

基于多模干涉和长周期光纤光栅的温度及折射率同时测量

王洁玉 童峥嵘 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 基于多模干涉理论和长周期光纤光栅(LPFG)的传感特性,提出了一种单模-多模-单模(SMS)结构与 LPFG 级联的光纤传感器,实现了温度和折射率的同时测量。实验结果表明,SMS 结构的干涉谱和 LPFG 对温度和折射率具有不同响应灵敏度,其温度灵敏度分别为 $0.017 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $0.060 \text{ nm}/^\circ\text{C}$;SMS 结构对折射率不敏感,而 LPFG 的折射率灵敏度为 $-35.60 \text{ nm}/\text{RIU}$ (RIU 为折射率单位)。因此利用敏感矩阵,实现对温度和折射率的同时测量,得到温度和折射率的最大测量误差分别为 $\pm 0.59 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 ± 0.0013 。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,在生物化学领域应用前景良好。

关键词 光纤光学;多模干涉;长周期光纤光栅;温度;折射率

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0905003

Simultaneous Measurement of Temperature and Refraction Index Based on Multimode Interference and Long-Period Fiber Grating

Wang Jieyu Tong Zhengrong 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 multimode interference theory and the sensing characteristics of long-period fiber grating (LPFG), a fiber-optic sensor composed of a single mode fiber (SMF)-multimode fiber (MMF)-SMF (SMS) structure and a LPFG is proposed for simultaneous measurement of temperature and refractive index. The experimental results show that the interference spectrum of SMS structure and LPFG have different response sensitivities to temperature and refraction index, and the temperature sensitivity coefficients are $0.017 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ and $0.060 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, respectively. The SMS structure is insensitive to refractive index while the refractive index sensitivity coefficient of LPFG is $-35.60 \text{ nm}/\text{RIU}$. Using the sensitivity matrix, simultaneous measurement of temperature and refractive index is realized. The maximum measurement errors of temperature and refraction index are $\pm 0.59 \text{ }^\circ\text{C}$ and ± 0.0013 , respectively. With the advantages of high sensitivity, simple structure, immunity to electromagnetic interferences and good linearity, the structure has a excellent application prospect in biochemistry field.

Key words fiber optics; multimode interference; long-period fiber grating; temperature; refraction index

OCIS codes 050.2770; 060.2310; 060.2370; 120.3180

1 引 言

近几年,基于多模干涉的单模-多模-单模(SMS)结构的光纤传感器因其结构简单、成本低、抗电磁干扰及耐腐蚀等特性,被广泛地应用于温度、应变、弯曲、位移及折射率等的传感测量领域中,并得到了比

光纤布拉格光栅传感器更为优越的传感特性^[1~5]。此光纤干涉传感器其内部模场的解析表达式非常复杂,以现在的理论模型,大多数采用光束传播法建立其内部光场的计算模型,研究分析其干涉场的光场分布和变化规律,并在实验中观察其特征波长的漂

收稿日期: 2012-04-12; 收到修改稿日期: 2012-05-09

基金项目: 天津市自然科学基金(11JCYBJC00100)资助课题。

作者简介: 王洁玉(1988—),女,硕士研究生,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: wangjieyu1111@sina.com

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

移情况实现传感的测量。

长周期光纤光栅 (LPFG) 作为常用光纤传感器器件, 因其插入损耗小、带宽较宽、对外界环境的变化反应灵敏度高、后向反射小等优点, 在通信及传感领域得到了广泛应用^[6~9]。由于 LPFG 的周期相对较长, 满足相位匹配条件的是同向传输的纤芯基模和包层模, 这一特点决定了 LPFG 的谐振波长和峰值对外界环境变化较为敏感^[10,11]。因此, LPFG 在生物化学领域应用前景可观。

折射率作为物质的固有属性, 是生物工程、环境监测、食品检测等领域的重要研究课题^[12~14]。而温度作为环境变化的重要参量之一, 可以直观地监测外界的变化。故将温度和折射率进行同时测量引起国内外科研工作者的关注^[15,16]。严金华^[17]提出一种光纤传感器, 将一 LPFG 进行腐蚀后与另一未腐蚀的 LPFG 级联, 构成传感区。由于两个 LPFG 对温度和折射率的灵敏度不同, 运用敏感矩阵实现了双参量的同时测量。但由于腐蚀后的 LPFG 很脆弱、易断, 不利于推广使用。王成等^[18]运用 LPFG 的相位匹配条件与光纤纤芯基模和光纤包层模的模式方程, 仿真并实验验证了 LPFG 透射谱的谐振峰随温度与外界折射率变化而移动, 实现了温度和折射率的同时测量。但其计算量大、算法复杂, 且温度相对误差较大。本文采用 SMS 结构和 LPFG 级联的方法, 结构简单、成本低廉。利用多模光纤 (MMF) 中基模与高阶模的干涉谱和 LPFG 对温度及折射率的不同灵敏系数, 实现了温度和折射率的同时测量。

2 实验装置及其传感原理

图 1 是 SMS 结构与 LPFG 级联传感器的实验装置图。借助单模光纤 (SMF) 引入一段长度为 L 的 MMF, 再通过 SMF 将光引出, 耦合进入 LPFG, 通过光谱分析仪 (OSA) 得到多模干涉与 LPFG 共同作用后的光谱图。其中 SMS 和 LPFG 作为传感区, 监测温度和折射率的变化。其基本原理主要是基于耦合模在 MMF 中形成的模场干涉。SMF 中传输的基模耦合到 MMF, 激励起 MMF 中的基模和高阶模式, 不同模式在多模纤芯中发生干涉, 产生能量的重新分布, 最终的干涉谱由这些耦合到引出光纤的多个模式干涉共同决定。LPFG 将其谐振波长的光前向耦合到包层, 在干涉光谱范围内形成一个谐振峰, 然后进入光谱仪观察干涉波谷与 LPFG

的谐振波长随温度及折射率的变化。

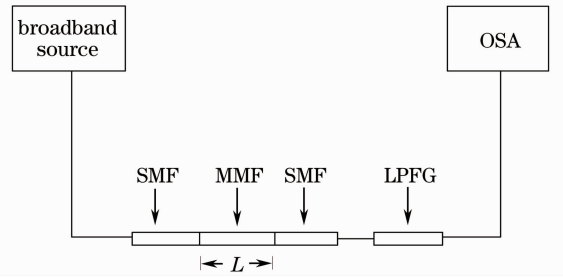


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment

由于在 MMF 中, 最强的干涉发生在基模与高阶模式之间, 故以 LP_{01} 和 LP_{0n} 为例, 进行理论分析。设 L 为 MMF 的长度, LP_{01} 和 LP_{0n} 分别为 MMF 中被激励起的基模和第 n 阶模式, 其轴向传输常数之差 $\beta_n - \beta_1$, 可表示为

$$\beta_n - \beta_1 = \frac{u_n^2 - u_1^2}{2ka_M^2 n_{co}}, \quad (1)$$

式中 $u_1 = 0$, $u_n = \pi(n-1/4)$, $k = 2\pi/\lambda$ 是波数, α_M 是 MMF 的纤芯半径, n_{co} 是 MMF 纤芯折射率。在 L 处发生干涉时, 满足相位匹配条件 $(\beta_n - \beta_1)L = 2\pi N$ (N 为整数), 故干涉极大处的波长为

$$\lambda = \frac{16n_{co}\alpha_M^2 N}{(m-n)[2(m+n)-1]L}, \quad (m > n) \quad (2)$$

由(2)式可以看出, 干涉极值波长与 MMF 纤芯折射率 n_{co} 、纤芯半径 α_M 以及 MMF 的长度 L 有关。当温度变化时, MMF 受热光效应及热膨胀效应的影响, 其 n_{co} 、 α_M 随温度的改变而改变, 从而引起干涉极值波长的漂移; 当 MMF 周围的环境折射率变化时, 在 MMF 内传输的模式的传输常数和模场分布将会发生变化, 故其也可感知外界环境折射率的变化。此干涉极值波长称为 SMS 结构干涉谱的特征波长。由于实验所用为包层直径 $125 \mu\text{m}$ 、纤芯直径 $50 \mu\text{m}$ 的 MMF, 其芯径与包层直径相差较大, 导致外界折射率的变化对 MMF 内传输的模式的传输常数和模场分布影响不大, 故其对折射率不敏感。

由耦合模理论可知, LPFG 的相位匹配条件可表示为

$$\lambda_D^m = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})\Lambda, \quad (3)$$

式中 λ_D^m 为谐振波长, Λ 为光栅周期, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 分别为纤芯基模 LP_{01} 和一阶 m 次包层模 LP_{0m} 的有效折射率。

当温度变化 ΔT 且折射率从 n_3 变为 n_4 时, LPFG 的谐振波长变化为

$$\Delta\lambda^{(m)} = \left[(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) \frac{d\Delta}{dT} + \left(\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{dT} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}{dT} \right) \Delta \right] \Delta T + \frac{U_\infty \Delta}{n_2 b^3 k^3} \left(\frac{1}{\sqrt{n_2^2 - n_3^2}} - \frac{1}{\sqrt{n_2^2 - n_4^2}} \right), \quad (4)$$

式中 b 为包层半径, n_2 为包层折射率, U_∞ 为 0 阶第一类贝塞尔函数 J_0 的 m 阶根。

由(2)式和(4)式可知,当温度和折射率同时变化时,SMS结构和LPFG具有不同的响应灵敏度,从而可以利用敏感矩阵,实现对温度和折射率的同时测量。

3 实验结果和分析

实验采用长飞公司生产的型号为 SI2014-D 的 MMF,其包层直径为 $125 \mu\text{m}$ 、纤芯直径为 $50 \mu\text{m}$ 、及高频 CO_2 激光脉冲在普通单模光纤上写入的 LPFG,其谐振波长为 1540.89 nm 。实验开始后,分别选取长度为 3 cm 和 6 cm 的 MMF,得到其 SMS

结构的干涉谱如图 2 所示(REF 表示基准线),与(2)式理论吻合,即 MMF 长度越长,干涉谱越密。由于 LPFG 的带宽较宽,若 SMS 结构产生的干涉谱过密,与 LPFG 级联后,从输出的光谱中较难分辨 LPFG 的谐振波长和干涉谱的特征波长,且两种光谱干扰严重,故结合 LPFG 的谐振波长,应选取的长度为 3 cm 的 MMF。由图 2(b)可知,当 MMF 为 3 cm 时,SMS 结构产生的干涉光谱的自由光谱范围很宽,此干涉谱经过 LPFG 后,由耦合模原理可知,满足 LPFG 透射中心波长的光被透射,故在光谱范围内可以观测到两个波谷,分别对应 LPFG 的谐振波长与干涉光的特征波长,如图 3 所示。当温度和折射率变化时,由于干涉谱特征波长和 LPFG 的谐振波长间距较大,故在测量过程中,虽功率相互影响,但两个波长能保持相对独立,实时感知温度和外界折射率的变化。实验所用光谱分析仪为 Anritsu MS9710B,分辨率为 0.07 nm 。

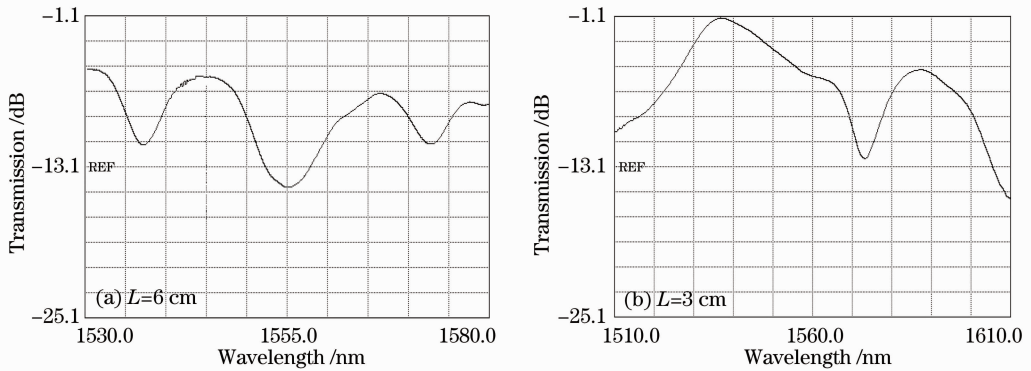


图 2 SMS 结构的干涉谱

Fig. 2 Interference spectrum of SMS structure

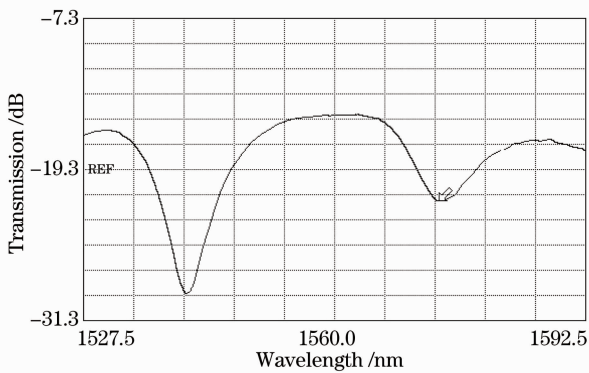


图 3 传感系统的透射谱

Fig. 3 Transmission spectrum of sensing system

为了防止弯曲等外界因素的影响,将 SMS 结构和 LPFG 水平固定,用水浴加热的方式对温度特性进行测量。从 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 至 $80 \text{ }^\circ\text{C}$,每隔 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 记录一次波

长变化,得到光谱演变图及响应特性曲线如图 4 所示。由图可见,SMS 结构的干涉谱特征波长和 LPFG 的谐振波长随温度的升高均发生了红移,SMS 结构干涉谱的特征波长从 1573.52 nm 漂移到 1574.56 nm ,温度灵敏度为 $0.017 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。LPFG 的谐振波长从 1540.89 nm 漂移至 1544.50 nm ,温度灵敏度为 $0.060 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

当温度保持室温 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒定时,将传感器置于不同浓度的 NaCl 溶液中,对折射率传感特性进行测量。实验配置了不同浓度的 NaCl 溶液,折射率变化范围从 1.33 到 1.38 ,得到光谱演变图及折射率响应特性曲线如图 5 所示。由图可知,SMS 结构因其 MMF 的纤芯直径较小,包层较厚,无法有效地感知外界折射率的变化,故其干涉谱特征波长对折射率的变化不敏感,但 LPFG 的谐振波长随折射率的

升高发生了蓝移,波长左移了 1.75 nm,折射率灵敏度为-35.60 nm/RIU(RIU 为折射率单位)。

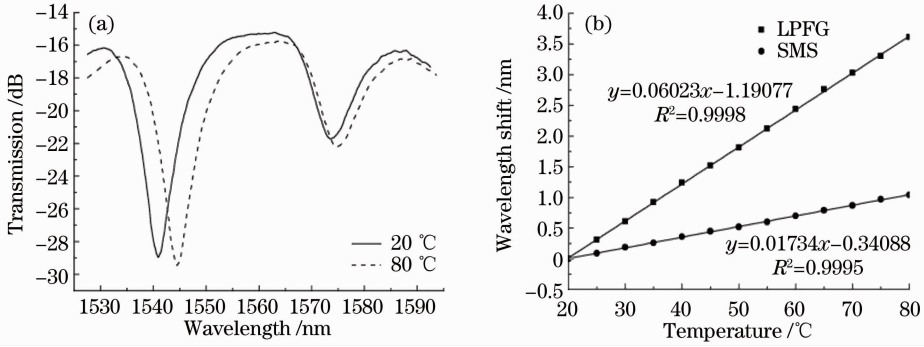


图 4 温度测量。(a) 20 °C 和 80 °C 时输出的光谱;(b)温度响应特性曲线

Fig. 4 Measurement of temperature. (a) Output spectrum at 20 °C and 80 °C ;
(b) temperature response characteristics curve

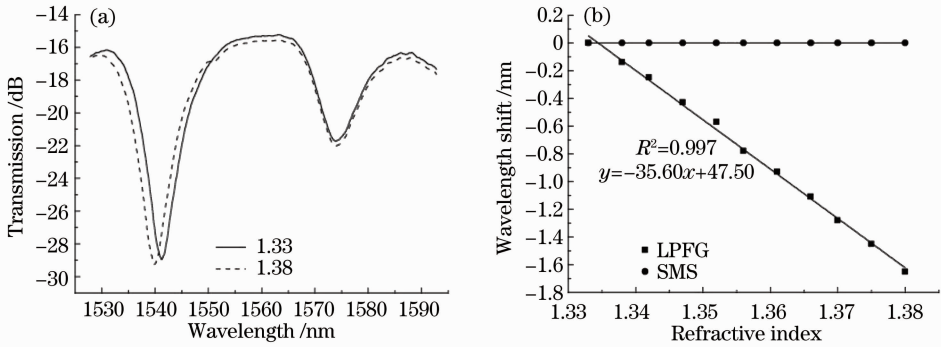


图 5 折射率测量。(a)折射率分别为 1.33 和 1.38 时输出光谱;(b)折射率响应特性曲线

Fig. 5 Measurement of refractive index. (a) Output spectrum when the refractive index is 1.33 and 1.38, respectively; (b) refractive index response characteristics curve

当温度和折射率同时变化时,SMS 结构的干涉谱特征波长和 LPFG 的谐振波长的变化为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{n1} \\ K_{T2} & K_{n2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 分别为 SMS 结构干涉谱的特征波长和 LPFG 的谐振波长的变化量, ΔT 和 Δn 分别为温度和折射率的变化量, K_{T1} 、 K_{n1} 和 K_{T2} 、 K_{n2} 分别为 SMS 结构和 LPFG 的温度和折射率灵敏度,可由图 4 和图 5 的斜率得到。

将(5)式通过转置,得

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} K_{n2} & -K_{n1} \\ -K_{T2} & K_{T1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $D = K_{T1}K_{n2} - K_{T2}K_{n1}$ 。

将 LPFG 和 SMS 结构的灵敏度系数分别代入(6)式,得

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix} = \frac{1}{-0.6052} \begin{bmatrix} -35.6 & 0 \\ -0.06 & 0.017 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

因此可通过观察 SMS 结构和 LPFG 的波长漂移,得到温度和折射率的变化量,实现对温度和折射

率的同时测量。

温度和折射率同时测量的结果如图 6 所示,分别将温度固定在 25 °C,折射率从 1.33 增加至 1.38;以及将折射率固定在 1.35,温度从 25 °C 增大至 75 °C,得到同时测量的传感特性。通过观察 SMS 结构和 LPFG 的波长漂移,并利用(7)式,得到温度和折射率的变化量。由图可知温度和折射率的最大

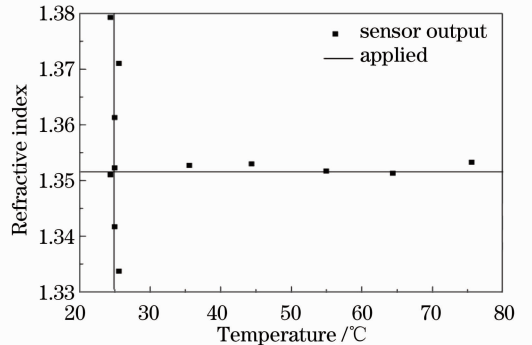


图 6 温度和折射率的同时测量图

Fig. 6 Figure of simultaneous measurement of the temperature and refractive index

误差分别为 $\pm 0.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 ± 0.0013 ,其测量精度受到OSA的分辨率等因素的影响。

4 结 论

基于多模干涉理论和LPFG的传感特性,提出一种SMS+LPFG结构的光纤传感器,利用SMS结构的干涉谱和LPFG对温度和折射率的不同敏感系数,实现了对温度和折射率的同时测量,且最大误差分别为 $\pm 0.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 ± 0.0013 。此传感器具有结构简单、抗电磁干扰、抗腐蚀等优点,在生化领域及海底石油管道的安全监测领域等有很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Wang Wei, Li Enbang, Zhang Chenliang *et al.*. Simulation and experimental studies of multimode-interference based fiber-optic temperature sensors [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(12): 1571~1575
王 玮, 李恩邦, 张晨亮等. 基于多模干涉的光纤温度传感器的BPM模拟与实验研究[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(12): 1571~1575
- 2 Li Enbang. 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
- 3 Gong Yuan, Zhao Tian, Rao Yunjiang *et al.*. All-fiber curvature sensor based on multimode interference [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(11): 679~681
- 4 Wu Qiang, Agus Muhamad Hatta, Wang Pengfei *et al.*. Use of a bent single SMS fiber structure for simultaneous measurement of displacement and temperature sensing [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(2): 130~132
- 5 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
- 6 Huang Ying, Zhou Zhi, Zhang Yinan *et al.*. A temperature self-compensated LPFG sensor for large strain measurements at high temperature [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, **59**(11): 2997~3004
- 7 Zhao Jinting, Tong Zhengrong, Yang Xiufeng *et al.*. Experimental research of liquid-level sensor using LPFG [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(12): 1777~1779
赵金婷, 童峥嵘, 杨秀峰等. 基于长周期光纤光栅液位传感器的实验研究[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(12): 1777~1779
- 8 Zhu Tao, Rao Yunjiang, Song Yun *et al.*. Highly sensitive temperature-independent strain sensor based on a long-period

- fiber grating with a CO₂-laser engraved rotary structure [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(8): 543~545
- 9 Jin Jing, Wen Shuangchun, Chen Lin. Recent progress in long period fiber grating sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(4): 16~23
金 晶, 文双春, 陈 林. 长周期光纤光栅传感器的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(4): 16~23
- 10 Ignacio Flores-Llamas, Volodymyr Svyryd, Sergei N. Khotiaintsev *et al.*. Design of long-period fiber grating refractometric sensors with linear response by a genetic algorithm [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(7): 1130~1137
- 11 Liu Hongyue, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Long period fiber grating refractive index sensitivity-based reinforcing rebar corrosion sensor in concrete [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806009
刘宏月, 梁大开, 曾 捷等. 基于长周期光纤光栅折射率敏感特性的混凝土结构钢筋锈蚀监测[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806009
- 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 Wang Kaijun, Zhang Jianzhong, Peng Shijun *et al.*. Refractometry based on multimode optical fiber with large core [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 125~128
王凯军, 张建中, 彭石军等. 基于大芯径多模光纤模式干涉的光纤折射率测量[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 125~128
- 14 Tang Chunxiao, Li Enbang, Wang Changle *et al.*. Reflection-type fiber-optic biosensor based on multimode interference [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, **22**(8): 1138~1142
唐春晓, 李恩邦, 王长乐等. 基于多模干涉的反射式光纤生物传感器的研究[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(8): 1138~1142
- 15 Ye Cao, Yinfei Yang, Xiufeng Yang *et al.*. Simultaneous temperature and refractive index measurement of liquid using a local micro-structured fiber Bragg grating [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(3): 030605
- 16 C. Gouveia, P. A. S. Jorge, J. M. Baptista *et al.*. Fabry-Perot cavity based on a high-birefringent fiber Bragg grating for refractive index and temperature measurement [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**(1): 17~21
- 17 Yan Jinhua. Optical fiber sensor for simultaneous measurement of refractive-index and temperature [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, **42**(10): 1697~1699
严金华. 同时测量折射率和温度的光纤传感器[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2008, **42**(10): 1697~1699
- 18 Wang Cheng, Wang Zhengping, Zhang Guosheng *et al.*. A method for simultaneous measurement of liquid refractive index and temperature [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, **4**(5): 52~54
王 成, 王政平, 张国生等. 一种同时测量液体折射率和温度的方法[J]. *光学与光电技术*, 2006, **4**(5): 52~54