

文章编号: 0253-2239(2010)08-2202-06

激光微加工的光纤法布里-珀罗应变传感器

徐富国¹ 饶云江^{1,2} 冉曾令¹

(¹ 电子科技大学宽带光纤传输和通信网络技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054)

² 重庆大学光技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044

摘要 报道了一种在光纤内部通过采用 157 nm 激光微加工一个自封闭法布里-珀罗(F-P)腔而形成的在线式全光纤标准具。实验研究了这种标准具的应变和温度特性,结果表明,在标准具两固定点相距 1 m 的情况下,位移-相移系数和位移-谷值波长漂移系数分别为 1 mrad/ μm 和 5.2 pm/ μm ,曲线的线性度为 99.92%;在 18 °C~500 °C 的温度范围内平均温度系数为 0.13 mrad/°C 和 0.64 pm/°C,温度不敏感。实验证明该标准具有很好的传感特性,能满足各种应变测试的需要,如极好的条纹对比度(高达 30 dB)、低温度交叉敏感、大规模生产的极大潜能、低成本和耐恶劣环境能力强等。

关键词 导波与光纤光学;光纤传感器;激光微加工;光纤法布里-珀罗腔

中图分类号 TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2202

Optical Fiber Fabry-Pérot Strain Sensor Fabricated by Using Laser Micromachining

Xu Fuguo¹ Rao Yunjiang^{1,2} Ran Zengling¹

¹ Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks Technology, Ministry of Education, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

² Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract An in-line all-fiber etalon, formed by a self-enclosed Fabry-Pérot (F-P) cavity inside an optical fiber fabricated by using 157 nm laser micromachining, is demonstrated. The strain and temperature characteristics of the etalon sensor are investigated. The results show that the strain sensitivity is 1 mrad/ μm and 5.2 pm/ μm , and the linearity is 99.92% with two fixed point at a distance of 1 m. Furthermore, the temperature sensitivity is 0.13 mrad/°C and 0.64 pm/°C at the range of 18 °C to 500 °C. Experimental results show that the etalon can meet versatile applications for strain measurement because of its perfect sensor characteristics, such as excellent interferometric fringe contrast of up to 30 dB, low thermal cross-sensitivity, great potential to realize mass-production, low cost, and super capability to operate in harsh environments.

Key words guided wave and fiber optics; optical fiber sensors; laser micromachining; fiber Fabry-Perot cavity

1 引 言

自 20 世纪 80 年代以来,光纤应变传感以其长期稳定性、抗电磁干扰、能在恶劣环境下工作、小尺寸和可复用等优异性能而备受关注。光纤布拉格光栅(FBG)和法布里-珀罗(F-P)干涉仪是两类主要的

光纤传感器,已经成功地商业化,应用于应变测量^[1~7]。FBG 存在的问题是很难避免应变测量中温度的影响,并且也很难在高温环境下工作,这是由于采用紫外激光脉冲写入的光栅结构高温下很容易被抹除^[1,2]。传统的光纤 F-P 传感器,特别是非本征

收稿日期: 2009-08-11; 收到修改稿日期: 2009-09-24

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: 徐富国(1983—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: ofei@sina.com

导师简介: 饶云江(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感、光纤智能结构及光通信等方面的研究。

E-mail: yjrao@uestc.edu.cn

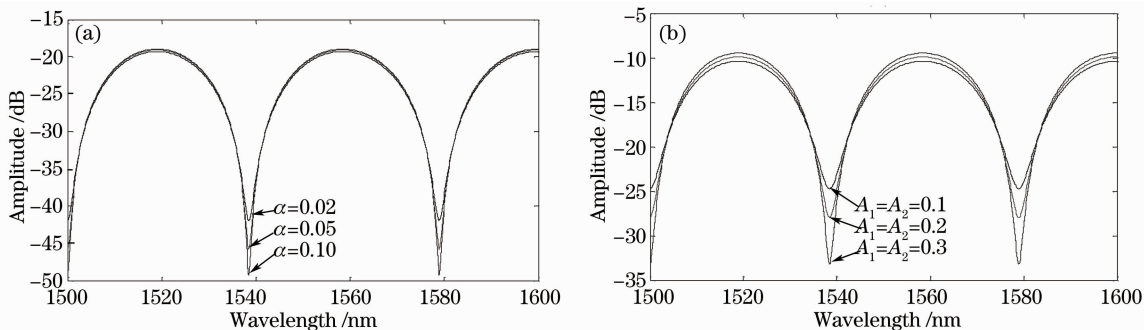


图 2 不同参数下仿真得到的反射谱

Fig. 2 Simulation of the reflection spectra for different parameters

表 1 计算所用的物理参数值

Table 1 Values of the physical parameters of the sensor used in the calculation

Parameters	Values
$R_1 = R_2$	0.034
L	30 μm

表 2 干涉条纹对比度和传感器参数关系

Table 2 Dependence of the fringe contrast of the interference fringe on the sensor parameters

α	$A_1 = A_2$	$\eta_1 = \eta_2$	Fringe contrast / dB
0.10	0.04	0.1	20
0.05	0.04	0.1	25
0.02	0.04	0.1	30
0.02	0.30	1	15
0.02	0.20	1	18
0.02	0.10	1	23

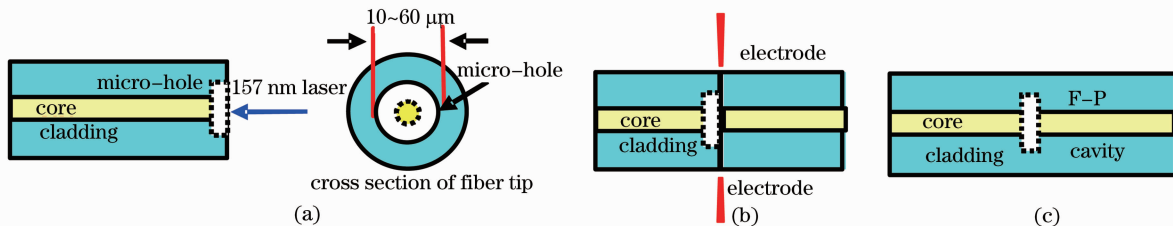


图 3 自封闭在线型光纤 F-P 标准具的制作过程。(a)采用 157 nm 激光在单模光纤端面打出一个微型孔；

(b)将打好孔的光纤和另一段切割好的单模光纤熔接；(c)制作好的 F-P 标准具

Fig. 3 Fabrication process of the self-enclosed fiber-optic F-P in-line etalon. (a) creating a circular micro-hole at the fiber tip using an 157 nm laser; (b) splicing the fiber with the micro-hole to another cleaved fiber; (c) F-P etalon is completed after an arc-fusion splicing operation

采用的激光脉冲的能量密度和重复率为 12 J/cm^2 和 20 Hz , 脉冲数为 160, 在光纤端面制作出的微型孔的深度为 $30 \mu\text{m}$, 耗时仅仅 8 s。图 4 是采用光学显微镜和轮廓仪 (Veeco-NT1100, USA) 获得的环形微孔结构图。环形微孔底部粗糙度的平均和均方根值 (R_a 和 R_q) 分别为 45.01 nm 和 50.24 nm 。由些可以证明,

3 标准具制作

这种封闭式光纤 F-P 腔的制作过程如图 3 所示。采用 157 nm 激光微加工机在切割好的光纤端面打一个环形微孔, 其原理是硅对 157 nm 光子的强烈的本征吸收^[15]; 然后将这段打好孔的光纤和另一段切割好的光纤熔接在一起, 就形成了一个在线 F-P 腔。熔接过程和熔接普通单模光纤一样容易。本文中用的是古河光纤熔接机 (Fitel S177), 熔接程序由熔接机自动选择即可 (主要熔接参数: 放电强度 100; 清洁时间 200 ms; 预熔时间 160 ms; 熔接时间 750 ms)。

采用 157 nm 激光微加工可以在光纤端面获得类似镜面的反射面。光谱如图 5 所示。从图中可以看出, 这种标准具条纹对比度高, 可达到 30 dB, 这比传统手工组装制作的 F-P 腔的对比度高出许多, 传统的典型值约为 15 dB。如此高的对比度确保应变测量的高精度。

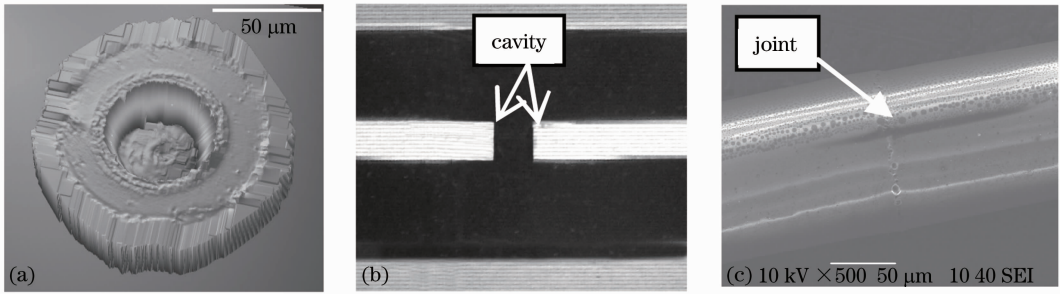


图4 微型孔和标准具的图片。(a)采用 NT1100 获得的微型孔的 3D 结构;(b)采用光学显微镜获得的标准具图片;
(c)标准具的扫描电子显微镜图片

Fig. 4 Photograph of the micro-hole and etalon. (a) 3D structure of the micro-hole machined at the fiber tip acquired by NT1100; (b) photograph of the etalon acquired by an optical microscope in a transmission mode; (c) scanning electron microscope photograph of the etalon

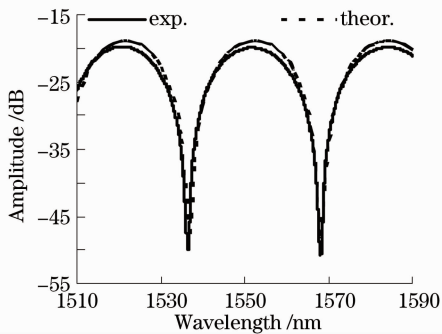


图5 标准具的光谱

Fig. 5 Spectrum of the etalon

4 标准具的传感特性

对该标准具的应变和温度特性在一个较宽的温度范围内进行了实验研究。腔的实际长度为 L , 通过公式 $L = \lambda_1 \lambda_2 / [2(|\lambda_2 - \lambda_1|)]$ 来计算, 式中 λ_1, λ_2 是标准具干涉谱相邻波峰(或波谷)对应的波长^[16]。标准具理论应变系数由 $S = \epsilon / \Delta\phi = \lambda_0 / 4\pi L$ 来决定, 其在 $\lambda_0 = 1570 \text{ nm}$ 处的典型值约为 $3.2 \text{ m}\epsilon/\text{rad}$, 式中 $\epsilon, \Delta\phi$ 分别为标准具的线应变和相位漂移。既然测量长度和腔的长度是一样的, 当相位漂移 $\Delta\phi < \pi$ 的时候, 施加的线应变就可以根据公式 $\epsilon = \Delta L / L = \Delta\phi / \Phi \approx \Delta\lambda / \lambda_0$ 来计算, 式中 $\Delta\lambda$ 是波峰(或波谷)对应的波长漂移, λ_0 是相应的波峰(或者波谷)处的初始波长^[16]。

当波长为 1570 nm 时, 标准具的理论应变系数约为 $1.57 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 和 $0.304 \text{ mrad}/\mu\epsilon$ 。

高温下对标准具进行静态应变测试实验的装置如图 6 所示。实验中, 标准具被放入一个高温炉中 (Lenton 1200, UK) 同时安装在一对高精度的微动台上, 微动台固定在高温炉两端, 相距 1 m 。一台高

精度的光谱分析仪 (Si720, Micron Optics Inc, USA) 用来对标准具的光谱进行监测。在温度分别为 $18 \text{ }^\circ\text{C}$, $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的应变响应测试结果如图 7(a) 所示(每一个温度状态计算 $\Delta\lambda$ 都是以该温度下的初始波长来计算)。相位漂移和波谷对应波长漂移分别约为 0.5 rad 和 2.6 nm 。测试的位移范围为 $0 \sim 500 \text{ }\mu\text{m}$, 步长 $25 \text{ }\mu\text{m}$, 相应的位移-相移系数和位移-谷值波长漂移度分别约为 $1 \text{ mrad}/\mu\text{m}$ 和 $5.2 \text{ pm}/\mu\text{m}$, 曲线的线性系数约为 99.92% , 所采用的波长 λ 为 1570 nm 。

标准具的温度响应特性如图 7(b) 所示。在波长 1570 nm 处, 从 $18 \text{ }^\circ\text{C} \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$, 相移和波谷对应的波长漂移分别约为 0.1 rad 和 0.5 nm , 相应的温度系数分别约为 $0.13 \text{ mrad}/^\circ\text{C}$ 和 $0.64 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

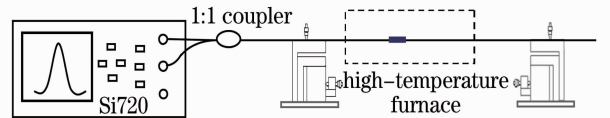


图6 高温和静态应变测量的实验装置

Fig. 6 Experimental setup for high temperature and static strain measurement of the etalon

该 F-P 标准具的准静态应变响应也可以通过将其粘接在悬臂梁 (BDQ-1D, Hengxin Electronic Inc.) 上来测试。该悬臂梁是等应变梁。实验装置如图 8 所示, F-P 标准具被安装在悬臂梁正面, 测量长度约为 $38 \text{ }\mu\text{m}$, 在梁的反面安装了一个电阻应变仪 (BX-120, Huangshi Inc.) 来和光纤标准具测得的应变进行对比, 其测量长度约为 3 mm 。实验之前, 先施加一个预应变。电阻应变仪通过一台解调器 (CSM-1, Hengxin Electronic Inc.) 来监测。F-P 标准具由 Si720 通过监测波谷的漂移来解调。由电

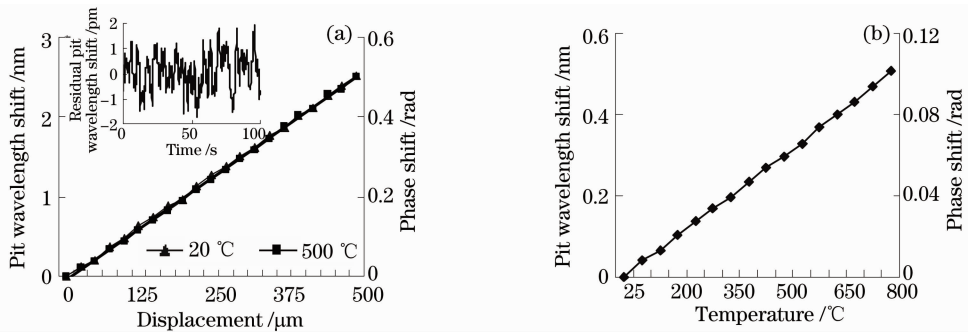


图 7 (a) 标准具静态应变响应(b)标准具温度响应

Fig. 7 (a) Static strain responses and (b) temperature response of the etalon

阻应变仪校正过的标准具的应变特性曲线描绘在了图 9 中。图 9 内部的图形示意的是研究标准具长期稳定性和准确性的结果。将一个恒定的应变施加到标准具上,保持约 1 h。发现从标准具得到的应变波动约为 $\pm 1 \mu\epsilon$ 。F-P 标准具和电阻应变仪测得的应变结果如图 10 所示。图 10 内部的图形是从 0~80 s 的应变测试结果的一个特写。从中可以看出标准具和电阻应变仪的应变测试结果具有很好的一致性。

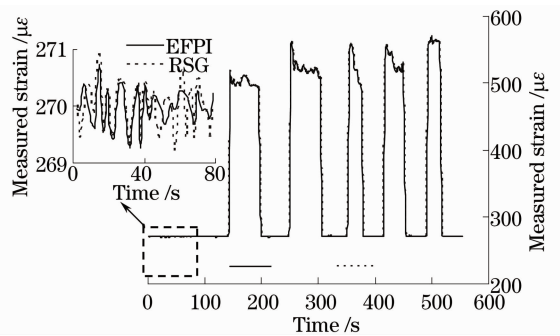


图 10 电阻应变仪和 F-P 标准具测得的应变

Fig. 10 Strain measured by the fiber F-P etalon and resistance strain gauge

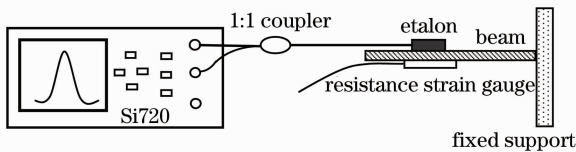


图 8 F-P 标准具和电阻应变仪对准静态应变进行对比测量的实验装置

Fig. 8 Experimental setup for quasi-static strain sensing comparison between the fiber F-P etalon and the resistance strain gauge

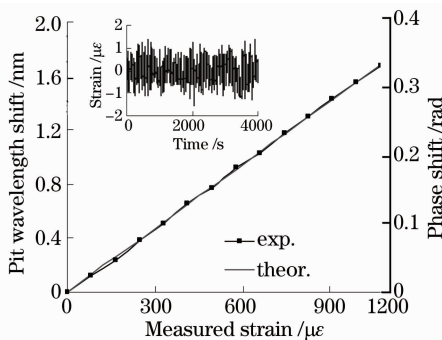


图 9 电阻应变仪校正过的标准具的应变特性

Fig. 9 Strain characteristic of the etalon calibrated by a resistance strain gauge

5 结 论

对在光纤内部通过采用 157 nm 激光微加工一个自封闭 F-P 腔而形成的在线式全光纤标准具的原理、制作方法、传感特性进行了详细研究。在标准具两固定点相距 1 m 的情况下,取得的位移-相移系数约为 $1 \text{ mrad}/\mu\text{m}$, 位移-谷值波长漂移系数约为 $5.2 \text{ pm}/\mu\text{m}$, 曲线的线性度约为 99.92%。在 $18 \text{ }^\circ\text{C} \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内取得了约 $0.13 \text{ mrad}/^\circ\text{C}$ 的平均温度系数,线性度约为 99.92%。这种标准具拥有许多优点,如高重复性,大规模生产的潜能和在恶劣环境下工作的能力等。在将来,一旦实现批量生产,将极大地降低这种传感器的成本,将有可能取代目前广泛应用的电应变传感器。它微米级的尺寸和自封闭结构使其非常适合在一些特殊场合应用。比如:通过将它植入身体进行生物学研究,可以测量心脏颤动,肌肉运动和骨头等。也可以将其安装在发动机叶片上对高温环境下的静态和动态应变进行测量。此外,它抵抗恶劣环境的出色能力将在一些很难

应用传统电传感器的行业,如石油开采、宇航和冶金等,开辟出一些新的应用领域。

参 考 文 献

- 1 Y. J. Rao. Review article: in-fiber Bragg grating sensors [J]. *Measur. Sci. & Technol.*, 1997, **8**(4): 355~375
- 2 Y. J. Rao. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors [M]. *Opt. & Laser in Engng.*, 1999, **13**(4): 297~324
- 3 Liao Xian, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Simultaneous measurement of high-temperature and strain using a combined long-period fiber grating/Fabry-Perot sensor fabricated by laser pulses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 884~888
廖 弦, 饶云江, 冉曾令等. 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[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 884~888
- 4 J. S. Sirkis, D. D. Brennan, M. A. Putman *et al.*. In-line fiber etalon for strain measurement [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(22): 1973~1975
- 5 J. Sirkis, T. A. Berkoff, R. T. Jones *et al.*. In-line fiber etalon (ILFE) fiber-optic strain sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1256~1263
- 6 Y. J. Rao, D. A. Jackson. Review article: recent progress in fiber-optic low-coherence interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**(4): 981~999
- 7 Y. J. Rao. Review article: recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2006, **12**(3): 227~237
- 8 J. L. Santos, A. P. Leite, D. A. Jackson. Optical fiber sensing with a low-finesse Fabry-Pérot cavity [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(34): 7361~7366
- 9 K. A. Murphy, M. F. Gunther, A. M. Vengsarkar *et al.*. Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Pérot optical fiber sensors [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(4): 273~275
- 10 R. O. Claus, M. F. Gunther, A. Wang *et al.*. Extrinsic Fabry-Pérot sensor for strain and crack opening displacement measurements from -200 to 900 degrees [J]. *Smart Mater. Struct.*, 1992, **1**(3): 237~242
- 11 M. Schmidt, N. Fürstenau. Fiber-optic extrinsic Fabry-Pérot interferometer sensors with three-wavelength digital phase demodulation [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(9): 599~601
- 12 M. Schmidt, B. Werther, N. Fürstenau. Fiber-optic extrinsic Fabry-Pérot Interferometer strain sensor with < 50 pm displacement resolution using three-wavelength digital phase demodulation [J]. *Opt. Express*, 2001, **8**(8): 475~480
- 13 X. P. Chen, F. B. Shen, Z. Wang *et al.*. Micro-air-gap based intrinsic Fabry-Pérot interferometric fiber-optic sensor [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(30): 7760~7766
- 14 E. Cibula, D. Donlagic. In-line short cavity Fabry-Pérot strain sensor for quasi distributed measurement utilizing standard OTDR [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(14): 8719~8730
- 15 K. Obata, K. Sugioka, T. Akane *et al.*. Influence of laser fluence and irradiation timing of F₂ laser on ablation properties of fused silica in F₂-KrF excimer laser multi-wavelength excitation process [J]. *Appl. Phys. A*, 2001, **73**(6): 755~759
- 16 Deng Hongyou, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Photonic crystal fiber based Fabry-Pérot sensor fabricated by using 157 nm laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 255~258
邓洪有, 饶云江, 冉曾令等. 用 157 nm 激光制作的光子晶体光纤法布里-珀罗传感器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 255~258