

光纤法布里-珀罗结构的微型应变传感器的研制

李 坤 文泓桥 李 慧

(武汉理工大学光纤传感技术中心, 湖北 武汉 430070)

摘要 提出一种在多模光纤上腐蚀制作出法布里-珀罗(F-P)腔体,并将该 F-P 腔体和一根普通通信单模光纤熔接起来构成微型非本征型光纤 F-P 干涉(EFPI)应变传感器的方法。实验结果证明这种结构的干涉传感器对结构的微小应变有着极高的灵敏度,可达到 $0.00095 \text{ nm} / \mu\epsilon$,而且对温度的交叉敏感较小。这种制备工艺简单、重复性高、易于批量加工的光纤应变传感器在光传感领域,特别是对各种建筑结构健康状况的远程监测中具有较大的潜在应用价值。

关键词 光纤光学;光纤传感;F-P 干涉腔;远程监测

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3282

A Study on Miniature Interferometer Strain Sensor Based on EFPI

Li Kun Wen Hongqiao Li Hui

(Optical Fiber Sensing Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract A miniature extrinsic Fabry-Perot (F-P) interferometer (EFPI) sensor is fabricated by using simple etching and fusing method. The cavity is formed by wet chemical etching of multi-mode fiber (MMF) in hydrofluoric acid based solutions, then it is fused to the end of a single-mode fiber (SMF) to form an extrinsic F-P structure. Experiment results show that this kind of EFPI sensor has a high sensitivity to strain, but a low sensitivity to temperature. The strain sensitivity is about $0.00095 \text{ nm} / \mu\epsilon$. This kind of fiber sensor has many advantages, such as easy fabrication, high-repetition and mass-production, which offers great potential for sensing applications and especially for strain measurements in health monitoring of civil engineering structure.

Key words fiber optics; fiber sensor; F-P interferometric cavity; remote sensing

1 引 言

基于干涉原理的非本征型光纤法布里-珀罗(F-P)干涉(EFPI)应变传感器除了具有光纤传感器体积小、抗电磁干扰、耐腐蚀、干涉测量精度高等优点外^[1,2],还可以减小出现在本征型光纤 F-P 干涉(EFPI)应变传感器在压力和应变等其他参量的传感应用中,由于较长的传感光纤段,引起明显的温度交叉敏感的缺点。所以具有更高测量精度且可保持长期稳定性的 EFPI 被认为是最有希望获得推广应用的光纤传感器之一,可用于民用建筑、桥梁等大型工程结构的健康检测以及制造未来航天飞行器的智能材料,应用前景十分广阔^[3~6]。

在对 EFPI 应变传感器的研究中,传感探头即 F-P 腔的微型化制作工艺、重复性,以及在 EFPI 传感器中由于温度变化引起材料热膨胀系数失配所造成的被测参量的交叉影响等问题成为影响其推广应用的主要难题^[7~10]。我们对 F-P 腔的制作工艺进行了一系列的相关研究,制作出一种新颖的微型 EFPI 应变传感器结构。这种 EFPI 应变传感器的制备工艺简单且重复性好;干涉腔体即 F-P 腔可短至几十微米,并可通过控制腐蚀条件以及对焊接过程参数的设定来进行精确地控制。通过测试,这种 EFPI 应变传感器对结构的微小应变有极高的灵敏度,可达到 $0.00095 \text{ nm} / \mu\epsilon$,线性度为 0.9852。

收稿日期: 2008-11-20; 收到修改稿日期: 2009-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(60537050)资助课题。

作者简介: 李 坤(1983—),女,硕士研究生,主要从事光纤法布里腔传感方面的研究。E-mail: likunwz126@126.com

导师简介: 姜德生(1949—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: fosrewut@public.wh.hb.cn

2 EFPI 应变传感器结构与原理

该光纤 F-P 腔的结构如图 1 所示。由于纤芯和包层在氢氟酸中的腐蚀速率不同,可以将经过腐蚀处理后的多模光纤与一段单模光纤相互熔接而形成 F-P 腔结构,腐蚀凹坑与单模光纤端面所形成的空气腔则作为光纤谐振腔体。入射光射入 F-P 腔,在两反射面间经过多次反射后产生干涉,相邻干涉光的相位差 $\Delta\Phi$ 与腔内材料的折射率 n 和干涉腔长 L 有如下关系:^[11,12]

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \cos \theta, \quad (1)$$

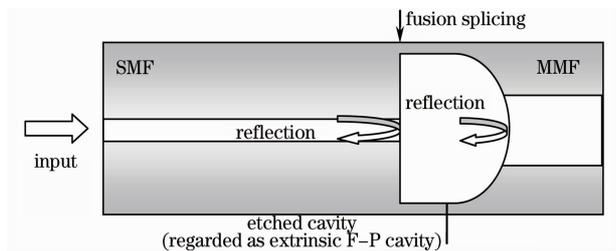


图 1 新型 EFPI 应变传感器的结构图

Fig.1 Schematic configuration of EFPI

θ 为反射光与反射平面法线的夹角, λ 为光波长。设两个反射面的反射率皆为 R , 入射光波长与光强分别为 λ 和 I_0 , 根据多光束干涉的原理, 光纤 F-P 腔的反射光强 I_R 为

$$I_R = \frac{2R(1 - \cos \Delta\Phi)}{1 + R^2 - 2R \cos \Delta\Phi}, \quad (2)$$

由于光接接近正入射从空气射入玻璃平板时, 反射率 R 约为 $0.04 < R < 1$; (2) 式可简化为

$$I_R = 2R \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} nL \right) \right] I_0, \quad (3)$$

在本实验中, 采用了宽带光源, (3) 式中的光波长 λ 不再是一个恒定的常数, 传感器的输出变为多个 (3) 式的组合输出

$$I = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} I_R d\lambda = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} 2RI_0 \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} nL \right) \right] d\lambda, \quad (4)$$

传感器的最终输出 I 不仅与腔长 L 有关, 还与波长 λ 有关。以波长 λ 为横坐标, 在不同的腔长条件下输出的光谱结果不同。本实验通过某一波峰的波长值随着干涉腔长变化的漂移量, 来间接表征应变的变化。设微型光纤 F-R 干涉传感器腔长为 L 时, 反射光谱图中一个波峰所对应的波长为 λ , 则

$$2m\pi = \frac{4\pi nL}{\lambda}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (5)$$

在外界参量的作用下, 传感器腔长变为 $L + \Delta L$, 引起光谱图中干涉条纹的移动, 同一波峰

所对应的波长变为 $\lambda + \Delta\lambda$, 则

$$2m\pi = \frac{4\pi n(L + \Delta L)}{\lambda + \Delta\lambda}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (6)$$

由 (5) 式和 (6) 式可得

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (7)$$

可见反射光干涉条纹波长的漂移量与传感器的应变成正比。当光纤 F-P 腔受到外界的应力作用时, 腔长 L 发生变化, 导致干涉光相位差 $\Delta\Phi$ 变化, 反射光的光强 I 也随之变化。通过探测反射光光强的变化, 对反射光干涉条纹波长的漂移进行分析, 解调出相干光的相位移, 就可直接计算出传感光纤所发生的应变, 进而推测出外界相应参数的变化。

3 EFPI 应变传感器的制作

实验所使用的材料为: 质量分数为 40% 的 HF 溶液, 长飞光纤公司生产的多模光纤 (纤芯直径为 $62.5 \mu\text{m}$, 包层直径为 $125 \mu\text{m}$), 普通单模光纤。

二氧化硅材料中掺杂物的浓度会影响其化学反应即腐蚀的速度^[13~15]。由于腐蚀液对光纤的纤芯 [掺锗 (GeO_2) 的石英玻璃] 与包层 (纯石英玻璃) 的腐蚀速度不同, 最终会在光纤端面腐蚀形成一个凹坑。

图 2 为经切割、清洁处理后的多模光纤在 $38 \text{ }^\circ\text{C}$, 质量分数为 40% 的 HF 腐蚀溶液中经 4 min 腐蚀处理的显微图片。

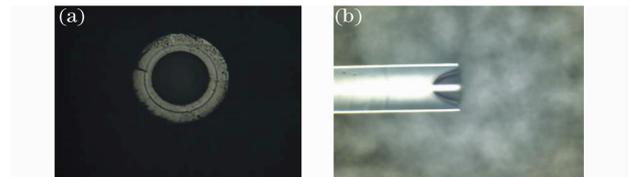


图 2 经腐蚀处理 TE 的多模光纤显微图片。

(a) 端面显微图; (b) 轴向显微图

Fig. 2 Optical micrographs of etched MMF (a) Transverse image of etched MMF; (b) vertical image of etched MMF

取在 $38 \text{ }^\circ\text{C}$, 40% 的 HF 溶液中经过 4 min 腐蚀处理的多模光纤与普通的单模光纤进行熔接, 制备光纤 F-P 腔。其显微结构如图 3 所示。左边部分为经过腐蚀处理的多模光纤, 右边部分为普通的单模光纤。多模光纤的腐蚀凹坑与单模光纤的熔接面形成光纤 F-P 腔结构, 该 F-P 腔的腔长约为 $83 \mu\text{m}$ 。

4 EFPI 应变传感器测试及分析

实验光源采用 AQ4321D 可调激光光源。微型

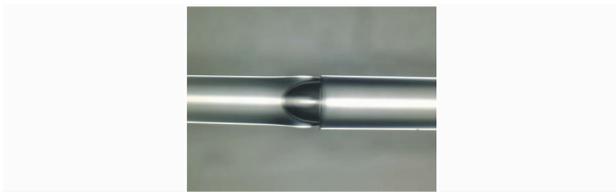


图 3 光纤 F-P 腔结构

Fig. 3 Optical micrographs of an extrinsic fibre F-P interferometer

传感器的两段尾纤分别固定在两个微动台上,从光源输出的宽带光经过 2×1 光纤耦合器进入微型 EFPI 应变传感器。被光纤 F-P 腔反射回并且携带了外界信息的干涉光则经过同一耦合器进入 ANDO AQ6317C 光谱分析仪进行测量分析。

正式记录数据前,先调节微动台螺杆使微型 EFPI 应变传感器腔体处于原始状态,以减小在固定尾纤过程中光纤受轴向应力造成的 F-P 腔体结构变化,提高测量的准确性。控制微动台,以 $5 \mu\text{m}$ 的步长均匀拉伸微型 EFPI 应变传感器,每变化 $5 \mu\text{m}$,采集一组数据。对整个实验过程重复三次,以检验该传感器的重复性。

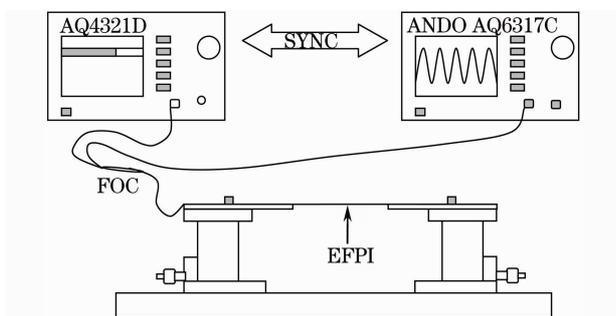


图 4 应变实验系统结构图

Fig. 4 Schematic diagram of the strain experimental fabrication system

设传感器两个固定点之间所受应力与微型光纤 F-P 应变传感器受应力产生的应变成比例关系,并设该比例系数为 k ,根据(7)式,微型 EFPI 应变传感器的应变可表示为^[12]

$$\varepsilon = \kappa \frac{\Delta L}{L} = \kappa \frac{\Delta \lambda}{\lambda}, \quad (8)$$

可见干涉条纹波长的漂移量与传感器的应变变量成正比。测量结果如图 5 所示。

实验结果表明该光纤 F-P 应变传感器的应变变量与其对应光谱图中最强光强的峰值位移量存在很好的线性关系,并且对应变测试的重复性较好。对三次测试的结果取平均作线性拟合,得到该传感器的灵敏度为 $0.00095 \text{ nm} / \mu\text{m}$,线性度为 0.9852。因

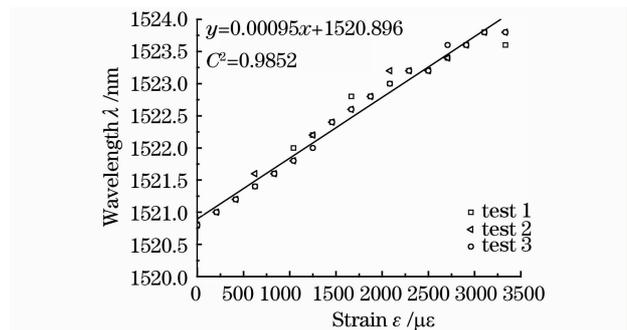


图 5 应变与最强光波峰位置的关系

Fig. 5 Relationship of strain and wave crest

此,这种 EFPI 应变传感器对外界结构的微小应变有着极高的响应。

在 EFPI 传感器的应变以及其他参量的传感应用中,很难消除温度的交叉敏感,因此我们进行了光纤 F-P 腔的温度响应实验。由于光纤的涂覆层在高温下容易变形甚至融化,造成光纤 F-P 腔的附加形变,影响测试的准确性,因此将实验的最高温度控制在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。控制温度箱,使温度从 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $95 \text{ }^\circ\text{C}$,每升高 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 采集一次数据,得到的实验结果如图 6 所示。

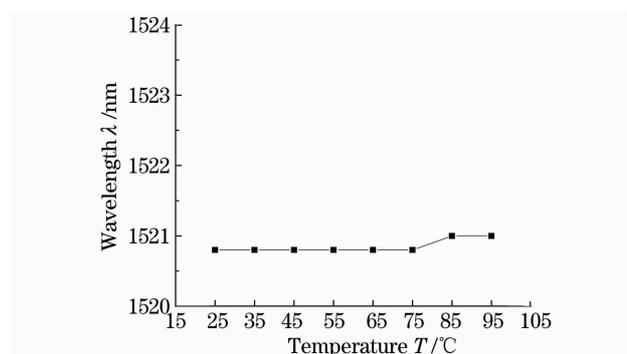


图 6 温度与最强光波峰位置的关系

Fig. 6 Relationship of temperature and wave crest

从图中可以看出,在 $25 \sim 95 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内,波长的漂移量只有约 0.2 nm 。其原因在于:一方面,这种新型非本征型光纤 F-P 传感器的制作过程只有光纤腐蚀和光纤熔接,整个传感探头的材料单一,避免了在传统的 EFPI 传感器中由于温度变化引起材料热膨胀系数失配所造成的被测参量的交叉影响。另一方面,由于光纤材料的热膨胀系数极小,约为 $5.5 \times 10^{-7} / \text{ }^\circ\text{C}$;同时,制备出的光纤 F-P 腔的腔长很短,只有约 $83 \mu\text{m}$;忽略外界干扰的情况下,根据光纤的线性热膨胀系数定义,在 $25 \sim 95 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内,该光纤 F-P 腔的腔长变化只有约 3.2 nm ,因而避免了 EFPI 传感器由于较长的传感光纤段而对温度非常敏感的缺点。

尽管该 EFPI 应变传感器的温度灵敏度较低,但对温度的交叉敏感还是会影响到其传感的性能。可以通过温度补偿手段,比如在传感线路上增加一个光纤布拉格光栅用来测量温度^[16],进而减小温度所引起的测量误差。

5 结 论

本文利用腐蚀和熔接方法制备出非本征型光纤 F-P 应变传感器。实验结果表明:这种可以通过调节制备参数控制腔长的光纤应变传感器具有极高的应变灵敏度($0.00095 \text{ nm}/\mu\epsilon$),且对温度的交叉敏感较小;利用这种简单的制备工艺在一根光纤上制作出多个 F-P 腔传感器,再结合频分复用网络光谱解调方法,则可实现多点多参数的测量。所以这种新型的 EFPI 应变传感器将在准分布式、大容量传感系统,如各种建筑结构健康状况的远程监测中具有较大的潜在应用价值。

参 考 文 献

- 1 M. B. Sen, V. Bhatia, K. A. Murphy. Recent advances in the fiber extrinsic Fabry-Perot interferometric strain sensor development[C]. *Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics*, 1994, **2**: 253~254
- 2 Meng Qingyao, Zhao Yong, Zheng Ming. Development and application of fiber optic interferometric strain technology[J]. *Optoelectronic Technology*, 2005, **25**(3): 170~174
孟庆尧, 赵 勇, 郑 明. 干涉型光纤应变传感技术的发展与应用[J]. *光电子技术*, 2005, **25**(3): 170~174
- 3 Xiangkai Zeng, Yunjiang Rao, Yiping Wang *et al.*. Transverse load, static strain, temperature and vibration measurement using a cascaded FBG/EFPI/LPFG sensor system[C]. *Proceedings of the 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 2002, **1**: 199~202
- 4 Yang Jianchun, Chen Weimin, Xu Mou *et al.*. Application of fibre optic Fabry-Perot strain sensor in bridge structure status monitoring[J]. *Transducer and Microsystem Technology*, 2006, **25**(7): 76~78
杨建春, 陈伟民, 徐 谋 等. 光纤法布应变传感器在桥梁状态监测中的应用[J]. *传感器与微系统*, 2006, **25**(7): 76~78
- 5 R. Dua, V. Eller, K. M. Isaac *et al.*. Intelligent strain sensing on a smart composite wing using extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors and neural networks [C]. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, 2003, **4**: 2667~2672
- 6 Wang Ning, Zhu Yong, Fu Yumei *et al.*. Application of fiber optic F-P strain sensor to the calibration of elastic modulus for concrete[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, **36**(8): 53~56
王 宁, 朱 永, 符欲梅 等. 光纤法布应变测量系统在混凝土弹性模量标定中的应用[J]. *土木工程学报*, 2003, **36**(8): 53~56
- 7 Duan Dewen, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. A miniature extrinsic Fabry-Perot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 17~20
段德稳, 朱 涛, 饶云江 等. 基于空芯光子晶体光纤的微型非本征光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 17~20
- 8 Liu Weijun, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Novel Fabry-Perot fiber-optic refractive-index sensor based on laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1400~1404
刘为俊, 饶云江, 冉曾令 等. 基于激光微加工的新型光纤法布里-珀罗折射率传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1400~1404
- 9 Guo Mingjiang, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Research on manufacture technology of white-light interferometric fiber Fabry-Perot interferometer sensor [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2003, **25**(2): 94~97
郭明江, 梁大开, 曾 捷 等. 白光干涉型光纤法珀腔传感器的制作工艺研究[J]. *压电与声光*, 2003, **25**(2): 94~97
- 10 Wang Wei, Rao Yunjiang, Tang Qingtao *et al.*. Micromachining of an in-fiber extrinsic Fabry-Perot interfer by using a femtosecond laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1660~1664
王 维, 饶云江, 唐庆涛 等. 飞秒激光加工的微型光纤法布里-珀罗干涉传感器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1660~1664
- 11 Liang Quanting. *Physical Optics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 128~132
梁铨廷. *物理光学* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 128~132
- 12 Tu Yaqin, Liu Xingchang. *Intelligent Structures Based on Optical Fibers* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005. 107~111
涂亚庆, 刘兴长. *光纤智能结构* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005. 107~111
- 13 G. A. C. M. Spierings. Wet chemical etching of silicate glasses in hydrofluoric acid based solutions[J]. *J. Mater. Sci.*, 1993, **28**(23): 6261~6273
- 14 G. A. C. M. Spierings. Compositional effects in the dissolution of multicomponent silicate glasses in aqueous HF solutions[J]. *J. Mater. Sci.*, 1991, **26**(12): 3329~3336
- 15 V. Murphy, B. D. McCraith, T. Butler *et al.*. Quasi-distributed fibre-optic chemical sensing using telecom optical fibre [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(7): 618~619
- 16 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