

半腐蚀长周期光纤光栅光谱特性研究

赵洪霞 程培红 鲍吉龙 沈鸿康 李磊 杜惠舰

(宁波工程学院电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315016)

摘要 基于长周期光纤光栅(LPFG)包层有效折射率与包层半径的良好相关性,提出一种半腐蚀长周期光纤光栅的新颖设计。将一根长周期光纤光栅分成等长的两部分,用 HF 酸腐蚀其中的一半区域,此时整根 LPFG 可看成具有不同谐振波长的两个半长度 LPFG 的级联。利用传输矩阵方法和三层介质光纤模型的色散方程分析了该种 LPFG 的光谱特性:随着腐蚀段包层半径的减小,两个分裂峰谐振波长之间距离增大,且模式越高间距越大。同时实现了应变和温度的同步测量,得到应变和温度的传感精度分别为 $\pm 8.9 \mu\epsilon$ 和 $1.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。因此半腐蚀 LPFG 传感器可为解决 LPFG 交叉敏感问题提供有效方法。

关键词 光栅;长周期光纤光栅;半腐蚀;包层半径;应变;谐振波长间距

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1205005

Research on Spectral Characteristic of a Semi-Etched Long-Period Fiber Grating

Zhao Hongxia Cheng Peihong Bao Jilong Shen Hongkang Li Lei Du Huijian

(Electronic and Information Engineering College, Ningbo University of Technology,
Ningbo, Zhejiang 315016, China)

Abstract A new scheme about a semi-etched long-period fiber grating (LPFG) is proposed based on the excellent relation between cladding effective refractive index and cladding radius. A LPFG is divided into two sections with equal length. One section is eroded using HF acid. So the two sections can be regarded as two LPFGs with different resonant wavelengths. Spectral characteristics of this in-series LPFG are analyzed using dispersion equation of three-layer dielectric fiber. It is found that the distance between two resonant wavelengths increases with the decrease of the cladding radius, and the distance also increases with higher-order mode. At the same time, strain and temperature are measured synchronously, and the sensing precisions of strain and temperature are $\pm 8.9 \mu\epsilon$ and $1.4 \text{ }^\circ\text{C}$, respectively. Semi-etched long period fiber grating can solve the cross sensitive problems of different physical quantities effectively.

Key words gratings; long-period fiber grating; semi-etched; cladding radius; strain; space of resonance wavelength

OCIS codes 050.2770; 200.0200; 310.6010

1 引言

自从 1996 年 Bhatia 等^[1]在光纤上成功写入长周期光纤光栅(LPFG)以来,其以滤波范围宽、背向反射低、温度和折射率等传感特性灵敏度高及易于制造、价格低等优点在光纤通信和传感领域备受青睐^[2~4]。但 LPFG 在具有多个参量高灵敏度的同时,其交叉敏感特性却成为实际应用中的障碍,即当

用 LPFG 测量某一待测参量时,由于环境变化引起的其他非待测参量的变化同样会引起谐振波长的漂移或透射峰幅值的变化,而 LPFG 本身不具分辨功能,从而使测量精度大打折扣。因此,解决 LPFG 在传感测量中的交叉敏感问题尤其重要。已提出的解决方案有两类:1)两种及两种以上传感器进行组合^[5~7],这不但增加系统的复杂性而且成本高;2)单

收稿日期:2012-08-04;收到修改稿日期:2012-08-15

基金项目:国家自然科学基金(61154003)资助课题。

作者简介:赵洪霞(1970—),女,硕士,副教授,主要从事光纤传感和光纤通信等方面的研究。

E-mail: zhx-1228@163.com

个传感器法^[8~11],此方法系统复杂成本高^[9],且制作复杂^[8,10,11],仅适用于一些特殊的应用场合,不具普适性。

本文基于 LPFG 包层有效折射率与包层半径的良好相关性,提出一种半腐蚀 LPFG 的新颖设计。所设计的 LPFG 不但具有双 LPFG 的功能,而且结构紧凑,既可以减小光栅之间的熔接,又可以大大减小传感头的体积,对解决 LPFG 实际传感测量中的交叉敏感性具有一定的参考价值。

2 半腐蚀 LPFG 结构模型

半腐蚀 LPFG 结构模型如图 1 所示,长为 L 的 LPFG 被分成 L_1 和 L_2 等长的两段, L_2 段包层被腐蚀掉一部分。 n_0 为纤芯折射率, n_1 为包层折射率, n_2 为外界环境折射率,通常情况下空气的折射率 $n_2 = 1$, a_0 为纤芯半径, a_1 和 a_2 分别为 L_1 段和 L_2 段包层半径, $a_1 > a_2$ 。

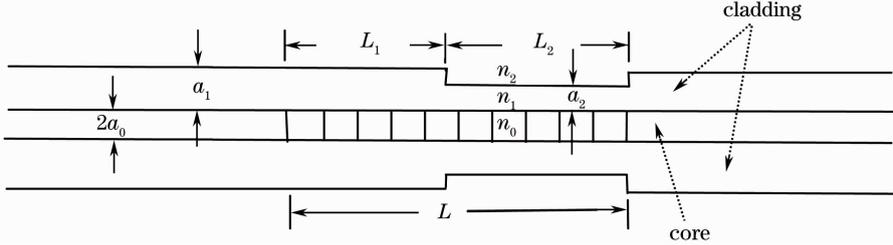


图 1 半腐蚀 LPFG 结构模型

Fig. 1 Structural model of the semi-etched LPFG

3 理论分析

3.1 半腐蚀 LPFG 的传输透射率

根据模式耦合理论,长为 L 的 m 阶均匀 LPFG 可用传输矩阵 \mathbf{T}_K 表示^[12]

$$\mathbf{T}_K^m = \begin{bmatrix} \cos(sL) + \frac{i\Delta\beta\sin(sL)}{2s} & \frac{iK}{s}\sin(sL) \\ \frac{iK^*}{s}\sin(sL) & \cos(sL) + \frac{i\Delta\beta\sin(sL)}{2s} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $s = \sqrt{K^2 + \frac{\Delta\beta^2}{4}}$, $\Delta\beta = \beta_0 - \beta_1 - \frac{2\pi}{\Lambda}$, $K = \frac{\pi\delta_n}{\lambda}$,

$\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda}n_{\text{eff}}^{\text{co}}$, $\beta_1 = \frac{2\pi}{\lambda}n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 。 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 分别为纤芯基模和 m 次包层模的有效折射率, δ_n 为平均有效折射率调制系数, K 为耦合系数, Λ 为光栅周期, λ 为光波长。

半腐蚀 LPFG 传感器可等效看作长度为 L_2 的腐蚀 LPFG 和长度为 L_1 的未腐蚀 LPFG 的串联。根据传输矩阵方法,同向传输的纤芯基模和第 m 次包层模经历半腐蚀 LPFG 后,纤芯基模和包层模的幅值为

$$\begin{bmatrix} a_{\text{co}}(L) \\ a_{\text{cl}}(L) \end{bmatrix} = \mathbf{T}_K(L_1, n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \mathbf{T}_K(L_2, n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}$ 为两段光栅之间的界面矩阵, $b_{11} =$

$$b_{22} = \frac{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}{2n_{\text{eff}}^{\text{co}}}, b_{12} = b_{21} = \frac{n_{\text{eff}}^{\text{co}} + n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}{2n_{\text{eff}}^{\text{co}}},$$

经公式处理得半腐蚀 LPFG 传感器纤芯基模的透射率为

$$T(\lambda) = |(t_{11}b_{11} + t_{12}b_{21})t_{13} + (t_{11}b_{12} + t_{12}b_{22})t_{23}|^2, \quad (3)$$

式中 $t_{11} = \cos(s_1L_1) + \frac{i\Delta\beta_1\sin(s_1L_1)}{2s_1}$, $t_{12} = \frac{iK_1}{s_1}\sin(s_1L_1)$, $t_{13} = \cos(s_2L_2) + \frac{i\Delta\beta_2\sin(s_2L_2)}{2s_2}$, $t_{23} = \frac{iK_2}{s_2}\sin(s_2L_2)$ 。

3.2 半腐蚀 LPFG 纤芯基模和包层模的色散方程

对普通的单模光纤,纤芯基模有效折射率只与纤芯和包层材料折射率及纤芯半径有关,而与包层半径无关。所以半腐蚀光栅 L_1 段和 L_2 段纤芯有效折射率相同,表征单模弱导光纤纤芯基模有效折射率的色散方程为^[13]

$$V\sqrt{1-b} \frac{J_1(V\sqrt{1-b})}{J_0(V\sqrt{1-b})} = V\sqrt{b} \frac{N_1(V\sqrt{b})}{N_0(V\sqrt{b})}, \quad (4)$$

式中 J_0 和 J_1 为 0 阶和 1 阶第一类贝塞尔函数, N_0 和 N_1 为 0 阶和 1 阶修正的第二类贝塞尔函数, $V = \frac{2\pi a_1}{\lambda} \sqrt{n_0^2 - n_1^2}$ 为归一化频率, $b = [(n_{\text{eff}}^{\text{co}})^2 - n_1^2 / (n_0^2 - n_1^2)]$ 为模式的归一化有效折射率。

包层有效折射率采用 Tsao 等^[14] 提出的三层光纤的色散方程

$$p_v^2 + 2x_1 x_2 (n_2^2/n_1 n_3) (2/\pi \alpha_2 U_2^2)^2 + x_1^2 x_2^2 [J(r_v/\alpha_2 U_2 + N p_v) - (N q_v/U_2 + s_v/\alpha_2 U_2^2)] \times [J(s_{23} r_v/\alpha_2 U_2 + N p_v) - s_{21} (N q_v/U_2 + s_{23} s_v/\alpha_2 U_2^2)] = x_1^2 (J p_v - s_{21} q_v/U_2) (J p_v - q_v/U_2) + x_2^2 (N p_v + s_{23} r_v/\alpha_2 U_2) (N p_v + s_{23} r_v/\alpha_2 U_2), \quad (5)$$

式中各参量表示为 $u_j^2 = k_0^2 n_j^2 - \beta^2, j = 1, 2; k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}; \omega_3^2 = \beta^2 - k_0^2 n_3^2; \alpha_2 = \frac{a_2}{a_1}; s_{21} = \frac{n_2^2}{n_1^2}; s_{23} = \frac{n_2^2}{n_3^2}; J =$

$$J'_v(u_1 a_1)/u_1 J_v(u_1 a_1), N = N'_v(\omega_3 a_2)/\omega_3 N_v(\omega_3 a_2), \nu \text{ 为模式阶数}; p_\nu = \begin{vmatrix} J_\nu(u_2 a_2) & J_\nu(u_2 a_1) \\ Y_\nu(u_2 a_2) & Y_\nu(u_2 a_1) \end{vmatrix}; q_\nu =$$

$$\begin{vmatrix} J'_\nu(u_2 a_2) & J'_\nu(u_2 a_1) \\ Y'_\nu(u_2 a_2) & Y'_\nu(u_2 a_1) \end{vmatrix}; r_\nu = \begin{vmatrix} J'_\nu(u_2 a_2) & J_\nu(u_2 a_1) \\ Y'_\nu(u_2 a_2) & Y_\nu(u_2 a_1) \end{vmatrix}, s_\nu = \begin{vmatrix} J'_\nu(u_2 a_2) & J'_\nu(u_2 a_1) \\ Y'_\nu(u_2 a_2) & Y'_\nu(u_2 a_1) \end{vmatrix}; U_1 = u_1 a_1; U_2 = u_2 a_1;$$

$$W_3 = \omega_3 a_2; v_{12}^2 = k_0^2 a_1^2 (n_1^2 - n_2^2); v_{23}^2 = k_0^2 a_2^2 (n_2^2 - n_3^2); x_1^2 = \frac{n_1^2 U_1^4 U_2^4}{(n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})^2 v_{12}^4}; x_2^2 = \frac{n_3^2 a_2^4 U_2^4 W_3^4}{(n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})^2 v_{23}^4}, \text{其中 } Y \text{ 是第二类贝塞尔函数, } J'_\nu, Y'_\nu, N'_\nu \text{ 表示贝塞尔函数 } J_\nu, Y_\nu, N_\nu \text{ 对总量取一阶微分。}$$

4 理论仿真及讨论

利用 Mathcad2001 计算软件推得 L_1 段 LPFG 的包层有效折射率与波长的关系如图 2 所示。

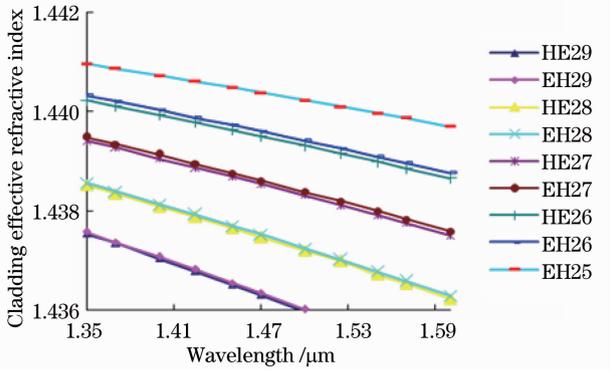


图 2 包层有效折射率与波长之间的关系曲线
Fig. 2 Curves of cladding effective refractive index versus wavelength

图 2 选取的参数为 $n_0 = 1.44661, n_1 = 1.44403, a_0 = 4.15 \mu\text{m}, a_1 = 62.5 \mu\text{m}$ 。由图可知，包层有效折射率与入射光波长呈很好的线性关系，对某一级模式，随着波长的增大，包层有效折射率降低；随着包层模阶数的增加，包层模有效折射率随波长增大而减小，且减小的速度在增加，即曲线斜率变大。

在 L_2 段，当入射光波长为 $1.5 \mu\text{m}$ ，在 $n_0 = 1.44661, n_1 = 1.44403, a_0 = 4.15 \mu\text{m}$ 的情况下，推得包层有效折射率与包层半径的关系如图 3 所示。

由图可知，随着包层半径的减小，包层有效折射率减小，同时随着包层模阶数的增加，包层模有效折射率随波长增大而减小，且减小的速度在增加，即曲线斜率变大。

在入射光波长取 $1.5 \mu\text{m}$ ， $n_0 = 1.44661, n_1 =$

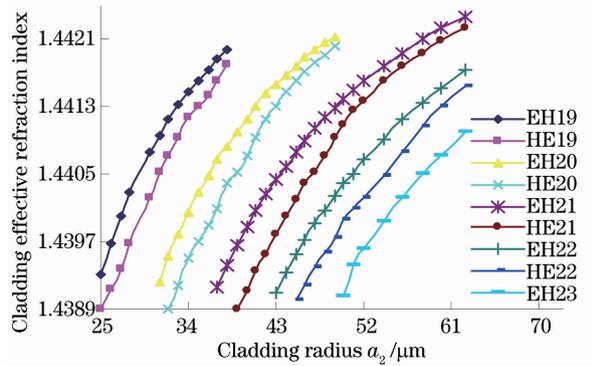


图 3 包层有效折射率与包层半径之间的关系曲线
Fig. 3 Curves of cladding effective refractive index versus cladding radius

$1.44403, a_0 = 4.15 \mu\text{m}, a_1 = 62.5 \mu\text{m}, \Lambda = 500 \mu\text{m}, \delta_n = 2 \times 10^{-5}, L_1 = L_2 = 0.025 \text{ m}$ 的情况下，利用 (3)~(5) 式计算得两段光栅谐振波长间距与包层半径之间的关系如图 4 所示。

由图可知，随着包层半径的减小，两谐振波长间

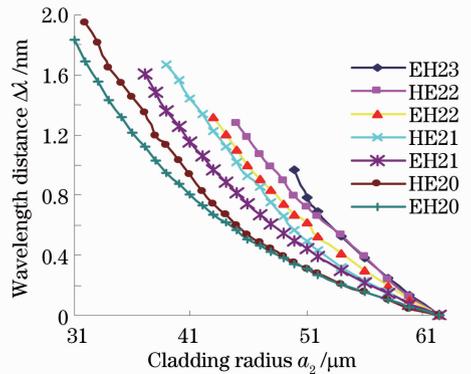


图 4 两段光栅谐振波长间距与包层半径之间关系曲线
Fig. 4 Curves of resonance wavelength distance versus cladding radius

距增大,当包层半径为 $31\ \mu\text{m}$ 时, EH_{23} 模两谐振波长间距可达 $1.8\ \text{nm}$ 。

5 实验研究

利用普通单模光纤,经载氢后,采用振幅掩模法

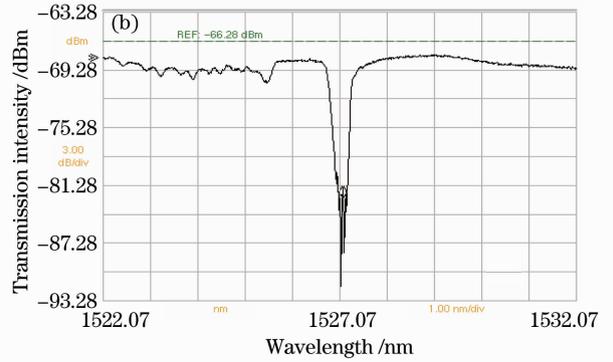
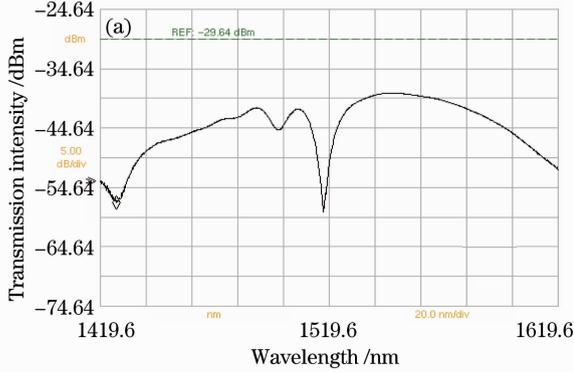


图 5 (a)未腐蚀和(b)半腐蚀 LPG 透射谱

Fig. 5 Transmission spectra of (a) unetched and (b) semi-etched long-period fiber gratings

然后把 LPG 放入由质量分数为 40% 的 HF 酸和纯净水按 1:2 的体积配比得到的溶液中,腐蚀光栅一半长度 $2.5\ \text{cm}$,同时利用光谱仪实时监测腐蚀过程中光栅透射谱的变化。实验发现,随着包层半径减小,透射峰红移,腐蚀 $20\ \text{min}$ 后,把光栅放入纯净水中漂洗晒干后,光谱如图 5(b)所示。由于 LPG 的带宽宽,所以腐蚀段和未腐蚀段光栅谐振波长没有分开。

为了验证半腐蚀 LPG 由两个谐振峰组成,对半腐蚀后的光栅施加轴向应变。轴向应变由步长为 $2.5\ \mu\text{m}$ 的一维微位移台提供(应变与 LPG 所在光

制作了周期为 $350\ \mu\text{m}$ 、长度为 $5\ \text{cm}$ 的普通 LPG,其透射谱如图 5(a)所示,谐振波长为 $1518.9\ \text{nm}$, $3\ \text{dB}$ 带宽为 $7.4\ \text{nm}$ 。为了使之有较好的稳定性,进行了退火处理。

纤的长度满足等式 $\epsilon = \Delta l/l$,实验装置如图 6 所示,图中 SLED 为宽带光源,OSA 为光谱分析仪。当光栅所加应变达到 $42.5\ \mu\epsilon$ 时,半腐蚀光栅谐振波长开始分裂,随着应变量的增大,两个谐振波长的间距增大,如图 7 所示。

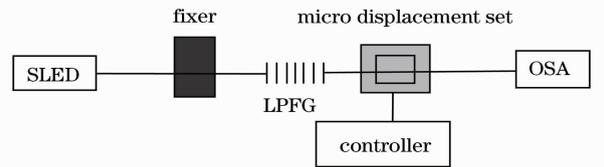


图 6 实验装置图

Fig. 6 Schematic of experimental setup

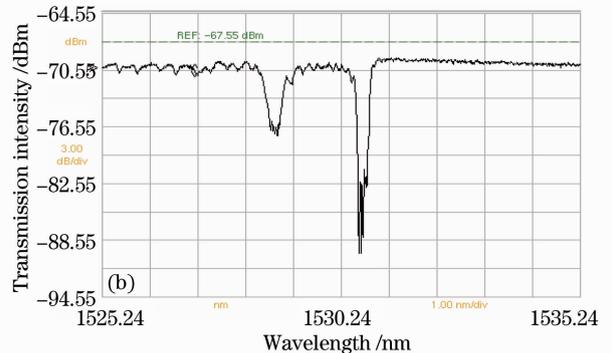
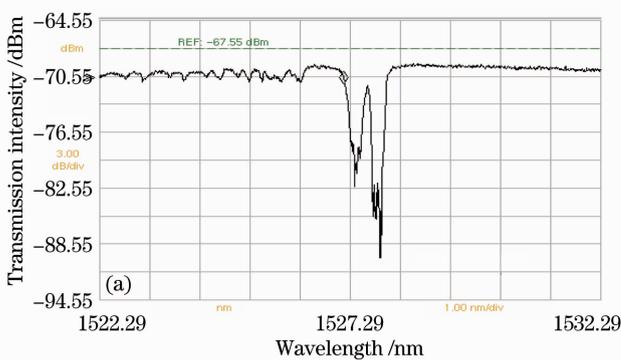


图 7 不同应变下半腐蚀光栅透射谱。(a) $71.4\ \mu\epsilon$; (b) $595.2\ \mu\epsilon$

Fig. 7 Transmission spectra of the semi-etching LPG with different strains. (a) $71.4\ \mu\epsilon$; (b) $595.2\ \mu\epsilon$

由图 7 可知,半腐蚀 LPG 在应变为 $71.4\ \mu\epsilon$ 时,两个谐振波长的间距为 $0.43\ \text{nm}$,当应变增大到 $595.2\ \mu\epsilon$ 时,两个谐振波长的间距可达 $1.82\ \text{nm}$ 。实验结果一方面证实半腐蚀 LPG 谐振波长分裂;

同时说明两个谐振峰应变传感灵敏度不同,包层半径减小,应变灵敏度增大,如图 8(a)所示。 L_1 段的应变传感灵敏度为 $0.0027\ \text{nm}/\mu\epsilon$, L_2 段的应变传感灵敏度为 $0.0054\ \text{nm}/\mu\epsilon$ 。

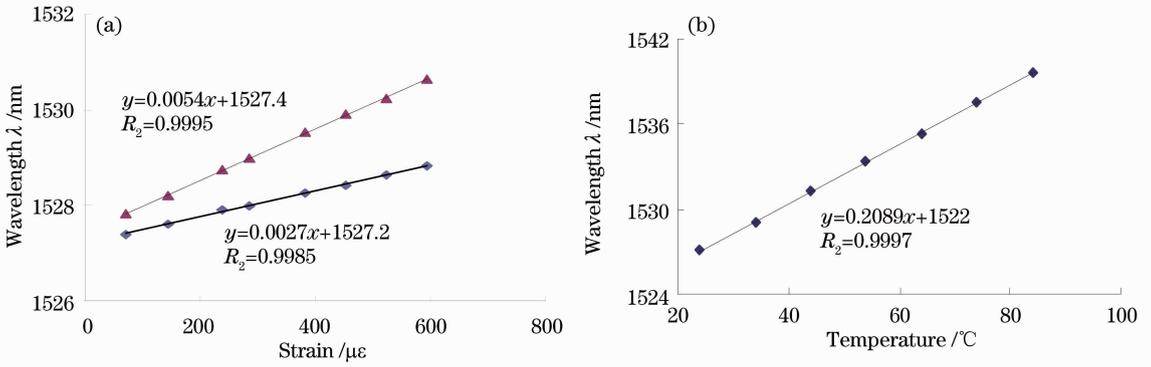


图 8 (a)两个谐振峰波长与微应变之间的关系曲线;(b)谐振峰波长与温度之间的关系曲线

Fig. 8 (a) Resonance wavelength versus strain; (b) resonance wavelength versus temperature

在光栅不弯曲且不受力的情况下对半腐蚀 LPFG 进行温度特性测量。利用温控箱进行温度控制,用光谱仪检测谐振波长的变化。测得谐振波长和温度呈很好的线性关系,且重复性较好,对应关系曲线如图 8(b)所示。随着温度的升高,谐振波长红移,且温度灵敏度为正值,说明所选用的光敏光纤纤芯的热光系数大于包层的热光系数。实验中还发现温度变化时,透射谱形状基本保持不变,只是发生平移,半腐蚀 LPFG 透射峰没有分裂,说明整根光栅未腐蚀和腐蚀两部分的温度传感灵敏度相同,表明半腐蚀 LPFG 的温度灵敏度系数与包层模厚度基本无关,而只与纤芯和包层材料的热光系数有关。同时还发现损耗峰幅值变化很小,最大变化仅为 ± 0.1 dB。

将应变系数 $K_{\epsilon_1} = 0.0027$ 、 $K_{\epsilon_2} = 0.0054$ 和温度系数 $K_{T_1} = K_{T_2} = 0.2089$ 的测量值代入方程

$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} K_{T_2} & -K_{T_1} \\ -K_{\epsilon_2} & K_{\epsilon_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $A = K_{\epsilon_1}K_{T_2} - K_{\epsilon_2}K_{T_1}$, 得到在应变范围 $\Delta\epsilon$ 为 $42.5 \sim 600 \mu\epsilon$, 温度范围 ΔT 为 $24 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 内测量精度可达 $\pm 8.9 \mu\epsilon$ 和 $1.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

6 结 论

设计并制作了新型半腐蚀 LPFG, 采用传输矩阵法和 Tsao 的三层光纤色散方程分析了该光栅的光谱特性。由于该光栅结构的特殊性使谐振波长分裂, 分裂后的谐振波长应变传感灵敏度不同, 而温度传感灵敏度取决于纤芯和包层材料的热光系数, 所以两个分裂峰的谐振波长温度灵敏度系数相同, 可实现应变和温度的同步测量, 实验得到在应变范围 $42.5 \sim 600 \mu\epsilon$ 和温度范围 $24 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 内测量精度可达 $\pm 8.9 \mu\epsilon$ 和 $1.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

该种 LPFG 不但具有双长周期光纤光栅的功能, 可以实现应变和温度的同步测量, 而且结构紧凑, 既可以减小光栅之间的熔接, 又可以大大减小传感头的体积。由于干涉会使光栅损耗峰的缓慢包络内出现一系列的干涉条纹, 两段长度相等但中间有一定间距的 LPFG 的级联, 能有效提高传感灵敏度。但制作完全一样的 LPFG 难度大, 且传感头体积大。

参 考 文 献

- 1 V. Bhatia, A. M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensors [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9): 692~694
- 2 Jiang Mingshun, Feng Dejun, Sui Qingmei. High-precision transverse-pressure sensing system utilizing mechanically-induced long-period fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2855~2858
- 3 姜明顺, 冯德军, 隋青美. 高精度机械感生长周期光纤光栅横向压力传感系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2855~2858
- 4 Zeng Xiangkai, Rao Yunjiang, Liang Kuai. Characteristic analysis of LPFG resonance wavelength shift owing to transverse load[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0106002
- 5 曾祥楷, 饶云江, 梁 快. 长周期光纤光栅谐振波长的横向负载特性分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0106002
- 6 Guan Shouhua, Yu Qingxu, Zheng Jianzhou. Study on torsion characteristics of a new-type long-period fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1996~2000
- 7 关寿华, 于清旭, 郑建洲. 一种新型长周期光纤光栅扭曲特性的研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1996~2000
- 8 An Sun, Zhishen Wu. Hybrid long-period-grating and fiber Bragg grating for cladding-mode-recoupling-based discrimination of temperature and strain [J]. *Opt. Engng.*, 2012, **51**(4): 044402
- 9 Kondiparthi Mahesh, B. N. Shivananju. Simultaneous measurement of strain and temperature with a pair of matched fiber Bragg gratings [C]. *SPIE*, 2010, **7813**: 78130Q
- 10 C. C. Chan, K. M. Tan, K. M. Tan *et al.*. Simultaneous measurement of curvature and temperature for LPFG bending sensor [C]. *SPIE*, 2004, **5590**: 105~110
- 11 Samer K. Abi Kaed Bey, Tong Sun, Kenneth T. V. Grattan. Simultaneous measurement of temperature and strain with long period grating pairs using low resolution detection [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, **144**(1): 83~89
- 12 Hyun-Min Kim, Hochul Nam, Dae Seung Moon *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature with high

- sensing accuracy [C]. Opto-Electronics and Communications Conference, 2009
- 10 V. Bhatia, D. Campbell, Richard O. Claus *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurement with long-period grating [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(9): 648~650
- 11 K. J. Han, Y. W. Lee, J. Kwon *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature incorporating a long-period fiber grating inscribed on a polarization-maintaining fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **16**(9): 2114~2116
- 12 Rao Yunjiang, Wang Yiping, Zhu Tao. Theory and Applications of Fiber Gratings [M]. Beijing: Science Press, 2006. 255
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. 255
- 13 T. Erdogan. Cladding-mode resonances in short and long period fiber grating filters [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(8): 1760~1773
- 14 Charles Y. H. Tsao, David N. Payne, W. Alec Gambling. Modal characteristics of three-layered optical fiber waveguides; a modified approach [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1989, **6**(4): 555~563

栏目编辑: 王晓球