

文章编号: 0258-7025(2007)03-0389-04

截面折变非对称型长周期光栅高温应变特性

王久玲¹, 饶云江^{1,2}, 朱涛^{1,2}

¹ 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044
² 电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054

摘要 研究了基于高频 CO₂ 激光脉冲单侧写入的截面折变非对称型长周期光纤光栅(LPFG)高温特性及其在高温环境中的轴向应变特性。理论和实验表明在 200~1000 °C 之间长周期光纤光栅的谐振峰漂移呈线性趋势;同时,在高温环境中其谐振峰随轴向应变也呈线性漂移,且不同谐振峰的温度和应变灵敏度也不同。利用这种新型长周期光纤光栅独特的高温应变特性可用一根光纤光栅实现对高温和应变的同时测量。

关键词 导波光纤光学; 光纤传感器; 光纤光栅; CO₂ 激光; 高温应变

中图分类号 TN 253; TN 247 **文献标识码** A

High-Temperature and Strain Characteristics of Long Period Grating with Asymmetric Refractive Index Profile in the Cross Section of Fiber

WANG Jiu-ling¹, RAO Yun-jiang^{1,2}, ZHU Tao^{1,2}

¹ Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China

² Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks Technologies of Education Ministry of China, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract The high temperature characteristics of long period fiber grating (LPFG) and its strain characteristics at high-temperature with asymmetric refractive index profile in cross section of fiber induced by high-frequency CO₂ laser pulses on common communication fiber (corning SMF-28) were proposed. Experimental results show that the LPFG resonant wavelength shifts linearly when the temperature changes from 200 °C to 1000 °C, and the resonant wavelength shifts linearly with the increase of strain at high-temperature as well. In addition, the measurement sensitivities of strain and temperature were different because the fundamental guided mode was coupled to the different cladding modes. Simultaneous measurement of high temperature and strain at high-temperature was realized by using this LPFG.

Key words wave-guide fiber optics; fiber sensor; fiber grating; CO₂ laser; high-temperature and strain

1 引言

自 1978 年第一根光纤光栅问世并被用作传感器以来,以光纤光栅为核心器件的传感器技术引起了人们的广泛关注^[1~4]。目前在应变和温度的测量中,常用的方法是用双周期光纤光栅^[5]或一根光纤光栅不同透射波长具有不同温度和应力灵敏度的特

性^[6]来实现对应变和温度的同时测量,但一般很少涉及到 400 °C 以上的高温应变传感;而已有报道的光纤高温传感设备^[7]则存在工艺复杂、系统成本高的缺点。本文通过对以高频 CO₂ 激光脉冲单侧写入的截面折变非对称型长周期光纤光栅(LPFG)高温应变特性的研究,发现在 800 °C 的高温下,长周期光纤光栅的谐振峰波长随轴向应变呈线性漂移,且

收稿日期:2006-06-09; 收到修改稿日期:2006-10-18

基金项目:国家自然科学基金(60537040),教育部重点基金(104210)和重庆市自然科学基金(8415)资助项目。

作者简介:王久玲(1977—),女,四川人,硕士研究生,主要从事光纤通信及传感技术研究。E-mail:wjl490@163.com

导师简介:饶云江(1962—),男,云南人,教授,博士生导师,目前主要从事光纤及微纳传感技术方面的研究。

E-mail:yjrao@cqu.edu.cn

不同谐振峰的温度和应变灵敏度也不同,利用这一特性,可以实现高温环境下对温度应变的同时测量。

2 理论分析

为增加光纤的光敏性,用紫外曝光法制作长周期光纤光栅常选用经过氢载处理的光纤,氢载光纤曝光后光纤中仍然残留有一定的氢,这些残留的氢在高温下会逐步释放,从而导致耦合峰退化,因此紫外光写入的长周期光纤光栅不适合在高温下使用^[8]。与紫外光写入法不同,基于高频 CO₂ 激光脉冲写入的长周期光纤光栅^[9],其写入机制主要是利用了光纤残余应力释放,直接在普通单模光纤上写入,不需要对光纤进行特别的氢载处理,加上长周期光纤光栅是用高能量的 CO₂ 激光在低残余应力的光纤中写入的,制作后其残余应力几乎全部被释放,以至于在高温条件下已无残余应力释放,故具有很好的高温稳定性。实验表明^[10],CO₂ 激光写入的长周期光纤光栅分别在 600 °C, 700 °C, 800 °C, 900 °C, 1000 °C, 1100 °C, 1200 °C 环境中退火 1 h, 每次退火在 10 min 内升温到指定温度,保持一定时间后在 40 min 内冷却到室温,观察长周期光纤光栅传输谱发现,谐振波长和损耗峰幅值几乎没有变化,适合在高温环境中使用。

根据模式耦合理论^[11],长周期光纤光栅把纤芯中传输的基模 LP₀₁ 能量耦合到正向传输的包层模 LP_{0m} 中,第 m 阶包层模的谐振波长为

$$\lambda^m = \Lambda(n_{co} - n_{cl}^m), \quad (1)$$

式中 Λ 为光栅周期, n_{co} 和 n_{cl}^m 分别为纤芯基模和第 m 阶包层模的模式有效折射率。由此看出谐振波长主要由光栅周期以及纤芯和包层的有效折射率差决定。

当长周期光纤光栅产生应变 ϵ 时,由(1)式求得 $\lambda - \epsilon$ 灵敏度 K_ϵ 为

$$K_\epsilon = \frac{d\lambda}{d\epsilon} = \left(n_{co} \frac{d\Lambda}{d\epsilon} + \Lambda \frac{dn_{co}}{d\epsilon} \right) - \left(n_{cl}^m \frac{d\Lambda}{d\epsilon} + \Lambda \frac{dn_{cl}^m}{d\epsilon} \right). \quad (2)$$

由于长周期光纤光栅周期较大,应变引起的周期变化相对较小,可忽略不计^[12],故可认为由应变引起长周期光纤光栅周期的变化为

$$\frac{d\Lambda}{d\epsilon} \approx 0, \quad (3)$$

由弹光效应引起纤芯和包层的折射率变化为

$$\frac{dn_{co}}{d\epsilon} = -p_{co}n_{co}, \quad \frac{dn_{cl}^m}{d\epsilon} = -p_{cl}n_{cl}^m, \quad (4)$$

式中 p_{co} , p_{cl} 分别为纤芯和包层的有效弹光系数。将(3),(4)式代入(2)式得

$$K_\epsilon = \frac{d\lambda}{d\epsilon} = (p_{cl}n_{cl}^m - p_{co}n_{co})\Lambda, \quad (5)$$

当长周期光纤光栅温度改变为 t 时,由(1)式求得 $\lambda - t$ 灵敏度 K_t 为

$$K_t = \frac{d\lambda}{dt} = \left(n_{co} \frac{d\Lambda}{dt} + \Lambda \frac{dn_{co}}{dt} \right) - \left(n_{cl}^m \frac{d\Lambda}{dt} + \Lambda \frac{dn_{cl}^m}{dt} \right). \quad (6)$$

由于纤芯和包层的热光系数 ξ_{co} 和 ξ_{cl} 远大于光纤材料的线性热膨胀系数 α ,因此,耦合波长的漂移主要是由于温度变化导致光纤折射率变化而引起的,与热膨胀引起纤芯、包层半径和光栅周期的变化关系不大,可近似认为由热膨胀引起的长周期光纤光栅周期变化为

$$\frac{d\Lambda}{dt} = \alpha\Lambda \approx 0, \quad (7)$$

由热光效应引起纤芯和包层的折射率变化为

$$\frac{dn_{co}}{dt} = \xi_{co}n_{co}; \quad \frac{dn_{cl}^m}{dt} = \xi_{cl}n_{cl}^m, \quad (8)$$

当 ξ_{co} 和 ξ_{cl} 确定后,耦合中心波长的漂移与温度变化近似成线性关系。将(7),(8)式代入(6)式得

$$K_t = \frac{d\lambda}{dt} = (\xi_{co}n_{co} - \xi_{cl}n_{cl}^m)\Lambda, \quad (9)$$

从理论分析中可知长周期光纤光栅谐振峰的温度和应变灵敏度与光栅纤芯和包层的参数有关。对于不同包层模的有效折射率不同,则温度和应变灵敏度也不同,故可以利用一根长周期光纤光栅同时测量温度和应变。

3 实验及讨论

测量高频 CO₂ 激光脉冲单侧写入的截面折变非对称型长周期光纤光栅的高温应变特性实验装置如图 1 所示。将长周期光纤光栅穿过高温炉并拉直后一端固定在光学平台上,另一端固定在微动台上,并保持整个长周期光纤光栅呈水平放置。实验中,通过改变高温炉的温度或微动台的水平位移,同时以宽带光源为输入,用光谱分析仪监测光谱变化,即可测得长周期光纤光栅在不同温度下的应变特性。

实验选用的长周期光纤光栅在室温自由状态下透射谱如图 2 所示(周期 $\Lambda = 0.5$ mm,周期数 $N = 60$,自由状态下谐振波长为 1572.8 nm,谐振幅值为 24.19 dB)。在 1400~1700 nm 范围内共有三个耦合峰 Pit1, Pit2 和 Pit3。

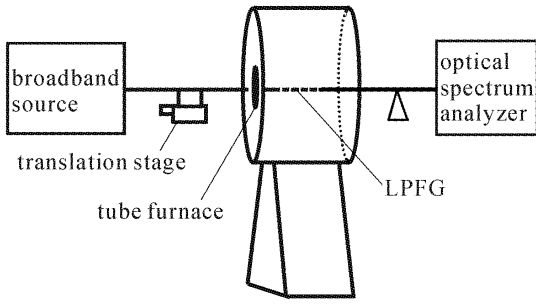


图 1 长周期光纤光栅高温应变传感系统

Fig. 1 Sensing system for measurement of high-temperature and strain response of LPFG

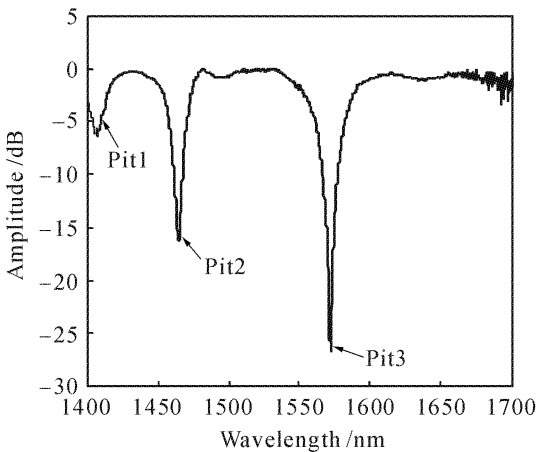


图 2 高频 CO₂ 激光脉冲写入的长周期光纤光栅透射谱

Fig. 2 Transmission spectrum of the LPFG written by high-frequency CO₂ laser pulses

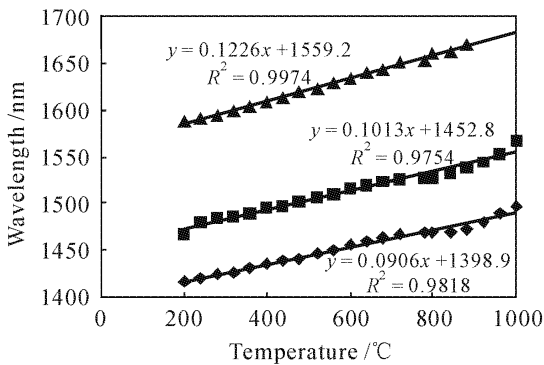


图 3 长周期光纤光栅高温特性图

Fig. 3 High temperature response of the LPFG

首先测量长周期光纤光栅在自由状态下的高温特性。将高温炉从 200 °C 逐渐升温到 1000 °C，观察各耦合峰波长漂移，并每隔 40 °C 记录一次数据，实验结果如图 3 所示。实验表明在 200~1000 °C 之间长周期光纤光栅三个谐振波漂移呈线性趋势。

通过高温特性实验观察得知，耦合峰 Pit3 在 800 °C 时已接近消失，故选取耦合峰 Pit1, Pit2 为观测对象进行高温应变特性测试。实验中分别测量长周期光纤光栅耦合峰 Pit1, Pit2 在 200 °C, 400 °C,

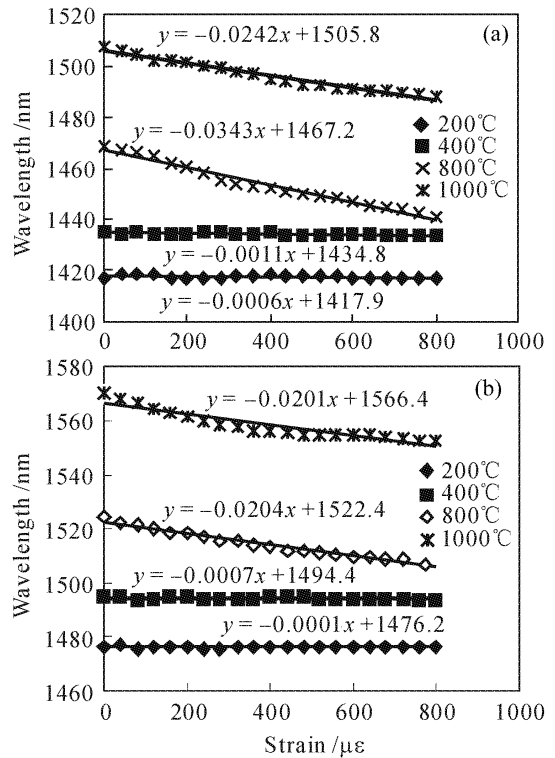


图 4 Pit1(a)和 Pit2(b)高温应变特性图

Fig. 4 Strain response of Pit1 (a) and Pit2 (b) in high temperature

800 °C, 1000 °C 时的应变特性，如图 4, 图 5 所示。由实验可知，当环境温度高于 800 °C 后，长周期光纤光栅的应变灵敏度较高，且线性度较好，与理论分析相符。

利用这种长周期光纤光栅良好的高温应变特性，可实现对高温应变传感的测量。在实际测量中可通过实验标定不同包层模吸收波长的温度和应变灵敏度 $K_{t1}, K_{\epsilon1}$ 和 $K_{t2}, K_{\epsilon2}$ ，从而建立一个关于温度和应变的二元方程组

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = K_{t1}t + K_{\epsilon1}\epsilon \\ \Delta\lambda_2 = K_{t2}t + K_{\epsilon2}\epsilon \end{cases}, \quad (10)$$

通过检测两个波长的偏移 $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ ，解方程组(10)就可以得出温度 t 和应变 ϵ ，即

$$\begin{bmatrix} t \\ \epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{t1} & K_{\epsilon1} \\ K_{t2} & K_{\epsilon2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

如实验选用的长周期光纤光栅，由图 3, 4 的拟合曲线可知 800 °C 时耦合峰 Pit1, Pit2 的波长-温度灵敏度 $K_{t1} = 0.0906, K_{t2} = 0.1013$ ，波长-应变灵敏度 $K_{\epsilon1} = -0.0343, K_{\epsilon2} = -0.0204$ ，代入(11)式可得

$$\begin{bmatrix} t \\ \epsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0906 & -0.0343 \\ 0.1013 & -0.0204 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

4 结 论

通过理论分析和实验证明,基于高频 CO₂ 激光脉冲单侧写入的截面折变非对称型长周期光纤光栅具有良好的高温应变特性,可作为高温应变传感器的核心器件实现对温度和应变的同时测量,可望用于锅炉外壁或发动机等高温环境的应变测试。

参 考 文 献

- 1 Y. P. Wang, Y. J. Rao, Z. L. Ran *et al.*. Bend-insensitive long-period fiber grating sensors [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **41**:233~239
- 2 Jaw-Luen Tang, Shu-Fang Cheng, Wei-Ting Hsu *et al.*. Fiber-optic biochemical sensing with a colloidal gold-modified long period fiber grating [J]. *Sensors and Actuators B*, 2006, **119**: 105~109
- 3 Rao Yunjiang, Mo Qiuju, Zhu Tao. A novel-high sensitivity refractive index sensor with temperature self-compensating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2):264~268
饶云江,莫秋菊,朱涛. 一种新型温度自补偿高灵敏度折射率计[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2):264~268
- 4 Zhenxin Cao, Lenan Wu, Dayong Li. Distributed optical fiber surface plasmon resonance sensors [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(3):160~163
- 5 H. J. Patrick, G. M. Williams, A. D. Kersey *et al.*. Hybrid fiber Bragg grating/ long period fiber grating sensor for strain/ temperature discrimination [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(9):1223~1225
- 6 Huang Rui, Cai Haiwen, Qu Ronghui *et al.*. Separately measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):232~235
黄锐,蔡海文,瞿荣辉等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):232~235
- 7 Zhan Yage, Xiang Shiqing, He Hong *et al.*. Study on high temperature optic fiber grating sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1236~1239
詹亚歌,向世清,何红等. 光纤光栅高温传感器的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1236~1239
- 8 Qingling Wang, Arif Hidayat, Pierre Niay *et al.*. Influence of blanket postexposure on the thermal stability of the spectral characteristics of gratings written in a telecommunication fiber using light at 193 nm [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(8):1078~1083
- 9 Y. J. Rao, T. Zhu, Z. L. Ran *et al.*. Novel long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses and applications in optical fiber communication [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**(1):209~221
- 10 D. D. Davis, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis *et al.*. Very-high-temperature stable CO₂ laser induced long-period fibre gratings [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(9):740~742
- 11 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins *et al.*. Long-period fiber gratings as band rejection filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1):58~65
- 12 Huang Shanglian, Chen Weimin, Rao Yunjiang *et al.*. Fiber optic strain sensors and their applications in structural health monitoring [J]. *Measurement & Control Technology*, 2004, **23**(5):1~5
黄尚廉,陈伟民,饶云江等. 光纤应变传感器及其在结构健康监测中的应用[J]. *测控技术*, 2004, **23**(5):1~5