

doi: 10.3788/gzxb20164501.0106005

FBG 滤波的级联 LPFG 温度和折射率传感装置

何如双¹, 钱梦¹, 胡雪芳², 陶卫东¹, 张玲芬¹

(1 宁波大学 理学院, 浙江 宁波 315211)

(2 宁波大学 信息学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 利用长周期光纤光栅具有较高的温度、折射率灵敏度, 以及光纤布喇格光栅具有较高反射效率的特点, 设计了一种基于光纤布喇格光栅滤波的级联长周期光纤光栅温度和折射率传感装置. 利用光纤布喇格光栅的高反射率, 将级联长周期光纤光栅干涉波峰的局部功率反射到功率计中, 实现了温度和折射率的测量. 基于信号叠加原理, 对光纤布喇格光栅滤波的级联长周期光纤光栅温度和折射率传感方法的可行性进行了分析. 将实际测得的功率计示数与温度以及折射率的变化进行二项式拟合, 其确定系数分别为 0.9990 和 0.9959, 表明该传感方法可用于温度和折射率的精确测量. 最后对该装置的稳定性做了一系列的测试, 验证了该传感系统具有较高的稳定性.

关键词: 光纤布喇格光栅; 长周期光纤光栅; 滤波; 温度; 折射率; 准确度; 稳定性

中图分类号: O438

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0106005-5

Cascaded LPFG Temperature and Refractive Index Sensing Method Based on FBG Filter

HE Ru-shuang¹, QIAN Meng¹, HU Xue-fang², TAO Wei-dong¹, ZHANG Lin-feng¹

(1 Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

(2 College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract: Based on the high temperature and refractive index sensitivity of long period fiber gratings (LPFGs) and the high reflection efficiency of the fiber Bragg grating (FBG) filters, a temperature and refractive index sensor was designed, which is a cascaded LPFG based on the FBG filter. The temperature and refractive index were measured by using the FBG filter to reflect partial power of interference wave of the cascaded LPFG into the power meter. In this paper, the feasibility of the cascaded LPFG based on FBG filter temperature and refractive index sensor was analyzed by the signal superposition principle. Then, the binomial fitting was done between the power meter readings and changes of the temperature, and the power meter readings and refractive index. The determination coefficients are 0.9990 and 0.9959 respectively. The high stability of the proposed sensor was also tested. These results show that the cascaded LPFG based on FBG filter temperature and refractive index sensor could be used for the precise measurement of the temperature and refractive index and has a high stability.

Key words: Fiber Bragg grating; Long period fiber grating; Filter; Temperature; Refractive index; Precision; Stability

OCIS Codes: 060.2370; 060.3738; 060.4510; 060.2770

0 引言

自从 Hill 在光纤上刻写第一个光栅结构以来, 光

纤光栅因其体积小、灵敏度高、不受电磁干扰等优点而备受青睐, 在建筑结构、电力系统、生化领域等方面有着广泛的应用^[1-3]. 根据光纤光栅的周期大小可以将光

基金项目: 浙江省新苗人才计划项目基金(No. 2014R405024)资助

第一作者: 何如双(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: rshuanghe@sina.cn

导师(通讯作者): 陶卫东(1969-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学微加工. Email: taoweidong@nbu.edu.cn

收稿日期: 2015-06-25; 录用日期: 2015-09-08

<http://www.photon.ac.cn>

纤光栅分为光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)和长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)两种.虽然FBG与LPFG都具有温度和应变的传感特性,但传感原理与传感特征有很大的区别^[4-5].其中FBG是基于向前传输的纤芯模与向后传输的纤芯模之间产生耦合而形成反射波峰,其反射波峰宽度窄且反射效率高(反射率可达90%以上),在滤波领域得到长足发展^[6-7].而LPFG是由于向前传输的纤芯模与同向传输的包层模之间产生耦合而在透射光谱中形成多个损耗波峰.其损耗波峰较宽,具有更高的温度灵敏度,且有对外界环境折射率灵敏的特点,因此广泛应用于生化传感等领域^[8-9].相比于单个LPFG,级联LPFG能将单个LPFG耦合到包层中的光束再次耦合到纤芯中传播^[10],因此具有更好的光谱特性.本文利用FBG反射率高和滤波宽度窄的优点,结合级联LPFG的温度传感特性及折射率传感特点,设计了一种基于FBG滤波的级联LPFG的温度及折射率传感装置.实验测试表明,该装置对温度和折射率具有较高的灵敏度和准确度,对于光纤光栅传感系统的开发研究具有一定的参考价值.

1 理论分析

级联LPFG是采用两个基本相同的LPFG级联而成的一种光纤光栅结构.当连续光源经光纤纤芯传输通过第一个LPFG时,光能量被分成两部分,一部分继续沿纤芯传输,另一部分被耦合到包层中传输^[11].若两个LPFG相隔距离不是太远,则包层中传输的光衰减有限,在通过第二个LPFG时会被再次耦合到纤芯中传输,与纤芯中传输的光束发生马赫-曾德尔(M-Z)干涉^[12].在外界环境温度或折射率发生变化时,会引起级联LPFG的干涉波峰发生移动.

基于FBG滤波的级联LPFG的温度传感系统如图1,将级联LPFG连接在ASE宽带光源与光环行器1端口之间,FBG连接在光环行器的2端口和光谱分析仪(日本Yokogawa公司的AQ6370C)之间.功率计连接在光环行器的3端口用于检测从FBG反射回来的光功率.

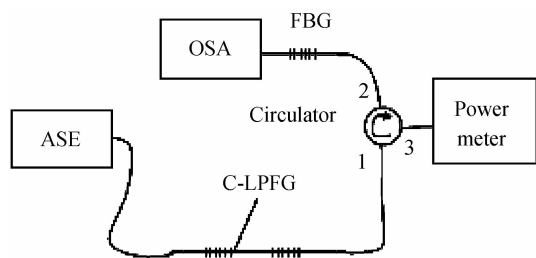


图1 传感装置示意图

Fig. 1 Schematic of sensing experimental setup

设 $T(\lambda)$, $R(\lambda)$ 分别为级联 LPFG 透射谱和 FBG

的反射谱,则级联 LPFG 的透射光经过 FBG 后的反射光功率信号可表示为^[13]

$$I(\lambda) = \alpha \int R(\lambda - \lambda') T(\lambda') d\lambda' \quad (1)$$

式中 α 为传感系统的损耗系数.一般 FBG 的 3 dB 带宽只有 0.2 nm 左右,远小于级联 LPFG 的透射谱宽度,且 FBG 处于稳定的环境中,其反射功率与反射中心波长都恒定不变,故可将其反射谱函数看成一个稳定的常量.则反射光功率函数可表示为

$$I(\lambda) = \alpha T(\lambda') \int R(\lambda) d\lambda' \simeq \alpha T(\lambda') R \quad (2)$$

从式(2)可以看出,该传感系统的功率只与级联 LPFG 的透射谱有关.根据光纤光栅理论知识可知,LPFG 光谱收到外界环境的温度和折射率调制^[13].因为 FBG 谐振波长不变,而级联 LPFG 谐振波长随温度或折射率的变化而移动,从而使 FBG 处光功率发生变化.因此,可以利用此装置可对温度及折射率进行有效测量.

2 温度与折射率测试

取一段普通单模光纤(Corning SMF-28)载氢数天,基于准分子激光器(德国ATL公司,ATLEX-300SI),采用振幅掩模板法在光纤上刻写两个相同的LPFG(周期400 μm ,栅区长度为1.7 cm).利用同一光纤光栅刻写系统,采用相位掩模板法在光纤上刻写一个栅区长度为1 cm的FBG.实验中,基于图1装置,分别利用光谱仪在环形器的1端口测得级联LPFG的透射光谱如图2中的C-LPFG曲线所示,在环形器的3端口测得FBG的反射谱如图2中的FBG曲线所示.将级联LPFG和FBG置于120 $^{\circ}\text{C}$ 的鼓风干燥箱中做退火处理,确保测试时具有较好的稳定性.为使FBG的滤波效果达到最佳,可在FBG两端施加轴向应力,调谐FBG反射波峰的波长,使得FBG的反射谐振峰正好落在级联LPFG的透射峰上.

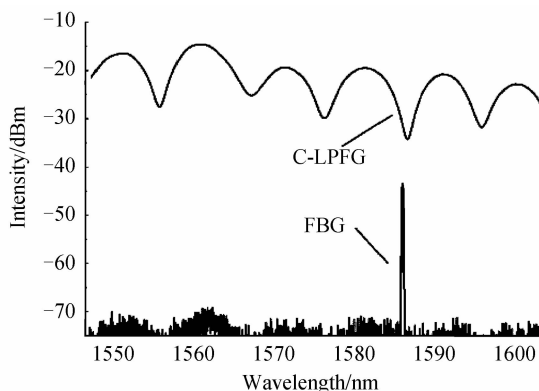


图2 级联 LPFG 的透射谱和 FBG 反射谱

Fig. 2 Transmission spectrum of cascaded LPFG and reflection spectrum of FBG

实验中,若光纤 FC 跳线端面平整,会将级联

LPFG 的透射光部分地反射回来,而这部分反射光也具有温度或折射率传感特性,从而会干扰实验结果.因此,实验中应尽量减少光纤端面的反射,如图 2 中 FBG 曲线所示.

进行基于 FBG 滤波的级联 LPFG 的温度传感实验时,首先将级联 LPFG 放入电控鼓风加热箱中,并逐步升高电控鼓风加热箱的温度.为了减少光纤在加热时产生的形变对光谱造成不利影响,实验中把级联 LPFG 插入内径为 0.3 mm 的毛细玻璃管中,两端不固定.

由图 3 可知,在温度升高时,级联 LPFG 的干涉波峰发生‘红移’,干涉波峰的中心波长从 1 587.72 nm 漂移到 1 589.46 nm.处于 FBG 谐振峰处的级联 LPFG 的谱线逐渐抬高,同时 FBG 谐振波长的谷底随之逐渐抬升.

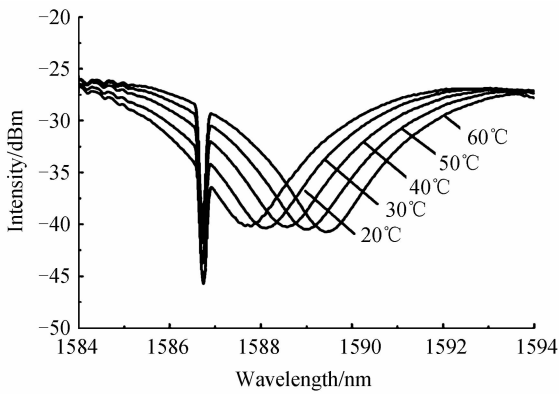


图 3 温度传感透射谱

Fig. 3 Transmission spectra of temperature sensing

采用同一装置,进行基于 FBG 滤波的级联 LPFG 的折射率传感实验.将装置 2 中的级联 LPFG 拉直并两端固定在液体盒子上,利用不同浓度的 NaCl 溶液作为折射率测量标本,并控制环境温度为恒温 20°C.

由图 4 中可看出在 NaCl 浓度增大时,级联 LPFG 透射光谱发生‘蓝移’,干涉波峰的中心波长从 1 584.78 nm 漂移到 1 584.20 nm.级联 LPFG 处于 FBG

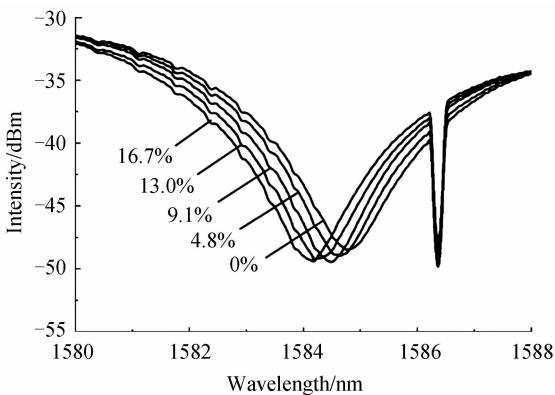


图 4 折射率传感透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of RI sensing

谐振波长处的强度逐渐增大,同时 FBG 的谷底极小值逐渐变大.实验中不同浓度的 NaCl 溶液对应的折射率可利用阿贝尔折射仪精确测量.

3 结果分析

在测试温度和折射率时,通过改变 FBG 两端轴向应力,使 FBG 的反射峰中心波长分别为 1 586.79 nm 和 1 586.33 nm.从图 3 和图 4 可以看出,FBG 的透射峰深度大、宽度窄,因此分析级联 LPFG 的透射光谱在 FBG 中心波长处的强度时可以近似地认为其为 FBG 波峰两侧强度的均值.级联 FBG 透射光谱在 FBG 中心波长处的强度与温度的变化关系如图 5.

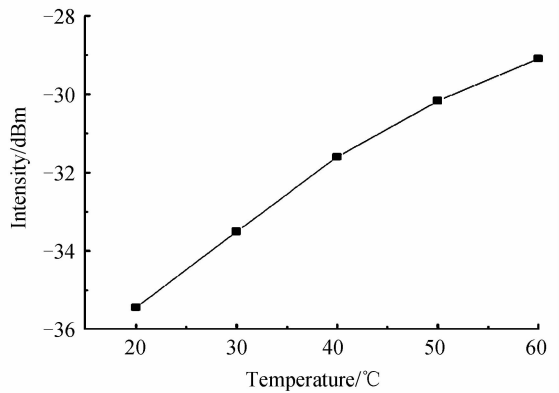


图 5 温度传感时级联 LPFG 在 FBG 处的透射光强
Fig. 5 Cascaded LPFG transmission intensity in the FBG Temperature sensing

级联 FBG 透射光谱在 FBG 中心波长处的强度与外界环境折射率的变化关系如图 6.

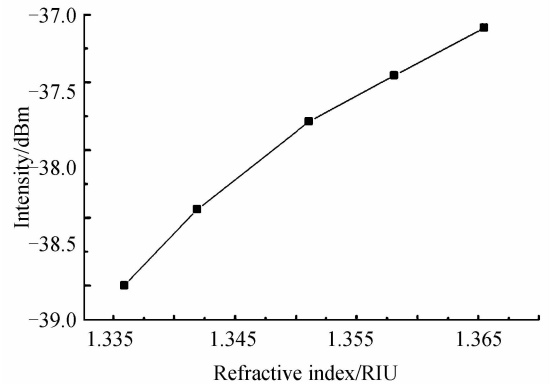


图 6 折射率传感时级联 LPFG 在 FBG 处的透射光强
Fig. 6 Cascaded LPFG transmission intensity in the FBG Temperature sensing

从图 5 和图 6 可以看出,级联 LPFG 透射光谱在 FBG 中心波长处的强度与温度和折射率变化呈良好的非线性变化关系,随温度和折射率的增加,透射光强度变强.实验中,可以将图 1 中环形器的 3 端口接上功率计,根据功率计的示数读取实验中测得的实际功率.

实验中利用功率计在不超出测量范围内对温度和折射率做了进一步测试,分析基于 FBG 滤波的级联

LPFG 的温度及折射率传感方法的精确度,结果如图 7 和图 8. 对于温度传感和折射率传感,功率计的变化分别为 $\Delta I \approx 550$ nW 和 $\Delta I \approx 280$ nW. 根据其测量的范围大小,可计算出该系统对温度和折射率的灵敏度分别为 13.8 nW/°C 和 $5\,960$ nW/RIU. 对于分辨率为 1 nW 的功率计来说,该传感系统可以测得的最小温度和折射率分别为 7.2×10^{-2} °C 和 1.7×10^{-4} RIU.

同时为了找到功率计示数与温度及折射率的最佳关系,将功率计示数进行二项式拟合^[14],结果如图 7 和图 8. 其与温度的确定系数为 0.9990 ,与折射率的确定系数为 0.9956 .

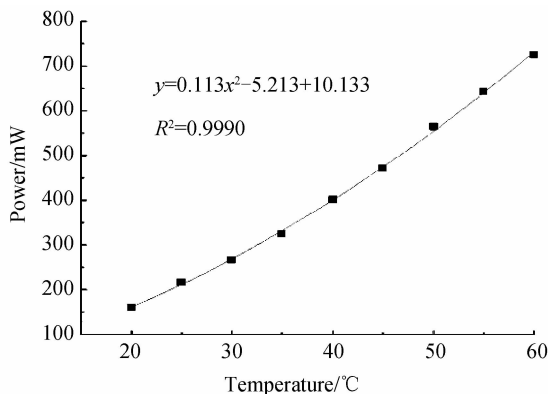


图 7 利用功率计测量温度

Fig. 7 Measure the temperature by power meter

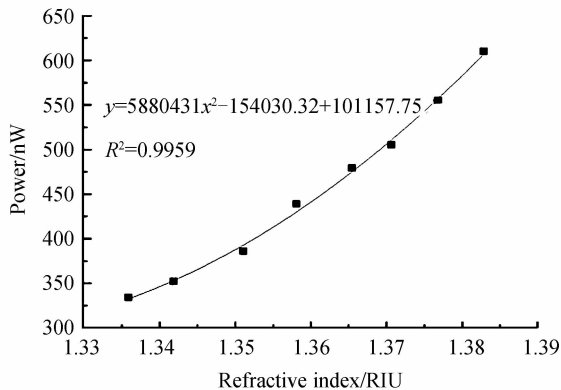


图 8 利用功率计测量折射率

Fig. 8 Measure the refractive index by power meter

通过图 7 和图 8,可知基于 FBG 滤波的级联 LPFG 的温度及折射率传感方法具有较高的精确度.

4 稳定性测试

实验中对该装置对温度和折射率测量的稳定性做了一系列的测试^[15].

图 1 所示传感系统中的级联 LPFG 置于恒温箱中,并设置恒温箱的温度为 60 °C. 待功率计示数上升至稳定后,继续观察其示数的变化,并每间隔 30 s 记录一次示数,持续监测 60 min. 结果如图 9.

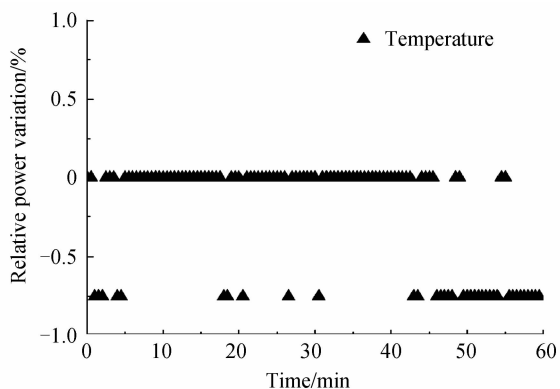


图 9 温度传感稳定性测试

Fig. 9 Stability test of temperature sensing

将如图 1 所示传感系统中的级联 LPFG 置于水中^[15],再将水同级联 LPFG 一起放入 40 °C 的恒温箱中. 待功率计示数稳定之后继续监测 60 min,并每隔 30 s 记录一次,结果如图 10.

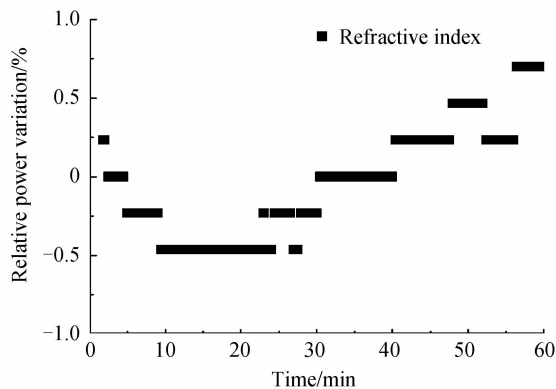


图 10 折射率传感稳定性测试

Fig. 10 Stability test of refractive index sensing

从图 9 和图 10 可以看出,在传感系统中水的温度和折射率稳定时,功率计的示数也基本相对稳定. 若以开始计时时的功率计示数为参考标准,则在 60 min 的时间内,对温度和折射率测量时,功率计的变化示数均在 0.8% 以内波动. 因为实验中所用的鼓风干燥箱的准确度为 0.1 °C,温度起伏为 ± 1 °C,所以对温度稳定性测试时的起伏较大,标准误差为 $S_T = 0.32$ °C. 因为水的比热容较大,温度起伏较小,对应折射率变化也较小,所以功率计示数起伏也比较小,其标准误差为 $S_n = 2.53 \times 10^{-4}$ RIU. 因此,该传感装置对温度和折射率具有较高的测量准确度. 如果需要更高的测量准确度和稳定性,则需对待测环境的温度进行更加严密的控制.

为了进一步体现本文中基于 FBG 滤波的级联 LPFG 的温度传感实验的可行性及优势,表 1 中对比了两种利用光纤光栅结构和功率计测量传感的方法. 由表 1 可以看出,与其它利用功率计测量实验一样,本文同样具有较好的传感性能,可见本文设计的基于

表 1 利用功率计测量折射率的对比

Table 1 The comparison of measuring refraction index by power meter

Reference	[15]	[16]	This paper
Method	Fiber optic taper+FBG	TFBG	FBG+CLPFG
Measurement range	1.331~1.425	1.372~1.453	1.336~1.383
Sensitivity	4.67 dB/RIU	1.91 mW/RIU	6.00 mW/RIU
Resolution	2.1×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.7×10^{-4}
Fitting method	Second-order	Third-order	Second-order
Fitness	0.994	0.999	0.996

FBG 滤波的级联 LPFG 的温度传感实验具有一定的新颖性和可行性。

5 结论

本文设计了一种基于 FBG 滤波的级联 LPFG 温度及折射率传感装置,利用 FBG 的高反射性能将级联 LPFG 干涉波峰的局部功率反射到光功率计中。在理论上分析了实验的可行性,并将实际测得的功率计示数与温度、折射率的关系分别做了二项式拟合,结果表明,功率计示数与温度、折射率的确定系数分别为 0.999 0 和 0.995 9。分别对温度和折射率传感做了稳定性测试,结果表明该装置具有较好的稳定性。

参考文献

- [1] JANG H S, PARK K N, KIM J P, *et al.* Sensitive DNA biosensor based on a long-period grating formed on the side-polished fiber surface[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(5): 3855-3860.
- [2] YANG J, HUANG J, LI X, *et al.* High-sensitivity long-period fiber grating sensor with SAN/cryptophane A for coal mine gas detection[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, **11**(8): 080601.
- [3] CHEN H, GU Z. Design of a gas sensor based on a cladding-reduced long period fiber grating coated with a sensitive film [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, **124**(3): 219-224.
- [4] PILLA P, TRONO C, BALDINI F, *et al.* Giant sensitivity of long period gratings in transition mode near the dispersion turning point: an integrated design approach [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(19): 4152-4154.
- [5] WANG Jie-yu, TONG Zheng-rong, YANG Xiu-feng, *et al.* Simultaneous measurement of temperature and refraction index based on multimode interference and long-period fiber grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(9): 83-87.
王洁玉, 童峥嵘, 杨秀峰, 等. 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[J]. *中国激光*, 2012, **39**(9): 83-87.
- [6] ZHOU Bin, LIU Gou-rong, GUAN Zu-guang, *et al.* An optical sensing system for the concentration of CH₄ based on FBG[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2008, **19**(3): 378-380.
周斌, 刘国荣, 管祖光, 等. 基于 FBG 的 CH₄ 溶度传感系统 [J]. *光电子激光*, 2008, **19**(3): 378-380.
- [7] JU C, CHEN X, ZHANG Z. 40Gbps 100-km SSMF VSB-

- IMDD OFDM transmission experiment based on SSII cancellation and FBG-filtering [C]. *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2014; Tu2G. 6.
- [8] JAMES S W, KORPOSH S, LEE S W, *et al.* A long period grating-based chemical sensor insensitive to the influence of interfering parameters[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(7): 8012-8023.
- [9] YU Xiu-juan, YU Yong-long, ZHANG Min., *et al.* Study on the strain and temperature densing characteristics of FBG packaged by the copper slice [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1325-1328.
于秀娟, 余有龙, 张敏, 等. 铜片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1325-1328.
- [10] RUAN J, QIN Z X, ZENG Q K. A high sensitivity temperature sensor realized with cascaded long period fiber grating-based Sagnac loop[J]. *Optics Communications*, 2014, **31**(9): 42-44.
- [11] WANG X, MADSEN C K. Highly sensitive compact refractive index sensor based on phase-shifted sidewall Bragg gratings in slot waveguide[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(1): 96-103.
- [12] DAI Ji-xiang, YANG Ming-hong, CHEN Yun, *et al.* Hydrogen sensor based on d-shaped fiber bragg grating coated with WO₃-Pd composite films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1003-1007.
代吉祥, 杨明红, 程芸, 等. 基于 WO₂-Pd 复合膜的 D 型光纤光栅氢气传感器[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 1003-1007.
- [13] ZOU H, LIANG D, ZENG J. Dynamic strain measurement using two wavelength-matched fiber Bragg grating sensors interrogated by a cascaded long-period fiber grating [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**(2): 199-203.
- [14] LIU Z, TAN Z, YIN B, *et al.* Refractive index sensing characterization of a singlemode-claddingless-singlemode fiber structure based fiber ring cavity laser[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(5): 5037-5042.
- [15] XIONG Yi-kun, HUANG Xu-guang. Optical fiber sensor for liquid refractive index based on fiber optic taper[J]. *Acta Optical Sinica*, 2009, **29**(7): 1956-1961.
熊贻坤, 黄旭光. 基于熔融拉锥光纤的液体折射率传感器 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1956-1961.
- [16] MIAO Yin-ping, LIU Bo, ZHAO Qi-da. Refractive index sensor based on measuring the transmission power of tilted fiber Bragg grating[J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, **15**(3): 233-236.