.com

* 通信联系人。E-mail: wangjieyu1111@sina.com

的结构对温度、应变等参量的敏感程度不同,进而为多参量的测量提供了科学依据。

温度和应变作为机械、建筑和安全监测等领域的重要监测参量,对其进行同时测量的研究引起广大学者的关注。目前已经提出了多种将温度和应变同时测量的方法,比如利用一根倾斜光栅的不同透射峰对温度和应变的灵敏度不同,用敏感矩阵实现同时测量^[5];利用两根不同类型的光纤布拉格光栅(FBG)级联或同一段光纤上先后写入长周期光纤光栅和短周期 FBG,实现温度和应变的同时测量^[6, 7];对 FBG 进行不均匀封装使其产生双峰,利用双峰对温度和应变的不同敏感系数,实现双参量同时测量等^[8]。这些方法结构简单,但是灵敏度不高。Shi 等^[9]利用高双折射环形镜和一段掺铒光纤,由于温度和应变对干涉峰的波长及功率的灵敏度不同实现双参量同时测量,但是由于结构复杂,实验条件不容易控制,不利于批量生产。

本文利用纤芯失配原理^[10~12]在两段多模光纤(MMF)中插入一段单模光纤(SMF),形成多模-单模-多模(MSM)结构,利用 SMF 中的纤芯模和包层模干涉,使温度和应变更直接地作用于 SMF 内部的光场,提高了灵敏度。级联一个 FBG 后,由于 MSM 结构和 FBG 对温度和应变的不同敏感特性,可以利用敏感矩阵实现对温度、应变的同时测量。该传感器结构简单,可操作性强,具有光纤传感器的众多优点,在安全监测等领域有广泛的应用前景。

2 实验装置及其传感原理

图 1 是 MSM 结构与 FBG 级联的传感器实验装置图,其中起连接作用的光纤均为 SMF,型号与 MSM 结构中的 SMF 相同。宽带光源输出的光经过一段 SMF 跳线后,借助一段 MMF 引入长度为 L 的 SMF,再通过一段 MMF 将光引出,进入 FBG,最后通过光谱分析仪(OA)得到纤芯失配后干涉谱与 FBG 共同作用后的光谱图。其中 MSM 和 FBG 作为传感区,共同监测温度、应变的变化。其基本原理主要是基于耦合模在中间段 SMF 中形成的模场干涉。宽带光源的光进入入射端 MMF 后,激励起 MMF 中的基模和各高阶导模,引起光场的重新分布,继而耦合进 SMF 的包层。由于纤芯失配,激励起 SMF 中的纤芯模和各阶包层模。在各阶包层模中总有一个包层模处于主导地位。由于包层模与纤芯模的有效折射率存在差异,在传输距离 L 后,两种模式间就产生了相位差,使得包层模与纤芯模在

SMF 中发生干涉^[13]。干涉光耦合进出射端 MMF 进行传输,经过 FBG 后,满足 FBG 中心波长的光被反射,所以通过 OSA 可以观察到干涉波谷与 FBG 的光谱随温度、应变的变化。

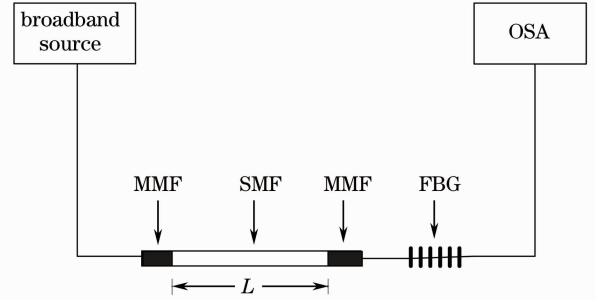


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment

设入射端的 SMF 的光场为 $E_s(r, 0)$, 当光耦合到入射端 MMF 时,激励起 MMF 中的基模与各阶高阶导模,引起能量的重新分布,此时 MMF 中的场分布为^[14]

$$E(r) = \sum_{m=1}^N \alpha_m F_m(r) \exp(i\beta_m L_m), \quad (1)$$

式中 α_m 、 β_m 和 $F_m(r)$ 分别为第 m 阶模场激励系数、传输常数和归一化模场分布, L_m 为入射端 MMF 的长度, N 为在 MMF 中激励起的模数,且 α_m 可表示为

$$\alpha_m = \frac{\int_0^{\infty} E_s(r, 0) F_m(r) r dr}{\int_0^{\infty} F_m(r) F_m(r) r dr}. \quad (2)$$

入射光的模场重新分布后,耦合进中间段 SMF 的包层中,激励起其包层模。当 SMF 中的纤芯模和包层模满足相位匹配条件 $(\beta_{\text{core}} - \beta_{\text{cla}}^m) L = 2\pi N$ (N 为整数)时,在 SMF 中发生干涉,其中 β_{core} 为纤芯模的传输常数, β_{cla}^m 为处于主导地位的第 m 阶包层模的传输常数。经过 SMF 后,纤芯模和第 m 阶包层模的相位差可表示为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda} = (\beta_{\text{core}} - \beta_{\text{cla}}^m)L, \quad (3)$$

式中 Δn_{eff} 为纤芯模和第 m 阶包层模的有效折射率之差, λ 为工作波长。结合相位匹配条件,可得干涉谱的谷值波长为

$$\lambda = \frac{\Delta n_{\text{eff}}L}{N} = [n_{\text{eff}}(\lambda) - n_{\text{eff}}^{\text{cla},m}(\lambda)] \frac{L}{N}. \quad (4)$$

式中 $n_{\text{eff}}(\lambda)$ 为纤芯的有效折射率, $n_{\text{eff}}^{\text{cla},m}(\lambda)$ 为第 m 阶包层模的有效折射率。

当传感器周围环境(如温度和应变)发生改变时, $n_{\text{eff}}(\lambda)$ 、 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}(\lambda)$ 及 L 等随之变化, 反映在透射谱上即干涉极值发生变化。这个极值点所对应的波长称为特征波长, 故可利用特征波长来感知温度及应变的变化。

由耦合模理论可知, FBG 的中心波长满足

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (5)$$

式中 n_{eff} 为导模有效折射率, Λ 为光栅的周期。

当温度和应变同时变化时, 由于 FBG 受到热膨胀效应、热光效应及弹光效应的影响, 其中心波长的变化量为

$$\Delta\lambda_B(T, \epsilon) = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\epsilon, \quad (6)$$

式中 $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial\Lambda}{\partial T}$, $\xi = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}$, P_e 分别为纤芯的热膨胀系数、热光系数和有效弹光系数, ΔT 、 $\Delta\epsilon$ 分别

为温度变化量和应变变化量。

3 实验结果和分析

实验中, MSM 结构中的 SMF 和 MMF 均为长飞公司生产的阶跃折射率型光纤, 其型号分别为 RDD 8/125-14/250 和 SI 105/125-22/250。入射跳线、出射跳线及 MSM 结构和 FBG 间连接光纤与 MSM 结构中的单模光纤型号相同。FBG 为在普通光纤上刻写的光纤光栅, 在室温条件下其中心波长为 1545.32 nm。实验开始后, 选取长度为 25 mm 的 SMF 作为中间段 SMF, 在其两端分别熔接相等长度的 MMF。本实验分别选取 MMF 的长度为 6、10、60 mm, 其对应的干涉谱图如图 2 所示。

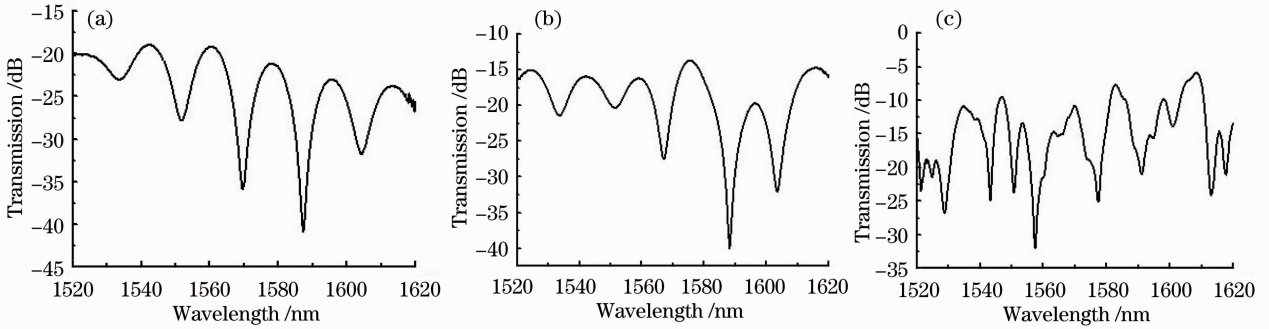


图 2 输出光谱图。(a) MMF 的长度为 6 mm; (b) MMF 的长度为 10 mm; (c) MMF 的长度为 60 mm

Fig. 2 Output spectra. (a) Length of MMF is 6 mm; (b) length of MMF is 10 mm; (c) length of MMF is 60 mm

由图 2 可见, MMF 的长度对光谱图有较大的影响: 当 MMF 的长度较短时, 如图 2(a)、(b) 所示, 干涉主要体现为中间段 SMF 中的纤芯模与包层模的干涉。此时, 由于 MMF 长度不同, MMF 中的模场分布不同, 导致干涉光谱的透射谱不同; 当 MMF 的长度较长时, 如图 2(c) 所示, 此时干涉体现为 MMF 中的基模与各高阶导模间的干涉和中间段

SMF 中的纤芯模与包层模间的干涉。MMF 中的模场分布已经严重干扰了中间段 SMF 中的模场分布。故在实验中应尽量选取较短的 MMF, 从而使 MMF 中的基模与高阶导模间干涉谱的自由光谱范围尽量大, 从而减少对中间段 SMF 中干涉谱的影响。

考虑到光纤传感器的尺寸不宜过大, 以 MMF 的长度为 6 mm 为例, 构成 MSM 传感器。级联

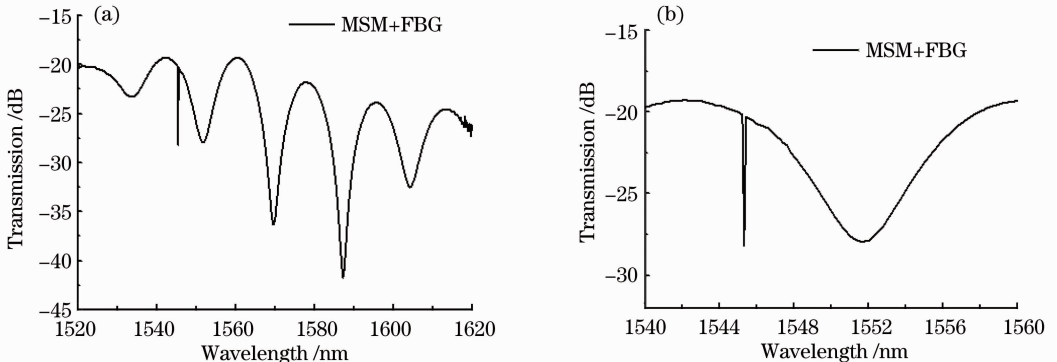


图 3 输出光谱图。(a) 实验光谱图; (b) 放大后的光谱图

Fig. 3 Output spectra. (a) Spectrum of the experiment; (b) enlarged spectrum

FBG 后,可得到实验谱图如图 3(a)所示。由于 FBG 的带宽与干涉谱相比较窄,为了实验需要,将干涉谱放大,得到图 3(b)。图中干涉波谷对应的特征波长为 1551.82 nm。本实验中将以此特征波长与 FBG 的中心波长为对象,进行温度、应变传感测量研究。实验中采用的等强度悬臂梁为 Mn65 弹簧钢,由天津市建筑科学研究院提供,梁长 $l=600$ mm,梁固定端宽度 $b=72$ mm,厚度 $h=5.5$ mm,杨氏模量 E 的取值范围为 180~200 GPa。

首先,对 MSM 结构和 FBG 的温度特性进行测量。将 MSM 结构和 FBG 水平固定在型号为 MH-5800 的恒温板上,从 20 °C 加热到 80 °C,每隔 5 °C 记录一次波长数据,得到其温度的响应特性曲线如图 4 所示。由图可见,MSM 结构干涉谱的特征波长和 FBG 的中心波长随着温度的升高均发生了红移,MSM 结构的干涉谱特征波长向长波方向漂移了 5.36 nm,拟合后可得温度灵敏度为 0.091 nm/°C; FBG 的中心波长向长波方向漂移了 0.61 nm,拟合后可得温度灵敏度为 0.0102 nm/°C。

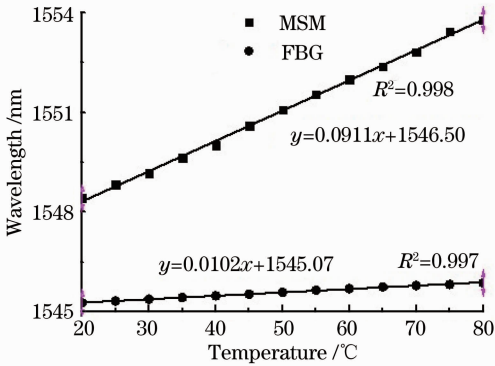


图 4 温度响应特性曲线图

Fig. 4 Temperature response characteristics curve

其次,对 MSM 结构和 FBG 的应变特性进行测量。在室温下,将 MSM 结构和 FBG 粘在等悬臂梁上,在 0~650 $\mu\epsilon$ 的应变范围内,每 50 $\mu\epsilon$ 测量记录一组数据,得到其应变的响应特性曲线如图 5 所示。由图可知,MSM 结构干涉谱的特征波长随应变的增大发生蓝移,向短波方向漂移了 0.74 nm,拟合后可得应变灵敏度为 -0.0013 nm/ $\mu\epsilon$; FBG 中心波长随应变增大发生红移,向长波方向漂移了 0.68 nm,拟合后可得应变灵敏度为 0.0012 nm/ $\mu\epsilon$ 。

当温度、应变同时变化时,MSM 结构的干涉谱特征波长和 FBG 的中心波长满足

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{\epsilon1} \\ K_{T2} & K_{\epsilon2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix}, \quad (7)$$

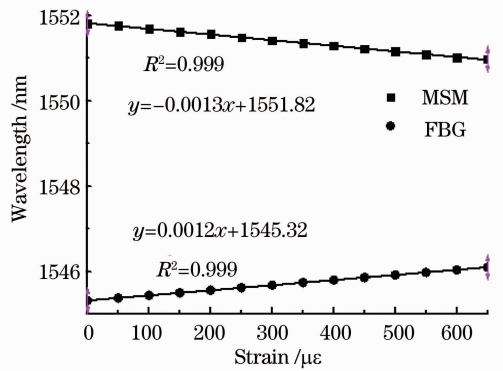


图 5 应变响应特性曲线图

Fig. 5 Strain response characteristics curve

式中 $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 分别为 MSM 结构干涉谱特征波长和 FBG 中心波长的变化量, K_{T1} 、 $K_{\epsilon1}$ 和 K_{T2} 、 $K_{\epsilon2}$ 分别为 MSM 结构和 FBG 的温度和应变灵敏度,可由图 4 和图 5 得到。

将(7)式转置,并代入敏感系数,可得

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{bmatrix} = \frac{1}{1.23 \times 10^{-4}} \begin{bmatrix} 0.0012 & 0.0013 \\ -0.0105 & 0.091 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

由(8)式可知,当温度和应变同时变化时,通过测量 MSM 结构干涉谱特征波长和 FBG 中心波长的变化量,即可实现温度和应变的同时测量。通过使用高分辨率的解调仪(分辨率为 0.01 nm 的 OSA),可得到温度和应变的最大测量误差分别为 ± 0.2 °C 和 ± 8.25 $\mu\epsilon$,其测量精度还受传感部分与等悬臂梁是否刚性粘贴等因素的影响。

4 结 论

基于纤芯失配理论和 FBG 的传感特性,提出一种 MSM+FBG 结构的光纤传感器,利用 MSM 结构和 FBG 对温度和应变的不同敏感系数,实现了对温度和应变的同时测量,且最大测量误差可分别达到 ± 0.2 °C 和 ± 8.25 $\mu\epsilon$ 。此传感器具有体积小、结构简单、灵敏度高、抗电磁干扰、抗腐蚀等优点,在桥梁及石油管道的安全检测等工程领域有很好的应用前景。

参 考 文 献

- Zhengrong Tong, Yang Guo, Xiufeng Yang *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and refractive index using a fiber Bragg grating and a multimode fiber [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, **130-134**: 4053~4056
- Tong Zhengrong, Guo Yang, Yang Xiufeng *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and strain based on a long-period fiber grating combined with a Lyot fiber filter in a linear configuration[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0305002

- 童峥嵘, 郭 阳, 杨秀峰等. 基于 Lyot 滤波器和长周期光纤光栅的温度与应变的同时测量[J]. 中国激光, 2012, **39**(3): 0305002
- 3 Yongxing Jin, Chi Chiu Chan, Xinyong Dong *et al.*. Bending sensor with tilted fiber Bragg grating interacting with multimode fiber[C]. *SPIE*, 2009, **7630**: 76302E
- 4 L. Shao, A. Zhang, W. Liu *et al.*. Optical refractive-index sensor based on dual fiber-Bragg gratings interposed with a multimode-fiber taper[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(1): 30~32
- 5 Y. Miao, B. Liu, Q. Zhao. Simultaneous measurement of strain and temperature using single tilted fibre Bragg grating [J]. *Electron. Lett.*, 2008, **44**(21): 1242~1243
- 6 X. Shu, D. Zhao, Y. Liu *et al.*. Effectively simultaneous temperature and strain measurement utilising a dual-grating sensor formed by type IA and type IIA FBGs[C]. *Proc. IEEE Sensors*, 2002, **2**: 1740~1745
- 7 Wang Muguang, Wei Huai, Tong Zhi *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single dual-period fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 867~869
王目光, 魏 淮, 童 治等. 利用双周期光纤光栅实现应变和温度同时测量[J]. 光学学报, 2002, **22**(7): 867~869
- 8 M. R. Mokhtar, T. Sun, K. T. V. Grattan. Bragg grating packages with nonuniform dimensions for strain and temperature sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**(1): 139~144
- 9 Jie Shi, Shilin Xiao, He Chen *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a high-birefringence fiber loop mirror and an erbium-doped fiber[C]. *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*, 2010. 473~474
- 10 Joel Villatoro, David Monzón-Hernández. Low-cost optical fiber refractive-index sensor based on core diameter mismatch[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(3): 1409~1413
- 11 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特性[J]. 光学学报, 2009, **29**(5): 1183~1187
- 12 Sun Hao, Hu Manli, Qiao Xueguang *et al.*. Fiber refractive index sensor based on fiber core mismatch multimode interference [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0205001
孙 浩, 忽满利, 乔学光等. 基于纤芯失配多模干涉的光纤折射率传感器[J]. 中国激光, 2012, **39**(2): 0205001
- 13 Yue Ma, Xueguang Qiao, Tuan Guo *et al.*. Mach-Zehnder interferometer based on a sandwich fiber structure for refractive index measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**(6): 2081~2085
- 14 Tong Zhengrong, Guo Yang, Yang Xiufeng *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on MSM structure combined with FBG [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(5): 921~926
童峥嵘, 郭 阳, 杨秀峰等. 基于多模-单模-多模结构和光纤布拉格光栅同时测量温度和折射率[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(5): 921~926

栏目编辑: 王晓琰