

仅用一根局部微结构长周期光纤光栅实现温度与弯曲曲率的同时测量*

曹晔 裴庸惟† 童峥嵘

(天津理工大学计算机与通信工程学院, 薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384)

(2013年10月21日收到; 2013年10月24日收到修改稿)

提出并制作了一种具有微结构缺陷的局部微结构长周期光纤光栅, 该光栅是用氢氟酸局部腐蚀长周期光纤光栅, 在包层区域形成局部缺陷得到的. 理论分析与实际制作表明, 局部腐蚀会改变包层模的有效折射率调制, 相当于在缺陷部分引入一个相移, 在其光谱图上表现为在透射阻带中打开一个透射窗口, 形成两个透射阻带和一个透射通带. 在此基础上对其进行了传感实验, 研究了两个透射阻带和透射通带的温度和弯曲特性. 实验结果表明: 透射通带和两透射阻带的温度灵敏度相同, 均约为 $0.05 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$; 而透射通带的弯曲曲率灵敏度 (约为 $-2.61 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$) 小于透射阻带的弯曲曲率灵敏度 (约为 $-4.71 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$), 因此利用敏感矩阵, 可以仅用一根光栅对弯曲曲率和温度双参量进行同时测量.

关键词: 局部微结构长周期光纤光栅, 温度, 弯曲, 双参量测量

PACS: 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.63.024206

1 引言

近年来, 在光纤通信及光传感等领域局部腐蚀长周期光纤光栅 (LPFG) 受到越来越多的关注, 其周期相对于布拉格光栅 (FBG) 较长, 可达几十到几百微米; 在同向传输过程中可以把纤芯基模的能量耦合到各阶包层模之中, 因此其对温度、弯曲、折射率、应变等外界环境变化更为敏感^[1]. 但是由于交叉敏感效应的存在, 多个参量的同时测量已成为光传感领域的一个重要热点. 目前多采用由两种或多种传感器组合来解决交叉敏感的问题^[2-5], 但同时也增加了系统的复杂性及成本. 也有学者采用特种光纤光栅^[6-9], 但其制作成本较高, 在实际应用中也存在一定限制.

2005年, Iadicco等^[10]首次提出并制作了局部微结构光纤光栅, 本课题组在大量研究局部包层腐蚀光栅的基础上, 于2012年完成了局部微结构光纤布拉格光栅 (LMSFBG) 的制作, 并实现了

液体温度和折射率的同时测量^[11]. 2005年 Chung等^[12]提出通过部分腐蚀LPFG包层来制作可调谐的相移长周期光纤光栅. 2012年, 赵红霞等^[13]提出了利用半腐蚀LPFG来实现对温度与轴向应力的双参量测量. 本文将LMSFBG的制作方法应用于LPFG, 制作了局部微结构长周期光纤光栅 (LMSLPFG), 研究了其弯曲曲率和温度的传感特性, 提出了仅用一根LMSLPFG实现弯曲曲率和温度同时测量的方案. 对比文献^[13], 本文采用的LMSLPFG可以用飞秒激光器刻蚀的方法制作, 简单灵活, 且可以实现多种微结构缺陷, 得到多种光谱特性, 从而满足不同的应用需求.

2 理论分析与仿真

2.1 理论分析

LMSLPFG是利用氢氟酸(HF)局部腐蚀LPFG的栅区包层得到的, 其结构模型如图1所示.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61107052) 和天津市高等学校科技发展基金 (批准号: 2012) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: peiyongwei@126.com

图中 AB, CD 两段的长度分别为 L_1 和 L_2 , BC 段为局部腐蚀包层引入的缺陷部分, 直径为 D_E , 长为 L_E .

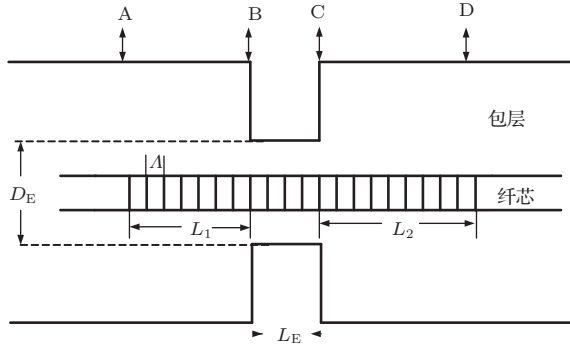


图1 LMSLPFG 的结构模型图

腐蚀导致 BC 段包层局部变薄, 可将这种变化视为对 LPFG 的包层进行局部调制, 造成 B, C 两点的折射率产生突变, 同时引起该区域的纤芯与包层的耦合模式发生改变, B, C 两点为包层模中折射率调制不连续的两点, 根据相移理论可知折射率调制的突变会产生相移, 这样在 LPFG 的透射阻带中会打开一个透射通带, 类似于相移光栅, 相移大小可以通过 (1) 式计算得出:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff-cl}} L_E, \quad (1)$$

式中 λ 为中心波长, $\Delta n_{\text{eff-cl}}$ 为腐蚀引起的包层模有效折射率的变化, 可以看出, 透射通带是可以调节的, 其大小由缺陷的长度、深度和位置来决定。

LPFG 中的有效折射率变化可用 (2) 式描述:

$$\delta n_{\text{eff}}(z)$$

$$F_i = \begin{bmatrix} \exp(i(\bar{\beta} + \pi/\Lambda)) & 0 \\ 0 & \exp(-i(\bar{\beta} - \pi/\Lambda)) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\gamma\Delta z) - \frac{i\delta}{\gamma} \sin(\gamma\Delta z) & \frac{ik_{\text{co-cl}}}{\gamma} \sin(\gamma\Delta z) \\ \frac{ik_{\text{co-cl}}}{\gamma} \sin(\gamma\Delta z) & \cos(\gamma\Delta z) + \frac{i\delta}{\gamma} \sin(\gamma\Delta z) \end{bmatrix},$$

$$\gamma = \sqrt{k_{\text{co-cl}}^2 + \delta^2}, \quad \bar{\beta} = \frac{1}{2} \left(\beta_{\text{co}} - \beta_{\text{cl}}^i - \frac{2\pi}{\Lambda} \right), \quad \delta = \frac{1}{2} (\beta_{\text{co}} - \beta_{\text{cl}}^i) - (\pi/\Lambda),$$

β_{co} 和 β_{cl}^i 是第 i 段光栅段中纤芯和包层模的传输常数. 而对于 LMSLPFG 来说, $i = 1, 3$ 为未腐蚀段, $i = 2$ 为中间的缺陷部分.

2.2 仿 真

仿真参数设置: LPFG 的平均有效折射率变化 $\delta n_{\text{eff}} = 1.8 \times 10^{-5}$, 中心波长 λ 为 1567 nm. 包层和纤芯直径分别为 125 μm 和 8.3 μm , 栅区长

$$= \overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) \left\{ 1 + v \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 表示一个周期内的有效折射率变化, v 表示折射率调制深度, $\phi(z)$ 描述的是与光栅的相移或啁啾有关的附加相位.

根据耦合模理论, 在 LPFG 中, 纤芯基模与第 m 阶包层模的相位匹配条件为

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

其中 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 分别是纤芯基模和第 m 阶包层模的有效折射率, Λ 为栅格周期.

纤芯和包层的模式耦合方程可表示为

$$\frac{dA_{\text{co}}(z)}{dz} = \kappa_{\text{co-cl}} A_{\text{cl}} e^{j2\delta z} e^{-j\Phi}, \quad (4)$$

$$\frac{dA_{\text{cl}}(z)}{dz} = -\kappa_{\text{co-cl}} A_{\text{co}} e^{-j2\delta z} e^{j\Phi}, \quad (5)$$

其中 $A_{\text{co}}(z)$ 和 $A_{\text{cl}}(z)$ 分别表示纤芯基模和同向包层模的幅度, δ 是模式间的失谐量, $\kappa_{\text{co-cl}}$ 是耦合常数, Φ 是光栅的相位.

当光栅中折射率变化不连续时, 可采用传输矩阵法将 LPFG 分成 n 段折射率变化调制的光栅段, 其场振幅可表示为

$$\begin{bmatrix} A_{\text{co}}(z) \\ A_{\text{cl}}(z) \end{bmatrix} = F_N \cdot F_{N-1} \cdots F_2 \cdot F_1 \times \begin{bmatrix} A_{\text{co}}(0) \\ A_{\text{cl}}(0) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中,

度为 3.42 cm, $\Lambda = 570 \mu\text{m}$, $\Delta n_{\text{eff}}^{\text{co-cl}} = 0.002749$, $L_E = 1 \text{ cm}$, $D_E = 97.2 \mu\text{m}$.

根据 (1) 式可以计算出相移改变量 $\Phi = 0.98 \pi$, 利用 matlab 仿真得到原始 LPFG 和腐蚀后 LMSLPFG 的光谱图, 分别如图 2 和图 3 所示.

由图 2 和图 3 可以明显看出, 由于局部腐蚀, 在 LPFG 的透射阻带中打开一个透射窗口, 形成左右两个透射阻带.

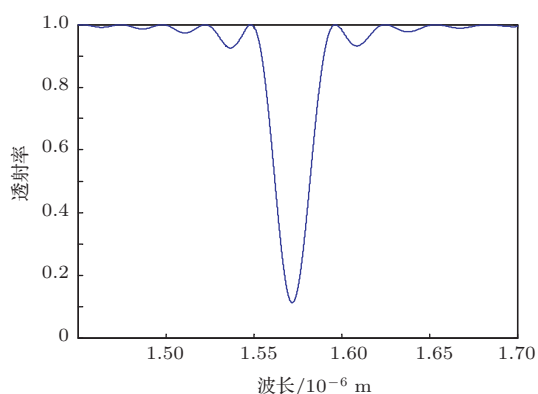


图2 原始LPFG的光谱仿真图

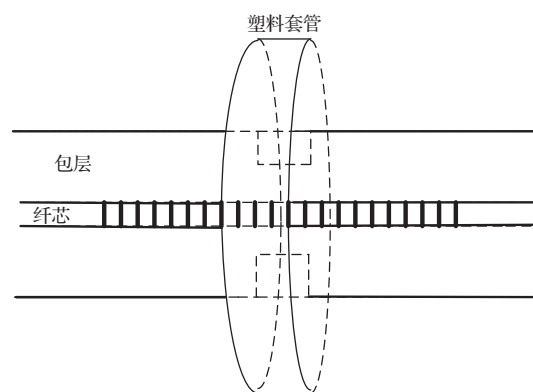


图4 腐蚀装置

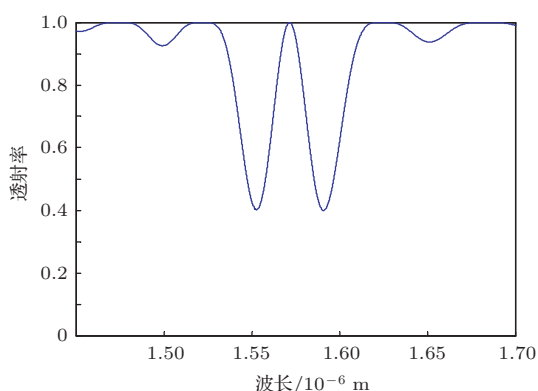


图3 LMSLPFG的光谱仿真图

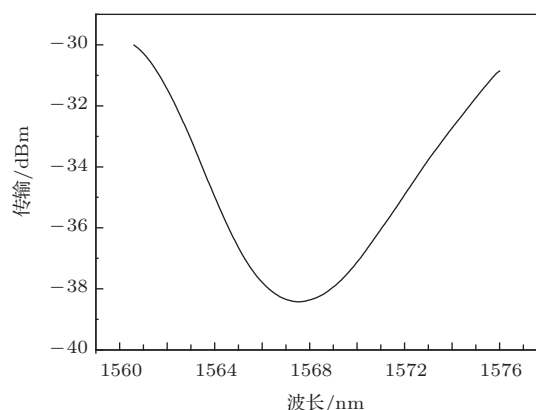


图5 原始光谱图

3 实验与结果分析

3.1 制作实验

实验选用长周期光纤光栅的参数为: 栅格周期为 $570\ \mu\text{m}$, 栅区长度为 $3.42\ \text{cm}$, 纤芯直径为 $8.3\ \mu\text{m}$, 包层直径为 $125\ \mu\text{m}$, 用长为 $1\ \text{cm}$, 直径为 $0.4\ \text{cm}$ 的塑料套管套在栅区中央, 如图4所示. 把浓度为20%的HF注射到套管中, 经过40 min的腐蚀, 得到LMSLPFG. 以宽带光源作为输入, 用光谱分析仪观察LMSLPFG的光谱图. 图5为实验所选用LPFG的原始光谱图, 图6为制作的LMSLPFG的光谱图.

从图6中可以看到经过40 min的腐蚀, 在LPFG的透射阻带中打开一个透射通带, 透射阻带的峰值分别为 $1566.64\ \text{nm}$ 和 $1581.70\ \text{nm}$, 透射通带的峰值为 $1572.29\ \text{nm}$.

对比仿真结果图3, 图6所示的实验结果不是太理想, 主要是因为实际腐蚀条件不够精确, 腐蚀区域没有严格在栅区中央, 且腐蚀而成的缺陷的截面不会是严格的矩形.

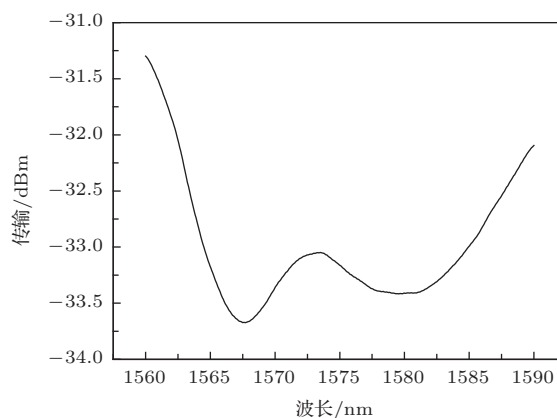


图6 LMSLPFG光谱图

3.2 弯曲特性实验

我们用LMSLPFG对弯曲曲率进行了测量, 实验装置如图7所示. 因为高频 CO_2 激光脉冲写入的LPFG弯曲时对于不同弯曲方向表现出不同的灵敏度^[14-16], 本实验中只讨论对于弯曲曲率的灵敏度, 因此选取固定的弯曲角度来进行实验. 将制作好的LMSLPFG固定在半径不同的同心圆上, 保证其两端处于自由状态, 避免轴向拉伸应变对实验产生影响.

图8为LMSLPFG左右两透射阻带和透射通带对应不同曲率的变化曲线,由图可以看出,波长变化与曲率近似成线性关系(如果限定弯曲曲率范围为 1 m^{-1} — 4 m^{-1} ,则线性拟合度更好,高达0.99以上),其中左右两透射阻带灵敏系数相同,约为 -4.71 nm/m^{-1} ,而中间的透射通带由于腐蚀的原因导致包层直径变小,包层模有效折射率降低,对于弯曲的灵敏度也相应减小^[17,18],其灵敏系数约为 -2.61 nm/m^{-1} .

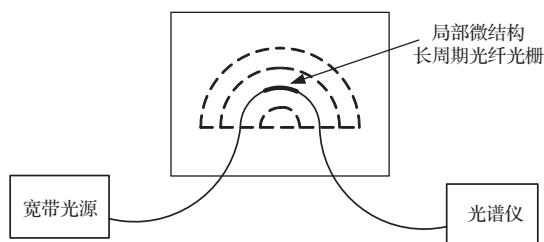


图7 弯曲特性的实验装置

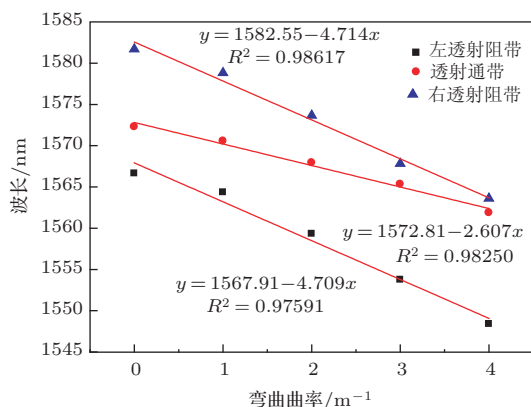


图8 LMSLPFG的弯曲特性曲线

3.3 温度特性实验

将LMSLPFG固定在多用恒温板上,实验装置如图9所示。设置恒温板温度变化范围为 $20\text{—}80\text{ }^{\circ}\text{C}$,每隔 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 记录一次数据,其温度拟合曲线如图10所示。

由以上实验可以看出,LMSLPFG的左右两透射阻带和透射通带对温度的变化成线性关系,其灵敏系数基本相同,均为 $0.05\text{ nm/}^{\circ}\text{C}$ 。

3.4 实验结果分析

根据弯曲曲率与温度特性实验的测量结果可以得出,LMSLPFG的透射通带和两透射阻带对于温度和弯曲曲率的灵敏度不同,因此可以通过敏感矩阵得出波长漂移量与外界环境温度和弯曲曲率

的对应关系.敏感矩阵如(7)式所示:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{C1} \\ K_{T2} & K_{C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 分别为透射阻带和透射通带的改变量, ΔC 为弯曲曲率的改变, ΔT 为温度的改变, K_{T1} , K_{C1} 分别为透射阻带对于温度和弯曲的敏感系数, K_{T2} 和 K_{C2} 是透射通带对于温度和弯曲的敏感系数。

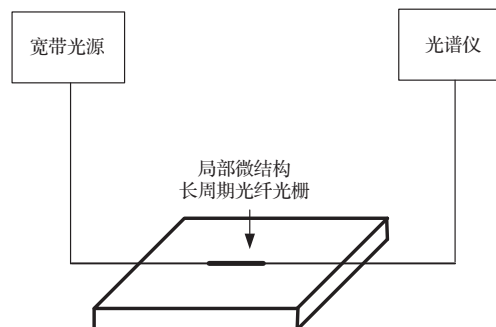


图9 温度特性的实验装置

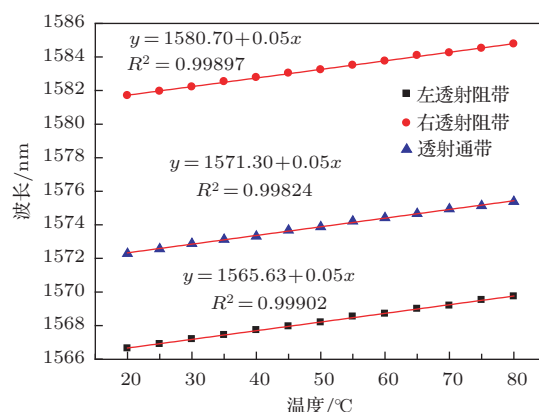


图10 LMSLPFG的温度特性曲线

由(7)式可以得出温度和弯曲曲率的变化:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} K_{C2} & -K_{C1} \\ -K_{T2} & K_{T1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中 $D = K_{T1}K_{C2} - K_{T2}K_{C1}$ 。

将实验测得的敏感系数代入(8)式,可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta C \end{bmatrix} = \frac{1}{0.105} \begin{bmatrix} -2.61 & 4.71 \\ -0.05 & 0.05 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

由(9)式可知,当温度和弯曲曲率同时变化时,通过测量LMSLPFG的透射阻带和透射通带的波长变化量,代入(9)式即可分别算出对应温度与曲率的变化量,即实现温度和弯曲曲率的同时测量。

4 结 论

本文基于耦合模理论和传输矩阵法对 LMSLPFG 进行了理论研究, 完成了 LMSLPFG 的制作实验, 并测试了其温度特性及弯曲曲率变化的特性. 结果表明, 局部改变 LPFG 的包层结构会在其透射谱的透射阻带中打开一个透射通带, 类似于相移光栅; 两透射阻带和透射通带对于温度的变化成线性关系且敏感系数基本相同, 约为 $0.05 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$; 对于弯曲曲率的变化也近似线性关系, 但两透射阻带的敏感系数较大, 约为 $-4.71 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$, 透射通带的敏感系数约为 $-2.61 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$. 根据以上特性, 可使用单根 LMSLPFG 实现对温度和弯曲曲率的双参量测量. LMSLPFG 具有灵敏度高、制作灵活简单、生产成本低等特点, 且不易受电磁等干扰, 因此, 在生物化学、医药化学及海底石油管道的安全监测等领域中有着巨大的应用空间.

参考文献

- [1] Hiroshi T, Kei U 2009 *Sensors* **9** 4559
- [2] Sun A, Wu Z 2012 *Opt. Engng.* **51** 04402
- [3] Chan C C, Tan K M, Tay C M, Tjin S C 2004 *Proc. SPIE* **5590** 105
- [4] Zhou Y, Zhou W, Chan C C, Wong W C, Shao L Y, Cheng J, Dong X Y 2011 *Opt. Commun.* **284** 5669
- [5] Sun J, Chan C C, Tan K M, Dong X Y, Shum P 2007 *Sensor Actuat. A: Phys.* **137** 262
- [6] Han Y G, Dong X, Lee J H, Lee S B 2006 *Opt. Lett.* **31** 2839
- [7] Gander M J, MacPherson W N, McBride R, Jones J D C, Zhang L, Bennion I, Blanchard P M, Burnett J G, Greenaway A H 2000 *Electron. Lett.* **36** 120
- [8] Miao Y P, Liu B, Zhao Q D, Tian S, Sun H 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 2388 (in Chinese) [苗银萍, 刘波, 赵启大, 田爽, 孙华 2009 中国激光 **36** 2388]
- [9] Falate R, Frazao O, Rego G, Ivanov C V, Kalinowski H J, Fabris J L, Santos J L 2007 *Meas. Sci. Technol.* **18** 3123
- [10] Iadicicco A, Cusano A, Campopiano S, Cutolo A, Giordano M 2005 *IEEE Sens. J.* **5** 1288
- [11] Cao Y, Yang Y F, Yang X F, Tong Z R 2012 *Chin. Opt. Lett.* **10** 030605
- [12] Chung K W, Yin S 2005 *Microw. Opt. Techn. Lett.* **45** 18
- [13] Zhao H X, Cheng P H, Bao J L, Shen H K, Li L, Du H J 2012 *Chin. J. Lasers* **2** 1 (in Chinese) [赵洪霞, 程培红, 鲍吉龙, 沈鸿康, 李磊, 杜惠舰 2012 中国激光 **2** 1]
- [14] Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L, Zhu T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1432 (in Chinese) [王义平, 饶云江, 冉曾令, 朱涛 2003 物理学报 **52** 1432]
- [15] Zhao H X, Bao J L, Chen Y 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 1681 (in Chinese) [赵洪霞, 鲍吉龙, 陈莹 2008 光学学报 **28** 1681]
- [16] Wang Y P 2003 *Ph.D. Dissertation* (Chongqing: Chongqing University) (in Chinese) [王义平 2003 博士学位论文 (重庆: 重庆大学)]
- [17] Hu A Z, Rao Y J, Nie Z L, Niu Y C 2004 *Acta Opt. Sin.* **33** 916 (in Chinese) [胡爱姿, 饶云江, 聂知理, 牛永昌 2004 光学学报 **33** 916]
- [18] Deng H Y 2008 *M. S. Dissertation* (Chengdu: University of Electronics Science and Technology of China) (in Chinese) [邓洪有 2008 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]

Simultaneous measurement of temperature and bending-curvature using a single local micro-structured long period fiber grating*

Cao Ye Pei Yong-Wei[†] Tong Zheng-Rong

(Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

(Received 21 October 2013; revised manuscript received 24 October 2013)

Abstract

A local micro-structured long period fiber grating (LMSLPFG) is proposed and investigated experimentally. The LMSLPFG is fabricated by using hydrofluoric acid (HF) to partially etch a standard long-period fiber grating (LPFG), thereby forming a local defect in the cladding. The theoretical analysis and experimental results show that partially etching will change the effective refractive index modulation in the cladding mode, which equivalently introduces a phase shift into the part of defect and manifests, in the spectrogram, as opening a transmission window between the stopbands, forming two transmission stopbands and one transmission passband. On this basis we study the temperatures and bending characteristics of the two stopbands and one passband. The results show that the temperature sensitivities of the two stopbands and one passband are all approximately $0.05 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$; the bending sensitivity of the passband ($2.61 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$) is less than those of two stopbands ($4.71 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$). Thus by using the sensitive matrix, we can simultaneously measure the curvature and temperature, with only one grating used.

Keywords: LMSLPFG, temperature, curvature, double-parameter-measurement

PACS: 42.81.Pa

DOI: 10.7498/aps.63.024206

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61107052) and the Tianjin University's Science and Technology Development Fund Projects, China (Grant No. 2012).

[†] Corresponding author. E-mail: peiyongwei@126.com