

可同时测量蔗糖浓度和温度的 组合光纤光栅传感器

赵明富*, 王念, 罗彬彬, 施玉佳, 曹李华
(重庆理工大学 电子信息与自动化学院, 重庆 400054)

摘要:为了实现蔗糖溶液浓度与温度的同步精确测量,采用组合式光纤光栅,通过线性折射率分区,构成相应的系数矩阵。首先,基于模式耦合理论,采用光纤布拉格光栅(FBG)和长周期光纤光栅(LPFG)形成组合式光纤光栅,实现了双参数测量的光学传感器。此组合式光纤光栅结构中,FBG响应温度测量,LPFG同时响应蔗糖溶液浓度和温度测量。然后,在两个线性折射率范围,即1.33~1.42和1.42~1.44中,校正温度和蔗糖溶液浓度的相关系数。最后,构成两个敏感系数矩阵,来讨论蔗糖溶液浓度和温度同时测量的方法。实验结果表明:蔗糖溶液浓度测量灵敏度达到 -213.5 pm/RIU,温度测量灵敏度达到 117.9 pm/K。因此,组合式光纤光栅传感器作为光化学传感器具有高灵敏度的特性。

关键词:光纤光栅传感器;模式耦合理论;双参数测量

中图分类号:TN253 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20140703.0476

Simultaneous measurement of temperature and concentration of sugar solution based on hybrid fiber grating sensor

ZHAO Ming-fu*, WANG Nian, LUO Bing-bing, SHI Yu-jia, CAO Li-hua

(College of Electronic Information and Automation,
Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

* Corresponding author, E-mail: zmf@cqut.edu.cn

Abstract: In order to accurately measure temperature and concentration of sugar solution at the same time, we presented a hybrid fiber grating sensor. Firstly, based on mode coupling theory, hybrid fiber gratings were formed using fiber Bragg grating and long-period fiber grating, which could realize dual-parameters measurement. In this hybrid fiber grating, FBG response to temperature measurement, while LPFG response to simultaneous measurement of sugar solution concentration and temperature. Then, in two linear refractive index ranges, that is, from 1.33 to 1.42 and from 1.42 to 1.44, we calibrated correlation coefficient of temperature and sugar concentration. Finally, two sensitivity coefficient matrixes were constituted to discuss the method of measuring temperature and sugar solution concentration simultaneously. Experimental results indicate that the measuring sensitivity of temperature reaches 117.9 pm/K, and sugar solution concentration reaches -213.5

收稿日期:2013-10-11;修订日期:2014-02-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51276209, No. 50876120)

pm/RIU. Therefore, the modular fiber grating sensor has high sensitivity property as the photochemical sensor.

Key words: fiber gratingsensing; mode coupling theory; dual parameter measurement

1 引言

基于光纤布拉格光栅(FBG)和长周期光纤光栅(LPFG)结构的传感器适用于应力、负载、弯曲、压力、温度和工程系统震动等方面的测量,因此在传感测量方面得到广泛应用^[1-2]。同时,在生化反应中,溶液浓度与折射率有着较好的线性关系。因此,基于LPFG的折射率传感来测量反应溶液浓度是一种有效的测量方法^[3-4]。

基于LPFG的折射率传感,利用的是LPFG纤芯基模、同向传输的包层模以及辐射模的耦合情况随溶液浓度而产生变化,进而影响基模与包层模的耦合,最终表现为LPFG透射谱的谐振波长产生漂移或波长发生变化。同样LPFG的谐振波长也随着温度发生线性变化,其变化方向和灵敏度与光纤的类型和耦合的阶次密切相关。因此,存在温度与外部介质折射率测量的交叉敏感问题。近年来,随着生物化学等学科的发展,传感器测量精度及各参数间交叉敏感问题已成为研究热点^[5-7]。

因此,传统的LPFG不再是外部介质折射率测量的理想传感器,而采用改进的LPFG结构或LPFG与其他光栅的结合方法,可实现多参数的同时测量。实验证明改进LPFG结构可以克服温度和应力的交叉敏感^[8-10]。H. J. Patrick^[11]等人用一个LPFG和两个FBG实现了对应变和温度的同时测量,应变和温度的测量精度分别为 $\pm 9 \mu\epsilon$ 和 $\pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。本文基于FBG-LPFG组合结构的双参数光学传感器,对蔗糖溶液的浓度和温度进行同时测量,证实了组合式光纤光栅传感器作为光化学传感器具有高灵敏度的特性。

2 理论分析

2.1 模式耦合理论

FBG是纤芯模与反向传输的纤芯模之间的

耦合,根据模式耦合理论,满足相位匹配条件^[12]:

$$\lambda_B = 2n_{co}^{eff} \Lambda_B, \quad (1)$$

式中, λ_B 为FBG设计谐振波长, n_{co}^{eff} 表示纤芯模的有效折射率, Λ_B 表示FBG的光栅周期。

LPFG是纤芯基模与同向传输的包层模之间的耦合,根据模式耦合理论,满足相位匹配条件^[13]:

$$\lambda_{LP} = (n_{co}^{eff} - n_{cl,m}^{eff}) \Lambda_{LP}, \quad (2)$$

式中, λ_{LP} 为LPFG设计谐振波长, n_{co}^{eff} 和 $n_{cl,m}^{eff}$ 分别代表纤芯模和第 m 层包层模的有效折射率, Λ_{LP} 代表LPG的光栅周期。其中 n_{co}^{eff} 和 $n_{cl,m}^{eff}$ 应由各自对应的色散方程求出。

2.2 双参数传感器理论

FBG的谐振峰,也就是FBG背向反射光的中心波长,取决于光栅周期和纤芯有效折射率的大小。外部介质折射率和温度会改变有效折射率及光栅面之间的周期大小。在式(1)的基础上,可以推导出外部介质折射率和温度变化对FBG中心波长的漂移为:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} &= \left(\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{1}{\lambda_B} \frac{\partial \Lambda_B}{\partial T} \right) \Delta T + \\ &\left(\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial n_{ex}} + \frac{1}{\lambda_B} \frac{\partial \Lambda_B}{\partial n_{ex}} \right) \Delta n_{ex} = \\ &A \Delta T + B \Delta n_{ex}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中,第一项表示温度对光栅的影响。第二项表示外界折射率对光栅的影响。其中 A 是温度影响系数, B 是外部介质折射率影响系数。因为FBG光耦合限制在纤芯模,屏蔽了外部介质折射率对包层模的影响,因此FBG从本质上对 Δn_{ex} 的变化是不敏感的,所以 $B=0$ 。

热膨胀会改变光栅周期和折射率,从而导致FBG的波长漂移。这部分由温度变化 ΔT 导致的波长漂移可以表示为^[14]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha_A + \alpha_n) \Delta T, \quad (4)$$

式中, $\alpha_A = (1/\Lambda) (\partial \Lambda / \partial T)$ 为光纤的热膨胀系数

(硅约为 $2.33 \times 10^{-6}/\text{K}$), 而参数 $\alpha_n = (1/n_{\text{eff}})$ ($\partial n_{\text{eff}}/\partial T$) 表示热光系数, 掺锗硅光纤纤芯的这一参数约为 $8.6 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。

LPFG 的谐振波长和损耗峰幅值对外界环境的变化非常敏感, 具有比 FBG 更高的温度、弯曲、

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{LP}}}{\lambda_{\text{LP}}} = \left[\frac{1}{n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl},m}^{\text{eff}}} \frac{\partial(n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl},m}^{\text{eff}})}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda_{\text{LP}}} \frac{\partial\Lambda_{\text{LP}}}{\partial T} \right] \Delta T + \left[\frac{1}{n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl},m}^{\text{eff}}} \frac{\partial(n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl},m}^{\text{eff}})}{\partial n_{\text{ex}}} + \frac{1}{\Lambda_{\text{LP}}} \frac{\partial\Lambda_{\text{LP}}}{\partial n_{\text{ex}}} \right] \Delta n_{\text{ex}} = C\Delta T + D\Delta n_{\text{ex}}, \quad (5)$$

式中, 第一项表示温度对光栅的影响。第二项表示外界折射率对光栅的影响。其中 C 是温度影响系数, D 是外部介质折射率影响系数。

对于组合 FBG-LPFG 结构, 为了同时测量温度和外部介质折射率, 可以用式(6)表示的矩阵关系同时分离出温度和外部介质折射率变化量。

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{\text{B}} \\ \Delta\lambda_{\text{LP}} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & D \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta n_{\text{ex}} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中, 系数 A 、 C 和 D 可以由组合结构中的 FBG 和 LPFG 分别测量温度和外部介质折射率来确定。因此利用组合光栅可以测量两个被测变量 ΔT 和 Δn_{ex} , 根据式(6)得到:

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta n_{\text{ex}} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta\lambda_{\text{B}} \\ \Delta\lambda_{\text{LP}} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

3 实验

3.1 传感器的制作

用于制作组合 FBG-LPFG 传感器的光纤参数如下: 包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$, 纤芯直径为 $8.3 \mu\text{m}$, FBG 中心波长为 1541 nm , 光栅长度为 14 mm , 3 dB 带宽为 0.15 nm , 边模抑制比为 18.97 dB , 反射率为 87.838% , LPFG 中心波长为 1575 nm , 光栅长度为 2.5 cm , 光栅周期为 $553 \mu\text{m}$ 。通过光纤熔接机将 LPFG 与 FBG 熔接, 损耗 $< 0.01 \text{ dB}$ 组合光栅结构如图 1 所示。组合光纤光栅由 FBG 和 LPFG 组成, 光源从 FBG 端输入, 依次经过短周期光纤光栅和长周期光纤光栅, 从 LPFG 端输出, 测量组合光纤光栅的透射谱。

横向负载灵敏度。LPFG 的耦合模式属于纤芯基模与同向传输的一阶包层模之间的耦合。根据式(2), 可以得到温度和外部介质折射率对 LPFG 共振波长的影响。

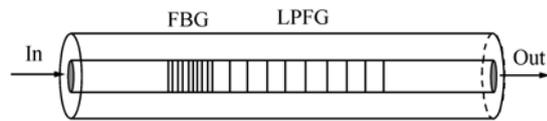


图1 组合式光纤光栅结构原理图

Fig.1 Schematic of hybrid fiber grating structure

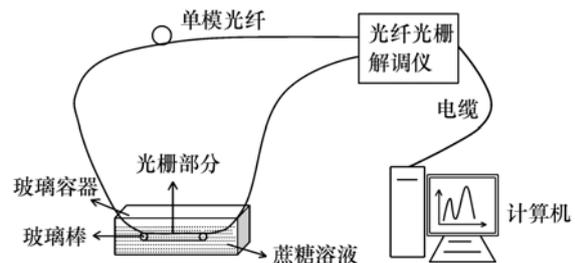


图2 温度与蔗糖浓度同时测量的组合 FBG-LPFG 系统示意图

Fig.2 Schematic of hybrid FBG-LPFG system with simultaneous measurement of temperature and sugar solution concentration

组合光栅系统采用带宽激光光源(波长范围: $1510 \sim 1590 \text{ nm}$), 光纤光栅解调系统(型号: MOI_SM-125、4 通道、波长分辨率: 1 pm 、波长范围: $1510 \sim 1590 \text{ nm}$)。如图 2 所示, “温度-蔗糖浓度”同时测量的组合 FBG-LPFG 系统中, 光纤光栅解调仪一端与组合光栅单模光纤相连, 另一端与计算机相连。组合光纤光栅固定在玻璃棒中, 以避免弯曲和压力传感影响, 玻璃棒完全浸入蔗糖溶液中。组合式 FBG-LPFG 传感器在 $1540 \sim 1580 \text{ nm}$ 波长范围内, 在空气中的透射谱图(常温)如图 3 所示。

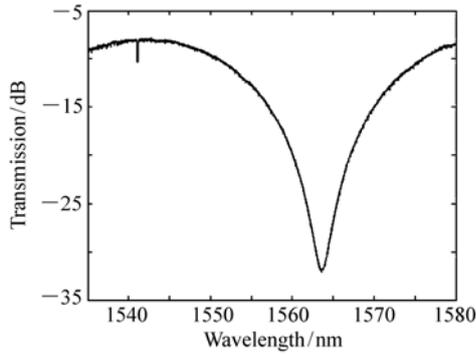


图 3 组合 FBG-LPFG 结构在空气中透射谱图

Fig. 3 Transmission spectra of a hybrid FBG-LPFG structure in the air

图 3 中,在 1 540 nm 处,窄而弱的损耗峰对应布拉格共振波长 λ_B ,在 1 563 nm 处,宽而强的损耗峰对应 LPFG 一阶基模共振波长 λ_{LP1}^{P1} 。

3.2 标定组合光栅温度与蔗糖溶液浓度灵敏度

为了标定组合 FBG-LPFG 结构温度和蔗糖浓度灵敏度,将组合光栅传感器分别置于 20 ~ 70 °C 水中检测温度特性,置于浓度范围为 0% ~ 60% 的蔗糖溶液中检测蔗糖溶液浓度灵敏度。在检测蔗糖溶液浓度灵敏度时,为了达到最小化温度和弯曲交叉敏感,将组合光栅传感器固定在一个玻璃棒上,同时在测量过程中保持稳定的温度,然后将玻璃棒完全浸入蔗糖溶液中。在每次测量前,均采用折光仪测定蔗糖溶液浓度,其测量精确度为 0.01%。在每次测量后,用清水浸泡以清洗去除残余在光纤光栅上的蔗糖溶液。

在温度为 20 ~ 70 °C 范围内,组合 FBG-LPFG 透射谱中 FBG 共振波长漂移量 $\Delta\lambda_B$ 和 LPFG 共振波长漂移量 $\Delta\lambda_{LP1}^{P1}$ 如图 4 所示。

图 5 为组合 FBG-LPFG 光栅 λ_B 和 λ_{LP1}^{P1} 的温度与波长变化关系,从图中可以清楚观察到,当温度上升时, λ_B 和 λ_{LP1}^{P1} 都是呈线性变化向长波方向漂移,而且 LPFG 的温度响应比 FBG 强。因此可以由 LPFG 和 FBG 的温度线性响应来标定敏感矩阵中的温度系数 A 和 C 。

$$A(\Delta\lambda_B/\Delta T) = 8.7 \text{ pm/K}, \quad (8)$$

$$C(\Delta\lambda_{LP1}^{P1}/\Delta T) = 117.9 \text{ pm/K}. \quad (9)$$

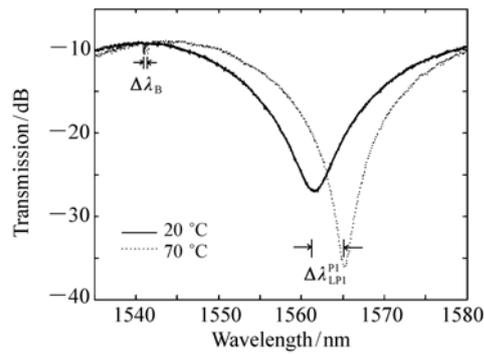


图 4 温度为 20 °C 和 70 °C 时,组合 FBG-LPFG 光纤光栅传感器透射谱图

Fig. 4 Transmission spectra of a hybrid FBG-LPFG structure at the temperatures of 20 °C and 70 °C

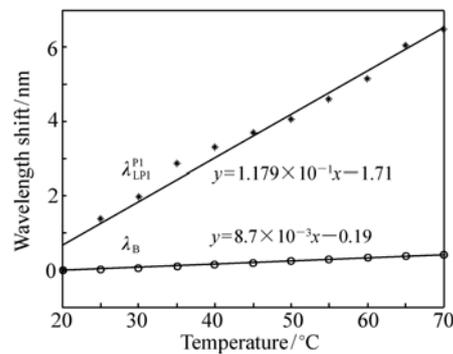


图 5 组合 FBG-LPFG 光纤光栅传感器的温度与共振波长变化关系图

Fig. 5 Wavelength shift versus temperature for hybrid FBG-LPFG fiber grating sensor

同样为了标定组合 FBG-LPFG 光纤光栅结构的蔗糖溶液浓度灵敏度,通过将组合 FBG-LPFG 光纤光栅传感器分别浸入浓度为 0% ~ 60% 的蔗糖溶液中。随着蔗糖溶液浓度的变化,组合 FBG-LPFG 光纤光栅传感器中共振波长 λ_B 和 λ_{LP1}^{P1} 的漂移值如图 6 所示。

由图 6 可以看出,FBG 共振波长的漂移值几乎为零,说明 FBG 对蔗糖溶液浓度的响应几乎是不敏感的。同时,LPFG 共振波长随着蔗糖溶液浓度的增加呈非线性向短波方向漂移,而且在浓度 50% ~ 60% 范围内对蔗糖溶液浓度灵敏度更加明显。

为了确定蔗糖溶液浓度与外部介质折射率的

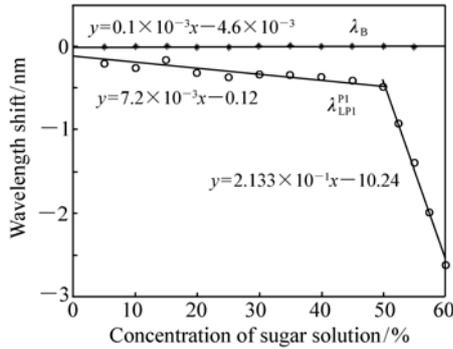


图6 组合 FBG-LPFG 光纤光栅传感器共振波长随蔗糖溶液浓度变化漂移图

Fig.6 Wavelength shift versus sugar solution concentration for hybrid FBG-LPFG fiber grating sensor

对应关系,根据文献^[15]中提供的相关数据,蔗糖溶液浓度与外部介质折射率的关系如图7所示,当蔗糖溶液浓度在0%~60%范围内,折射率范围为1.33~1.44。

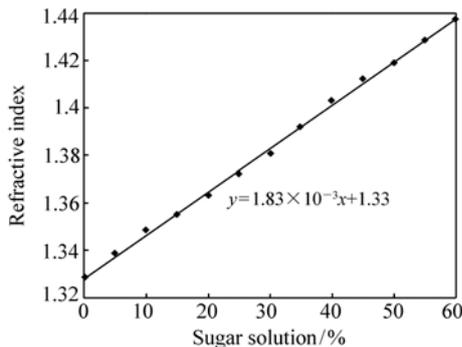


图7 蔗糖溶液浓度与外部介质折射率对应关系图
Fig.7 Relationship between sugar solution and refractive index

当蔗糖溶液浓度在0%~50%范围内,蔗糖溶液浓度与中心波长呈斜率较小的线性趋势;当蔗糖溶液浓度在50%~60%范围内,蔗糖溶液浓度与中心波长呈现斜率较大的线性趋势。因此,综合考虑图6和图7,对应蔗糖溶液浓度和外部介质折射率关系,选取对应蔗糖溶液浓度范围为0%~50%和50%~60%两段区域。那么,两个外部介质折射率线性响应的范围分别为1.33~1.42和1.42~1.44。因此可以由LPFG的蔗糖

溶液浓度线性响应来标定敏感矩阵中的外部介质折射率影响系数 D 。

$$D_{1.33 \sim 1.42} (\Delta\lambda_{LP}/\Delta n_{ex}) = -7.2 \text{ pm/RIU}, \quad (10)$$

$$D_{1.42 \sim 1.44} (\Delta\lambda_{LP}/\Delta n_{ex}) = -213.3 \text{ pm/RIU}. \quad (11)$$

4 同时测量温度和蔗糖溶液浓度

根据两个外部介质折射率线性响应的范围,得到温度和蔗糖溶液浓度相关系数的两个敏感矩阵。其中,在蔗糖溶液浓度为0%~50%,对应折射率范围为1.33~1.42时,蔗糖溶液浓度灵敏度相对较小,得到:

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta n_{ex} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 8.7 \text{ pm/K} & 0 \\ 117.9 \text{ pm/K} & -7.2 \text{ pm/RIU} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\lambda_{LP1}^{pi} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

在蔗糖溶液浓度为50%~60%,对应折射率范围为1.42~1.44时,外部介质折射率灵敏度比较高,得到:

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta n_{ex} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 8.7 \text{ pm/K} & 0 \\ 117.9 \text{ pm/K} & -213.3 \text{ pm/RIU} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta\lambda_{LP1}^{pi} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

根据这两个矩阵计算,可以得到高精度且可同时测量温度和蔗糖溶液浓度的数据。组合FBG-LPFG光纤光栅传感器具有高外部介质折射率灵敏度和温度补偿效果,可以用于光化学传感,根据FBG响应提供的温度补偿作为参考,从LPFG在化学浓度变化的响应中,获得精确的外部介质折射率信息。

5 结论

本文设计了一个组合FBG-LPFG光纤光栅传感器,用于同时测量温度和蔗糖溶液浓度。在两个线性折射率范围,即1.33~1.42和1.42~1.44

中,采用校正温度和蔗糖溶液浓度相关系数构成两个敏感矩阵讨论蔗糖溶液浓度和温度同时测量的方法。采用组合 FBG-LPFG 光纤光栅传感器同时测量蔗糖溶液浓度和温度,结果表明温度灵敏度达到 117.9 pm/K,蔗糖溶液浓度灵敏度高达 -213.5 pm/RIU。

参考文献:

- [1] ERDOGAN T. Fiber grating spectra[J]. *Lightwave Technol.*, 1997, 15(8):1277-1294.
- [2] GEORGES H, ABDELRAFIK M. Characterizations at very high temperature of electric arc-induced long-period fiber gratings[J]. *Optics Communications*, 2002, 208:329-335.
- [3] 赵明富, 韩汐, 王博思, 等. 长周期光纤光栅的折射率梯度相应特性[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2):316-322.
ZHAO M F, HAN X, WANG B S, *et al.*. Response characteristics of refractive-index gradient based on long-period fiber gratings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):316-322. (in Chinese)
- [4] 罗彬彬, 赵明富, 周晓军, 等. 基于结构化光纤 Bragg 光栅的折射率梯度传感器研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3):34-41.
LUO B B, ZHAO M F, ZHOU X J, *et al.*. Research on the refractive-index gradient sensor based on the structured fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3):34-41. (in Chinese)
- [5] 徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. *中国光学*, 2013, 6(3):306-317.
XU G Q, XIONG D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Opt.*, 2013, 6(3):306-317. (in Chinese)
- [6] 李薇, 侯睿, 杨文俊. 基于温度减敏的光纤 Bragg 光栅应变传感器[J]. *仪器技术与传感器*, 2013(5):1-3.
LI W, HOU R, YANG W J, *et al.*. Temperature insensitive fiber grating sensor for strain detection[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2013(5):1-3. (in Chinese)
- [7] 陶蒙蒙, 杨鹏翎, 刘卫平, 等. 高能激光辐照下光纤布拉格光栅响应特性[J]. *中国光学*, 2012, 5(5):544-549.
TAO M M, YANG P L, LIU W P, *et al.*. High temperature-pressure FBG sensor applied to special environments[J]. *Chinese Opt.*, 2011, 19(3):545-552. (in Chinese)
- [8] 祝睿雪, 景锐平, 王雪成, 等. 悬梁臂结构光纤光栅温度自补偿位移传感器实验研究[J]. *电子技术*, 2013(5):70-72.
ZHU R X, JING R P, WANG X CH, *et al.*. Experimental study on cantilever beam structural FBG displacement sensor with temperature self-compensation[J]. *Electronic Technology*, 2013(5):70-72. (in Chinese)
- [9] JOSÉ R. DA CUNHA A, PETRUS A J R. New approach to the strain analysis of bragg grating sensors[J]. *Photonic Sensors*, 2013, 18(1):74-80.
- [10] 蔡安, 印新达, 常晓东, 等. 具有温度补偿的膜片性光纤光栅温度压力传感器[J]. *传感器与微系统*, 2013, 32(4):98-100.
CAI A, YIN X D, CHANG X D, *et al.*. Optical fiber grating temperature and pressure sensor based on diaphragm with temperature compensation[J]. *Transducer and Microsystem Technology*, 2013, 32(4):98-100. (in Chinese)
- [11] PATRICK H J, WILLIAMS G M, KERSEY A D, *et al.*. Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination[J]. *IEEE Photonics Technology Lett.*, 1996, 8(9):1223-1225.
- [12] ZHANG L, ZHANG W, BENNION I. *Fiber Optic Sensors*[M]. Florida: CRC Press, 2002.
- [13] BHATIA V, VENGSARKAR A M. Optical fiber long-period grating sensors[J]. *Opt. Lett.*, 1996(21):692-694.
- [14] 饶云江, 王义平, 朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
RAO Y J, WANG Y P, ZHU T. *Principles and Applications of Fiber Grating*[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [15] LITE D R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*[M]. Florida: CRC Press, 1999.

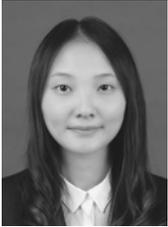
作者简介:



赵明富(1964—),男,重庆人,博士,博士生导师,2003年于西安交通大学获得硕士学位,2007年于重庆大学获得博士学位,主要从事现代光电检测技术及仪器、生化信息获取与智能传感方面的研究。E-mail:zmf@cqut.edu.cn



施玉佳(1987—),男,江西赣州人,硕士研究生,2011年于江西师范大学获得学士学位,主要从事光纤传感技术、光谱分析方面的研究。E-mail: shiyujia126@126.com



王念(1989—),女,湖北宜昌人,硕士研究生,2011年于武汉工程大学获得学士学位,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail:wangnian624@sina.com



曹李华(1987—),男,重庆人,硕士研究生,2011年于南昌大学获得学士学位,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail:clhxx2008@163.com



罗彬彬(1981—),男,广西人,博士,副教授,2003年、2006年、2012年于电子科技大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事光纤传感技术、光信号处理方面的研究。E-mail:luobinbin@cqut.edu.cn