

文章编号: 0258-7025(2008)06-0884-05

激光脉冲制作的长周期光纤光栅/法布里-珀罗 高温-应变组合传感器

廖 弦¹ 饶云江^{1,2} 冉曾令¹ 邓洪有¹

(¹ 电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054)
² 重庆大学光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要 在很多高温环境应用中, 诸如发动机、飞机和宇航器、复合材料的健康监测, 需要精确测量应变。针对这种场合提出了一种基于激光脉冲制作的长周期光纤光栅/法布里-珀罗(LPFG/F-P)温度-应变组合光纤传感器。该传感器由长周期光纤光栅与光纤法布里-珀罗干涉传感器级联构成, 其中长周期光纤光栅由高频 CO₂ 激光脉冲制作, 用于监测温度; 光纤法布里-珀罗干涉传感器由 157 nm 准分子激光脉冲制作, 用于监测应变。这种新型组合光纤传感器最大的特点是能承受 500 °C 的高温并能在高温环境下实现应变的精确测量, 可望在高温恶劣环境条件下的结构(如飞机发动机)健康监测、复合材料生产过程监测等应用中发挥重要作用。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 长周期光纤光栅; 法布里-珀罗光纤传感器; 激光微加工; 高温; 应变

中图分类号 TP 212.14 **文献标识码** A

Simultaneous Measurement of High-Temperature and Strain Using a Combined Long-Period Fiber Grating/Fabry-Perot Sensor Fabricated by Laser Pulses

Liao Xian¹ Rao Yunjiang^{1,2} Ran Zengling¹ Deng Hongyou¹

(¹ Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks Technology, Ministry of Education, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)
² Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract A novel fiber-optic sensor consisting of a long-period fiber grating (LPFG) and a Fabry-Perot (F-P) interferometric sensor is proposed and demonstrated for simultaneous measurement of high-temperature and strain. The LPFG and fiber F-P sensor form the sensor in cascade. The LPFG written by high frequency CO₂ laser pulses is used for high temperature measurement while the F-P sensor fabricated by 157 nm excimer laser pulses is used for strain measurement. Such combined fiber-optic sensor can stand for high temperature of 500 °C and achieve precise measurement of strain under high temperature environments simultaneously.

Key words fiber optics; optical fiber sensor; long period fiber grating; fiber-optic Fabry-Perot sensor; laser micromachining; high temperature; strain gauge

1 引言

近年来, 基于光纤光栅传感器和光纤干涉传感器的温度及应变多参数同时测量是个非常活跃的研究领域^[1~3], 这类传感器被广泛应用于复合材料、大

型建筑结构(如桥梁等)、宇航飞行器、飞机等的结构健康监测, 以实现所谓的智能结构^[4,5]。其中比较有代表性的方法是用光纤光栅和非本征型光纤法布里-珀罗(F-P)干涉腔构成组合传感器^[6~9]。本文提出了一种新型的组合光纤传感器, 由长周期光纤光

收稿日期: 2007-07-17; 收到修改稿日期: 2007-11-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60537040)资助课题。

作者简介: 廖 弦(1982—), 女, 四川人, 硕士研究生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: liaoxian_vip@163.com

导师简介: 饶云江(1962—), 男, 云南人, 电子科技大学长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感技术与光纤通信器件方面的研究。E-mail: yjrao@uestc.edu.cn (通信作者)

栅(LPFG)和光纤法布里-珀罗干涉腔级联而成。长周期光纤光栅用于监测高温变化,用高频 CO_2 激光脉冲写入^[10],该方法能高效率、高质量地制作长周期光纤光栅,其成本远低于紫外光写入的光纤布拉格光栅(FBG),而温度敏感性却高于光纤布拉格光栅,并能承受比光纤布拉格光栅高得多的温度。光纤法布里-珀罗干涉腔用于监测应变,由157 nm准分子激光器制作。近年来,准分子激光器以其微米级的加工精度和高加工质量在超细微加工等领域显示出不可比拟的优势^[11~14],广泛应用于各个领域。将其引入到光纤传感器件加工中,在光纤端面上制作出微结构的法布里-珀罗干涉腔。和传统的非本征型法布里-珀罗干涉腔的制作方法相比,该方法无需人工手动操作,无需封装,具备可重复性和批量生产能力,克服了光纤端面在装配过程中容易损伤和密封胶粘剂在高温下容易老化从而导致传感器性能下降甚至失效的问题,能工作在恶劣的高温环境。加工的传感器尺寸在微米量级,实现了真正意义上的微结构。虽然 Machavaram 等^[13] 曾在光纤上实现法布里-珀罗腔,利用准分子激光器从侧面将光纤击穿,但这种开放的光纤法布里-珀罗干涉腔相比于本文提出的密封法布里-珀罗腔容易受外界环境的污染。

2 传感器结构

长周期光纤光栅用高频 CO_2 脉冲激光器在标准通信单模光纤中写入,插入长60 mm,内外直径分别为128/300 μm 的石英管中,并在石英管两端用激光点焊技术封装,使长周期光纤光栅在石英管中处于自由状态。法布里-珀罗干涉腔用准分子激光微

加工系统直接制作而成,如图1所示。

事先在掩模上开一个矩形孔,该孔限制了光束的形状并减小光束的物理尺寸以作进一步聚焦。将掩模置于输出激光光束前,掩模与光纤之间放置一个透镜,透镜将通过掩模的矩形光束聚集于光纤端面从而实现矩形微槽的直接加工。微加工系统中的其他器件——衰减器和光束匀化器起着调节激光光束能量和使光束光强分布均匀的作用。聚焦在光纤端面的光束能量密度高达 $12 \text{ J}/\text{cm}^2$,重复频率为20 Hz。光纤吸收大能量、高功率的157 nm紫外光,表面迅速气化引起材料的消融,160个脉冲作用后在光纤端面形成了深度约为40 μm 的矩形微槽。将加工好的光纤与另一根端面平整的单模光纤通过熔接机对接起来,矩形微槽自然就被密封在光纤内部,法布里-珀罗干涉腔加工完成。图2,图3分别为光学显微镜(OLYMPUS DP70 U-TV 0.5 XC-2, 4H01747, Japan)拍摄的光纤端面照片和熔接机(S182A, Fitel, Japan)呈现的光纤透射图。从图上能清晰地看到激光脉冲制作的矩形槽和槽被密封在光纤内部的情况。改变掩模图形,能加工出不同形状的微槽;控制激光脉冲能量密度和个数,能加工出不同深度的微槽。

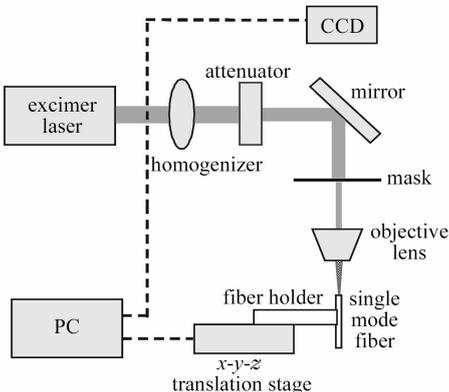


图1 准分子激光微加工系统框图

Fig. 1 Schematic illustration of 157 nm micromachining system

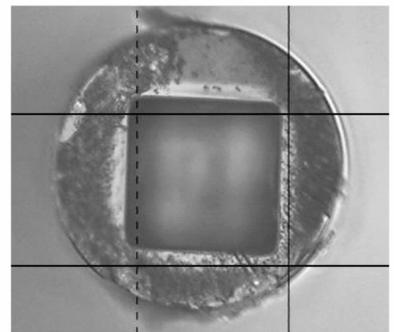


图2 加工的法布里-珀罗干涉腔的结构图

Fig. 2 Micrograph of a fabricated F-P cavity

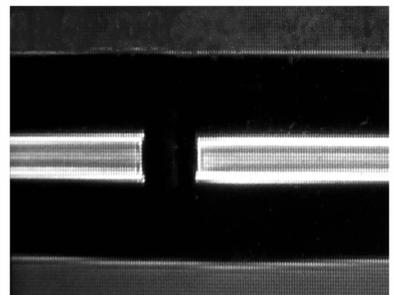


图3 熔接机呈现的光纤内部法布里-珀罗腔透射图

Fig. 3 Transmitted micrograph of a F-P cavity inside a fiber from the fusion splicer

3 测量原理

由长周期光纤光栅的相位匹配条件和模式耦合理论可推导出耦合中心波长 λ 随温度 T 变化的表达式

$$\frac{d\lambda}{dT} = \Lambda \left[\frac{\partial(n_{co} - n_{cl}^m)}{\partial n_{co}} \frac{\partial n_{co}}{\partial T} + \frac{\partial(n_{co} - n_{cl}^m)}{\partial n_{cl}} \frac{\partial n_{cl}}{\partial T} + \frac{\partial(n_{co} - n_{cl}^m)}{\partial r_1} \frac{\partial r_1}{\partial T} + \frac{\partial(n_{co} - n_{cl}^m)}{\partial r_2} \frac{\partial r_2}{\partial T} \right] + \lambda \alpha, \quad (1)$$

式中 Λ 为光栅周期, n_{co} 和 n_{cl}^m 分别为导模和 m 阶包层模的有效折射率, r_1 和 r_2 分别为纤芯和包层的半径。纤芯和包层的热光系数 dn_{co}/dT 和 dn_{cl}/dT 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温度变化引起光纤折射率变化而形成的, 而与热膨胀引起的纤芯、包层半径和光栅周期的变化关系不大。当长周期光纤光栅纤芯和包层的热光系数确定后, $d\lambda/dT$ 近似为一常量, 即耦合中心波长的漂移与温度变化成线性关系。

对法布里-珀罗干涉腔, 由多光束干涉理论, 当相邻两反射光束的相位差满足下列关系时产生条纹

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} n l \cos \theta = k \frac{l}{\lambda} = 2m\pi, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

式中 l 为法布里-珀罗腔的初始腔长。当应变施加于光纤时, 会引起法布里-珀罗腔腔长的变化, 在光谱上表现为干涉条纹的移动。本实验中, 由于干涉条纹的移动非常小, 相位变化远小于 2π , 故可以某一波峰为基准点, 认为移动后的波峰与初始波峰是同一级条纹, 于是新的相位差和条纹条件为

$$\phi' = k \frac{l'}{\lambda} = 2m\pi, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

联合(2), (3) 两式, 可推导出应变与波峰波长变化成线性关系

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{L} = \frac{l' - l}{L} = \frac{l(\lambda' - \lambda)}{\lambda L} = k \Delta \lambda, \quad (4)$$

由理论分析表明, 温度与长周期光纤光栅中心波长变化量 $\Delta \lambda$ 的关系为

$$T = K_{(LPFG)T} \Delta \lambda, \quad (5)$$

$K_{(LPFG)T}$ 为长周期光纤光栅的波长-温度灵敏度。应变与法布里-珀罗干涉条纹极小值 $\Delta \lambda$ 的关系为

$$\epsilon = K_{(F-P)\epsilon} \Delta \lambda, \quad (6)$$

$K_{(F-P)\epsilon}$ 为法布里-珀罗干涉腔的波长-应变灵敏度。在实际高温和高精度测量应用中, 还要考虑应变对长周期光纤光栅以及温度对法布里-珀罗干涉腔的影响。由于长周期光纤光栅被封装在石英管中, 不受

应变影响, 因此, 只需要对(6)式进行修正。由(5)式测出温度后, 再根据下式进行修正

$$\epsilon = K_{(F-P)\epsilon} \Delta \lambda + K_{(F-P)T} \Delta T, \quad (7)$$

$K_{(F-P)T}$ 为法布里-珀罗干涉腔的波长-温度系数。 $K_{(LPFG)T}, K_{(F-P)T}, K_{(F-P)\epsilon}$ 可通过实验标定得到。

4 实验结果

长周期光纤光栅/法布里-珀罗组合光纤传感器实现温度和应变同时测量的实验系统如图4所示。光源和接收设备为高精度光谱分析仪(MOI Si720, USA), 其测量范围为 1510~1590 nm, 波长精度为 2.5 pm。Si720 中的激光扫描光源发出的光通过单模光纤进入长周期光纤光栅/法布里-珀罗组合光纤传感器, 经过法布里-珀罗干涉腔时产生干涉, 反射光经环形器进入 Si720。法布里-珀罗干涉腔的反射谱如图5所示, 条纹为规则的正弦曲线。透射光通过长周期光纤光栅时发生模式耦合, Si720 接收的光谱为法布里-珀罗干涉腔和长周期光纤光栅的混合光谱, 如图6所示。

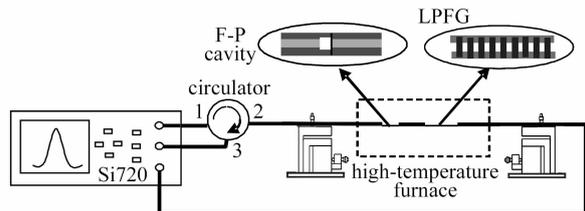


图4 温度和应变同时测量的传感系统

Fig. 4 Sensing system for measurement of high temperature and strain response simultaneously

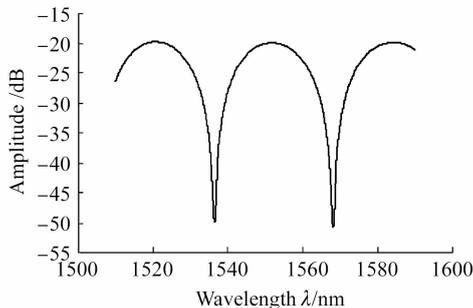


图5 法布里-珀罗干涉腔的反射光谱

Fig. 5 Reflection spectrum of F-P interference cavity

实验过程中, 法布里-珀罗干涉腔和长周期光纤光栅置于高温炉内(Lenton, UK), 并在高温炉两端架设高精度微动台(Newport 561D)对长周期光纤光栅/法布里-珀罗组合光纤传感器施加应变。高温炉的温度分辨率为 1°C , 从 100°C 开始加温, 温度间隔为 50°C , 一直加热到 650°C 。待高温炉温度稳定

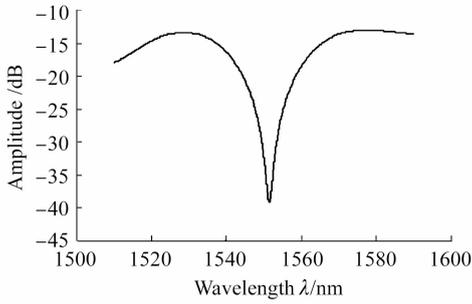


图6 法布里-珀罗干涉腔和长周期光纤光栅的混合谱
Fig. 6 Mixed spectrum of F-P interference cavity and LPFG

在某个温度后,旋转微动台螺杆在传感器两端施加应变,从0开始,25 μm间隔记录一次数据,一直加到500 μm,12个温度点一共取得12组应变数据。Si720实时地监测反射光谱中法布里-珀罗干涉条纹的第一个极小值点波长随应力的变化情况和透射光谱长周期光纤光栅的耦合中心波长随温度的变化情况。

长周期光纤光栅在自由状态下的高温特性如图7所示。可以看出,在高温环境下,长周期光纤光栅的中心波长随温度变化的曲线呈线性,其线性拟合度达到0.9971,和理论分析相符,且波长-温度灵敏度为0.1142 nm/°C,对温度非常敏感,能很好地实

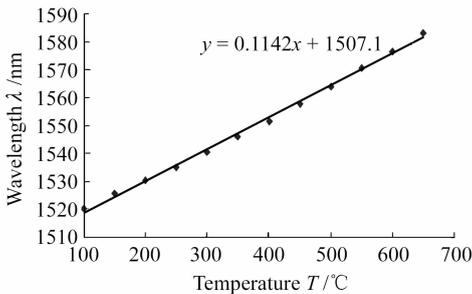


图7 长周期光纤光栅的高温特性
Fig. 7 High temperature response of the LPFG

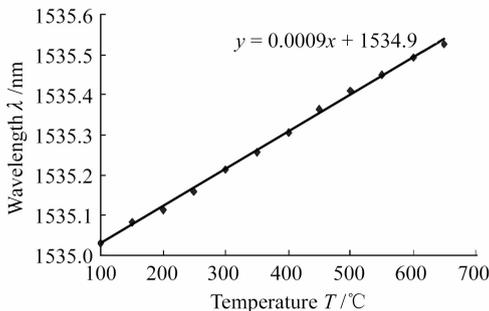


图8 法布里-珀罗干涉腔的高温特性
Fig. 8 High temperature response of F-P interference cavity

现温度测量。法布里-珀罗干涉腔在自由状态下的高温特性和在500 °C下的应变特性如图8,图9所示。500 °C时,法布里-珀罗干涉腔的波长-温度灵敏度和波长-应变灵敏度分别为0.0009 nm/°C和0.0052 nm/με,代入(7)式可得法布里-珀罗干涉腔的 $\epsilon = 0.0052\Delta\lambda + 0.0009 \times 500$ 。

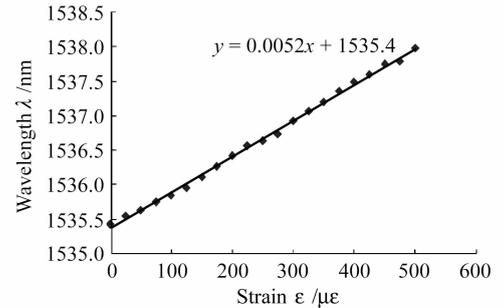


图9 法布里-珀罗干涉腔在500 °C的应变特性
Fig. 9 Strain response of F-P interference cavity at 500 °C

经过多次重复实验,发现长周期光纤光栅/法布里-珀罗温度传感特性和应变传感特性基本不变,具有很好的稳定性。

5 结 论

用157 nm准分子激光器和光纤熔接技术制作出一种新型密封的法布里-珀罗干涉腔,并和低频CO₂激光脉冲制作的长周期光纤光栅构成组合光纤传感器。充分利用了长周期光纤光栅对温度敏感而应变不敏感以及法布里-珀罗干涉腔对应变敏感而温度不敏感的互补特性,实现了温度和应变的同时测量,并为实验所证实。

参 考 文 献

- Rao Yunjiang. In-fibre Bragg grating sensors [J]. *Mears. Sci. Technol.*, 1997, **8**(2): 355~375
- Dong Yuming, Zhang Xuping, Lu Yuangang *et al.*. Cross sensitivity of Brillouin scattering distributed fiber sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 197~201
董玉明,张旭苹,路元刚等. 布里渊散射光纤传感器的交叉敏感问题[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 197~201
- Wang Jiuling, Rao Yunjiang, Zhu Tao. High-temperature and strain characteristics of long period grating with asymmetric refractive index profile in the cross section of fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 389~392
王久玲,饶云江,朱涛. 截面折变非对称型长周期光栅高温应变特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 389~392
- Yu Xiujuan, Yu Youlong, Zhang Min *et al.*. Applications of fiber Bragg grating sensor for aerospace composite and structures health monitoring [J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(1): 1~3
于秀娟,余有龙,张敏等. 光纤光栅传感器在航空航天复合材料/结构健康监测中的应用[J]. *激光杂志*, 2006, **27**(1): 1~

- 3
- 5 Rao Yunjiang, Zhou Changxue, Ran Zengling *et al.*. SFDM/WDM for large number of fiber-optic F-P sensors based on chirped fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):631~635
饶云江,周昌学,冉曾令等. 啾啾光纤光栅法布里-珀罗传感器波分频分复用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):631~635
- 6 Rao Yunjiang, Zeng Xiangkai, Zhu Yong *et al.*. EFPI/FBG strain-temperature sensor and application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1):85~88
饶云江,曾祥楷,朱永等. 非本征型法布里-珀罗干涉仪光纤布拉格光栅应变温度传感器及其应用[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1):85~88
- 7 Rao Yunjiang, Zeng Xiangkai, Zhu Yong *et al.*. Temperature strain discrimination sensor using a WDM chirped in-fiber Bragg grating and an extrinsic Fabry-Perot [J]. *Chinese Physics Letter*, 2001, **18**(5):643~645
- 8 Jiang Jian, Rao Yunjiang, Niu Yongchang *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and strain using an integrated LPFG/EFPI fiber-optic sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9):1063~1066
江建,饶云江,牛永昌等. 应用LPFG/EFPI集成式光纤传感器实现温度及应变的同时测量[J]. *光子学报*, 2003, **32**(9):1063~1066
- 9 Rao Yunjiang. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2006, **12**(3):227~237
- 10 Rao Yunjiang, Wang Yiping, Ran Zengling *et al.*. Novel fibre-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(5):1320~1327
- 11 Lee Yungchun, Shi Hoa Kuo. Miniature conical transducer realized by excimer laser micro-machining technique [J]. *Sensors and Actuators A*, 2001, **93**:57~62
- 12 K. Zimmer, R. Bohme. Precise etching of fused silica for micro-optical applications [J]. *Applied Surface Science*, 2005, **243**(1-4):415~420
- 13 V. R. Machavaram, C. J. Tuck, M. C. Teagle *et al.*. Laser micromachined and acid-etched Fabry-Perot cavities in silica fibres [C]. *SPIE*, 2005, **6038**:60380D-1~60380D-12
- 14 Chen Tao, Yao Liying, Qi Heng *et al.*. Some key problems in PMMA based PCR microfluidic biochip by excimer laser micromachining [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(Suppl.):146~150
陈涛,姚李英,祁恒等. PMMA基PCR生物芯片及其准分子激光制备技术的几个关键问题[J]. *中国激光*, 2007, **34**(增刊):46~150