

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

童峥嵘 韩 伟* 曹 晔

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

摘要 利用偏芯熔接的方法, 研制出一种可实现温度和折射率同时测量的光纤传感器。该传感器将一段多模光纤 MMF2 的左端与一芯径与长度均相同的多模光纤 MMF1 偏芯熔接, 右端与一大芯径多模光纤 MMF3 对芯熔接构成传感头, 利用多模光纤纤芯模和包层模对温度、折射率的敏感性差异, 结合敏感矩阵实现了双参量同时测量。实验选取了位于 1536.98 nm 和 1545.24 nm 处的干涉谷进行了温度和折射率的测量, 测得 1536.98 nm 处的干涉谷对温度的灵敏度为 0.105 nm/°C, 对折射率不敏感; 1545.24 nm 处的干涉谷对温度的灵敏度为 0.052 nm/°C, 对折射率的敏感性为 32.2 nm/RIU (RIU 表示单位折射率)。该传感器也可应用于其他参量的测量, 具有良好的应用前景。

关键词 光纤光学; 温度和折射率测量; 偏芯; 干涉传感器

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0106004

Fiber Sensor for Simultaneous Measurement of Temperature and Refraction Index Based on Multimode Fiber Core-Offset

Tong Zhengrong Han Wei Cao Ye

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

Abstract A novel fiber interferometer sensor based on core-offset for simultaneously measuring refractive index and temperature is proposed. It makes a multimode fiber MMF2 left weld with a multimode fiber MMF1 which has a same core diameter and length in core-offset way, and right weld with a multimode fiber MMF3 which has a larger core diameter to be the sensor head. By observing the wavelength shifts of the interference dips, temperature and refraction index (RI) can be measured simultaneously since the core modes and the cladding modes have different sensitivities to the two parameters. The dips at 1536.98 nm and at 1545.24 nm are chosen to measure the temperature and the RI. Experiments indicate that the temperature sensitivities of the dips at 1536.98 nm and at 1545.24 nm are 0.105 nm/°C and 0.052 nm/°C. The RI sensitivity coefficient of the dip at 1545.24 nm is 32.2 nm/RIU, whereas the dip at 1536.98 nm is insensitive. This fiber interferometer sensor can also be applied in other sensing fields and has good prospects.

Key words fiber optics; temperature and refractive index measurement; core-offset; interferometer sensor

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 120.3180

1 引 言

近年来, 光纤传感器因为具有灵敏度高、抗腐蚀、成本低等优点, 广泛地应用于应变、液位、折射率^[1-3]、温度^[4-7]、弯曲^[8]、加速度^[9]等的测量。其中, 折射率和温度是物体的两种重要参数, 在生物、

化学和医学等领域, 常常需要对折射率和温度进行测量。目前, 测量折射率和温度的方法有很多, 例如在折射率测量方面, 将单模光纤 (SMF) 两端与多模光纤 (MMF) 熔接, 使单模光纤的纤芯模和包层模发生耦合并产生干涉, 利用其形成的干涉谷对折射率

收稿日期: 2013-06-27; 收到修改稿日期: 2013-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(61107052)、天津市自然科学基金(11JCYBJC00100)、天津市青年基金(13JCQNJC01800)

作者简介: 童峥嵘(1971—), 女, 博士, 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: hanwei20041375@gmail.com

进行测量^[10]等。在温度方面,研究人员同样提出了很多利用光纤传感实现对其测量的方法,如将一段多模光纤熔在两段单模光纤中间,光从单模光纤入射到多模光纤中时会激发出一系列高阶模,利用高阶模形成的干涉谷实现对温度的测量^[11];又如将保偏光纤的两端分别与单模光纤偏芯熔接,利用保偏光纤的纤芯模和包层模耦合形成的干涉谷对温度进行测量^[12]等。

然而在实际应用中,折射率和温度往往同时发生变化,所以有必要对折射率和温度同时进行测量。童峥嵘等^[13]将金属-半导体-金属(MSM)结构的传感器与布拉格光栅级联,利用 MSM 传感器的干涉谷和布拉格光栅的透射峰对温度和折射率不同的敏感性,构建了敏感矩阵来实现温度和折射率的同时测量。Zhang 等^[14]对传统的迈克耳孙干涉仪进行了改进,在传感臂中嵌入一段高双折射光纤,利用快慢轴的相位差对系统的包络进行调制,并实现了温度和折射率的同时测量。

本文提出一种偏芯熔接的多模光纤传感器,将两段纤芯直径相同的多模光纤偏芯熔接,利用多模光纤纤芯模耦合形成的干涉谷,以及纤芯模和包层模耦合形成的干涉谷对温度和折射率进行测量。由于纤芯模耦合形成的干涉谷对折射率不敏感,故可

与纤芯模和包层模耦合形成的干涉谷相结合,利用敏感矩阵实现温度和折射率的同时测量。

2 实验原理

实验装置结构如图 1(a)所示,宽带光源(BBS)的光通从 SMF 射入,经过传感头时发生模式耦合并形成干涉,这些模式通过 SMF 传输到光谱分析仪(OSA)中。传感头结构如图 1(b)所示,多模光纤 MMF2 左端与一芯径和长度均相同的多模光纤 MMF1 偏芯熔接,右端与一大芯径多模光纤 MMF3 对芯熔接。偏芯部分横截面如图 1(c)所示,其中, a 为 MMF1 和 MMF2 的纤芯半径, b 为 MMF1 和 MMF2 的包层半径, H 为 MMF1 和 MMF2 的纤芯偏移量。该传感器主要原理是:光射入 MMF1 中时,激发出基模和众多高阶纤芯模,在经过 MMF1 与 MMF2 分界面时,一部分纤芯模通过 MMF2 的纤芯传输到 MMF3,另一部分耦合进包层从而激发出包层模并传输到 MMF3。当这些模式传输到 MMF3 时,会发生纤芯模之间的耦合以及纤芯模和包层模的耦合,使能量重新分布并且形成干涉谷,当外界的温度和折射率等参量发生变化时,通过观察干涉谷的波长漂移量可以实现相关参量的测量。

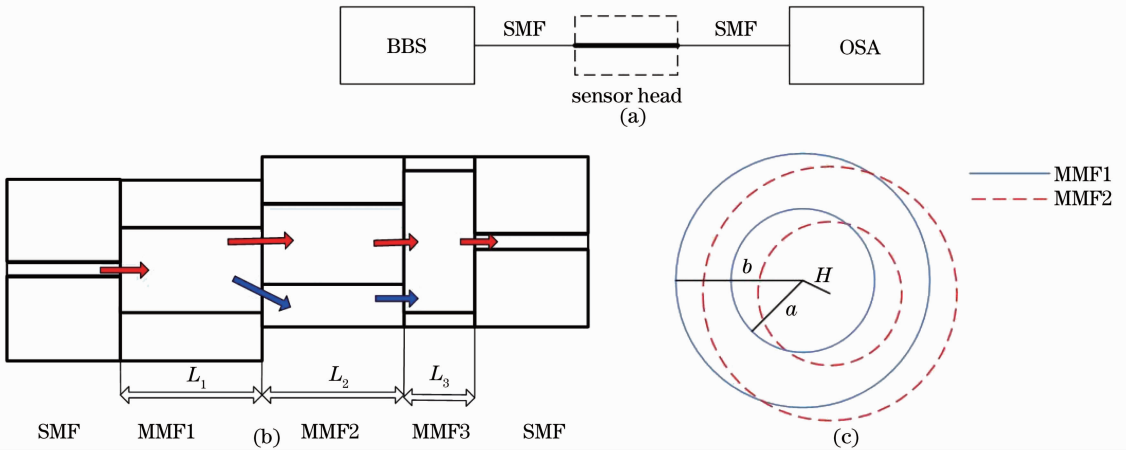


图 1 (a)传感器系统结构图; (b)传感头结构图; (c)偏芯部分的截面图

Fig. 1 (a) Sensor system structure; (b) sensor head structure; (c) section view of the core offset part

光从 SMF 射入传感头时,纤芯模 LP_{0m} 和 LP_{0n} 的相位差由 MMF1 和 MMF2 的总长度以及纵向传播常数差 $\Delta\beta$ 决定,当满足下式时纤芯模发生耦合形成干涉:

$$\Delta\beta = 2\pi N, \quad (1)$$

式中 N 为整数。对于高阶模,在弱导条件($\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{co}}} \ll 1$)下, $\Delta\beta$ 还可写成

$$\Delta\beta = \frac{u_m^2 - u_n^2}{2ka^2 n_{\text{co}}}, \quad (2)$$

式中 m 和 n 为发生耦合的纤芯模阶数,其中 $m > n$, $u_m = \pi(m - \frac{1}{4})$ 和 $u_n = \pi(n - \frac{1}{4})$ 为零阶 Bessel 函数的根。此时干涉谷波长间隔为^[15-16]

$$\Delta\lambda_{\text{core-core}} = \frac{16n_1 a^2}{(m-n)[2(m+n)-1](L_1 + L_2)}, \quad (3)$$

式中 L_1 是 MMF1 的长度, L_2 是 MMF2 的长度, n_1 为 MMF1 和 MMF2 的纤芯折射率。当纤芯模耦合发生干涉时, 干涉极值波长与纤芯折射率、光纤长度 $L_1 + L_2$ 有关。多模光纤纤芯不与外界直接接触, 故纤芯模耦合形成的干涉谷对外界折射率变化不敏感。而当温度变化时, 多模光纤受热膨胀效应影响, 纤芯折射率、光线长度、纤芯半径均会发生变化, 从而使得纤芯模耦合形成的干涉极值波长发生漂移。

纤芯模和包层模的相位差可表示为

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L_2}{\lambda}, \quad (4)$$

式中 Δn_{eff} 为纤芯和包层的折射率差, λ 为真空中的波长。纤芯模与包层模耦合形成的干涉谷间隔为

$$\Delta\lambda_{\text{core-cladding}} \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}}L_2}. \quad (5)$$

从(5)式可知, 包层模和纤芯模耦合形成的干涉谷波长间隔, 与折射率差 Δn_{eff} 和 MMF2 的长度 L_2

有关, 当温度或者折射率变化时, Δn_{eff} 也会变化。因而, 纤芯模和包层模耦合形成的干涉谷会发生漂移, 由此可测量温度和折射率的变化。同时因为纤芯模耦合形成的干涉谷对折射率不敏感, 两种干涉谷对温度和折射率的敏感性不同, 因此可实现温度和折射率的同时测量。

3 实验分析

实验选取的多模光纤 MMF1 和 MMF2 为长飞公司生产的 SI 60/125 型多模光纤, 纤芯直径为 $60 \mu\text{m}$, 将两端光纤进行偏芯熔接。图 2(a)~(c) 为偏芯量 H 为 $17 \mu\text{m}$ 时 MMF1 和 MMF2 长度分别为 1, 2, 3 cm 的图谱。当两段多模光纤长度过短时, 干涉谷过少, 不利于选择; 两段多模光纤过长时, 干涉谷过密, 且传感头过长不利于实际应用。因此实验选取均为 2 cm 的 MMF1 和 MMF2 组成的传感器进行测量。

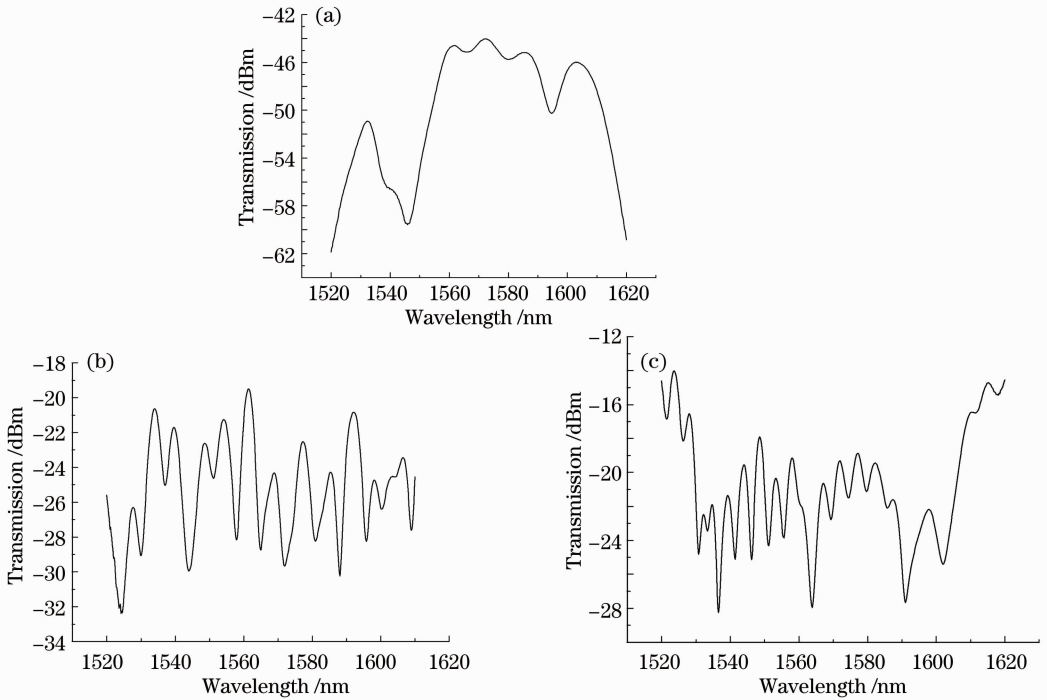


图 2 L_1 和 L_2 为(a) 1 cm, (b) 2 cm 和(c) 3 cm 时系统的干涉图谱

Fig. 2 System interference patterns when L_1 and L_2 are (a) 1 cm, (b) 2 cm and (c) 3 cm

对于阶跃型多模光纤而言, 归一化频率可表示为

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (6)$$

式中 n_1 为纤芯折射率, n_2 为包层折射率。阶跃型多模光纤纤芯模式数 $N = \frac{1}{2}V^2$ 。当两段多模光纤偏芯熔接后, 会使得纤芯模功率和包层模功率发生变

化, 但由(3)式、(5)式和(6)式可知, 纤芯模与包层模的功率变化不会影响多模光纤纤芯模的模式数, 进而也不会影响发生耦合的模式阶数, 而纤芯模耦合形成的干涉谷波长间隔, 只与发生耦合的模式阶数、光纤长度、纤芯半径、纤芯折射率相关; 纤芯模与包层模耦合形成的干涉谷波长间隔, 仅与折射率差、光纤长度相关。两种干涉谷的波长间隔均与功率无

关,因此偏芯量的改变,不会影响光谱图中的干涉谷波长间隔。图 3(a)、(b)为 MMF1 和 MMF2 长度均为 2 cm 时,纤芯偏移量 H 为 24 μm 和 30 μm 时的

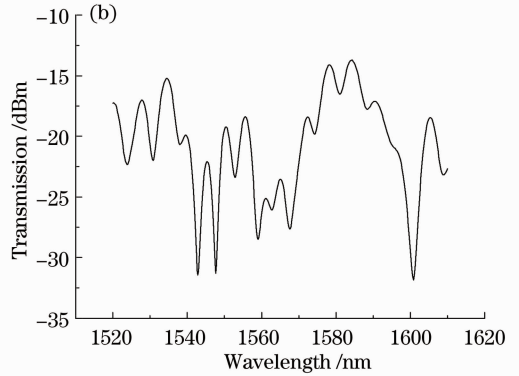
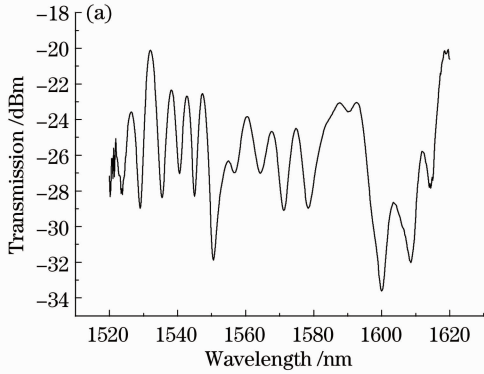


图 3 H 为(a) 24 μm 和(b) 30 μm 时系统的干涉谱图

Fig. 3 System interference patterns when H is (a) 24 μm and (b) 30 μm

本次实验选用 H 为 17 μm 的传感器对温度和折射率进行测量。MMF3 为长飞公司生产的 SI 105/125 型多模光纤,纤芯直径为 105 μm ,长度为 5 mm,在本传感器中主要作用是使 MMF2 传输进来的模式发生耦合。

实验选取传输谱中位于 1536.98 nm 和 1545.24 nm 处的波谷进行观察,1536.98 nm 处的波谷记为 dip1;1545.24 nm 处的波谷记为 dip2。如图 4 所示。

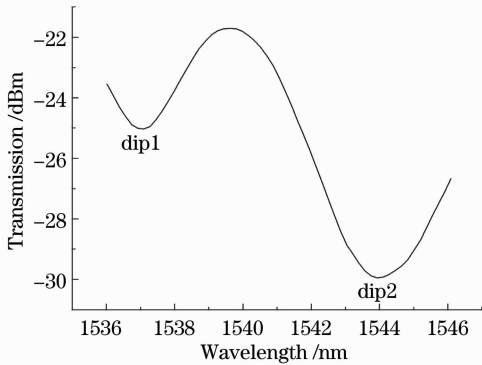


图 4 dip1 与 dip2 处的干涉图谱

Fig. 4 Interference pattern of dip1 and dip2

保持温度不变,将传感器水平放置于不同浓度的 NaCl 溶液中,对传感器进行折射率传感特性测量。实验配制了不同浓度的 NaCl 溶液,折射率范围为 1.34~1.38,如图 5 所示,在折射率从 1.34 向 1.38 变化时,dip1 对折射率不敏感,波长漂移量为 0。dip2 随着折射率的升高,波长发生了红移,向长波方向总共漂移了 1.28 nm,折射率敏感度为 32.2 nm/RIU(RIU 为单位折射率)。由实验结果可知,dip1 为纤芯模式耦合形成的干涉谷,dip2 为

干涉谱。从图中可知, H 不同时,干涉谱虽然包络不同,但是干涉谷间隔不变。在 100 nm 的范围内,两个图谱和图 2(b)相同,均只有 14 个干涉谷。

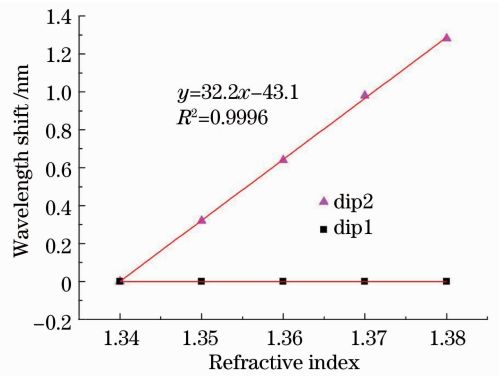


图 5 折射率实验曲线

Fig. 5 Refractive index response characteristics curves

纤芯模与包层模耦合形成的干涉谷。

将传感器放置在恒温板上,从 20 $^{\circ}\text{C}$ 加热到 60 $^{\circ}\text{C}$,每隔 5 $^{\circ}\text{C}$ 记录一次波长漂移量,如图 6 所示。实验表明,随着温度的升高,dip1 和 dip2 均发生了红移。dip1 由 1536.98 nm 漂移到 1540.76 nm,对温度的敏感性为 0.105 nm/ $^{\circ}\text{C}$;dip2 由 1545.24 nm 漂移到

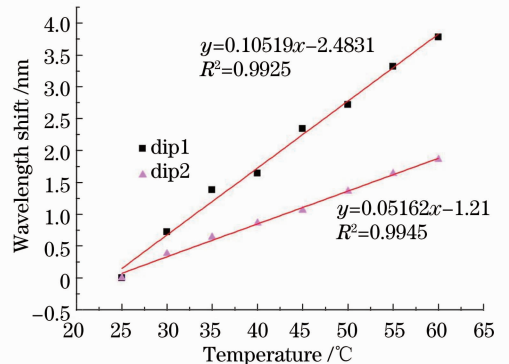


图 6 温度实验曲线

Fig. 6 Temperature response characteristics curves

1547.1 nm,对温度的敏感性为 0.052 nm/°C。

当折射率和温度同时变化时,dip1 和 dip2 的波长漂移按照下式变化:

$$\Delta\lambda_i = K_i^t \Delta T + K_i^n \Delta n, \quad (7)$$

式中 ΔT 和 Δn 为温度和折射率变化, $i=1,2$ 分别对应 dip1 和 dip2, K_1^t 和 K_2^t 分别为 dip1 和 dip2 的温度灵敏度系数, K_1^n 和 K_2^n 分别为 dip1 和 dip2 的折射率灵敏度系数,可由图 4、5 的斜率得到。由此可得敏感矩阵方程

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1^t & K_1^n \\ K_2^t & K_2^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix}. \quad (8)$$

将(8)式进行转置并将灵敏度系数代入,可得到

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix} = \frac{1}{3.381} \begin{bmatrix} 32.2 & 0 \\ -0.052 & 0.105 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

因此,可由 dip1 和 dip2 的波长漂移量得到温度和折射率的变化量,进而可以实现温度和折射率的同时测量。

4 结 论

基于多模光纤纤芯模式耦合和纤芯模式与包层模式耦合形成的干涉谷对温度和折射率的敏感性不同的原理,设计了一种温度和折射率同时测量的传感器,将一段多模光纤 MMF2 左端与芯径和长度均相同的多模光纤 MMF1 偏芯熔接,右端与一大芯径多模光纤 MMF3 对芯熔接构成传感头,并选取了位于 1536.98 nm 和 1545.24 nm 两处的干涉谷进行了温度折射率的双参量测量,实验表明 1536.98 nm 处的干涉谷对温度的灵敏度为 0.105 nm/°C,对折射率不敏感;1545.24 nm 处的干涉谷对温度的灵敏度为 0.052 nm/°C,对折射率的敏感性为 32.2 nm/RIU。利用两处干涉谷对温度和折射率不同的敏感性可实现双参量同时测量,该传感器具有灵敏度高、结构简单、成本低廉等优点,具有一定的实用价值。

参 考 文 献

- 1 Fufei Pang, Huanhuan Liu, Hairun Guo. In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on double cladding fibers for refractive index sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(10): 2395-2400.
- 2 Qiangzhou Rong. High-sensitive fiber-optic refractometer based on a core-diameter-mismatch Mach-Zehnder interferometer [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(7): 2501-2505.
- 3 Qi Bo, Pang Fufei, Cao Wenxin, *et al.*. Cladding-mode resonance of specialty fiber sensing system based on intensity detection method [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0505007.

光纤传感系统[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0505007.

- 4 Lecheng Li, Xia Li, Zhenhai Xie. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using thinned fiber based on Mach-Zehnder interferometer [J]. Opt Commun, 2012, 285(19): 3945-3949.
- 5 A P Zhang, L Y Shao, J F Ding. Sandwiched long-period gratings for simultaneous measurement of refractive index and temperature [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2005, 17(22): 2397-2399.
- 6 Zhang Xiaokang, Ye Xiaojing, Chen Zhidong. Doubly cladding single-mode optical fiber sensors and its application in temperature and humidity sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0606004.
- 张小康, 叶晓靖, 陈志东. 双包层单模光纤传感器及其在温度/湿度传感方面的应用[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0606004.
- 7 Fan Liuqing, Ma Li, Han Daofu, *et al.*. Fiber Bragg grating temperature sensor based on dynamic Fabry-Perot cavity [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1005003.
- 范刘静, 马力, 韩道福, 等. 基于动态法布里-珀罗腔的光纤光栅温度传感[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1005003.
- 8 Fan Yuqiang, Yuan Yufeng, Wei Wanting, *et al.*. Fiber bending sensor based on LP₂₁ mode [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1128005.
- 范宇强, 袁余锋, 魏婉婷, 等. 基于 LP₂₁ 模式的光纤弯曲传感器[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1128005.
- 9 Guo Yongxing, Zhang Dongsheng, Li Jieyan, *et al.*. Two dimensional fiber Bragg grating accelerometer [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1214001.
- 郭永兴, 张东生, 李杰燕, 等. 光纤光栅二维加速度传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1214001.
- 10 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.
- 11 S M Tripathi, A Kumar, R K Varshney. Strain and temperature sensing characteristics of single-mode-multimode-single-mode structures [J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(13): 2348-2356.
- 12 Hyun-Joo Kim, Young-Geun Han. Polarization-dependent in-line Mach-Zehnder interferometer for discrimination of temperature and ambient index sensitivities [J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(8): 1037-1041.
- 13 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): 922-926.
- 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): 922-926.
- 14 Jing Zhang, Hao Sun, Ruohui Wan. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a Michelson fiber interferometer with a Hi-Bi fiber probe [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(6): 2061-2065.
- 15 D Marcuse. Mode conversion in optical fibers with monotonically increasing core radius [J]. J Lightwave Technol, 1987, LT-5(1): 125-133.
- 16 W S Mohammed, A Mehta, E G Johnson. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference [J]. J Lightwave Technol, 2004, 22(2): 469-477.