

文章编号: 0258-7025(2007)12-1660-05

飞秒激光加工的微型光纤法布里-珀罗干涉传感器

王 维¹, 饶云江^{1,2}, 唐庆涛¹, 邓 明¹, 朱 涛¹, 程光华³

¹ 重庆大学光电技术与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网技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054

³ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 陕西 西安 710068

摘要 介绍了一种利用波长为 800 nm 的飞秒激光脉冲在普通单模光纤(SMF)上刻蚀出微型光纤法布里-珀罗干涉(MEFPI)传感器的方法。该方法通过计算机控制就可以进行任意腔长的微型光纤法布里-珀罗干涉传感器的制作。实验研究了光纤法布里-珀罗传感器的应变和温度特性,结果表明,在 0~350 $\mu\epsilon$ 的应变范围内,干涉条纹波长相对于应变的灵敏度为 0.006 nm/ $\mu\epsilon$,线性度达 99.69%;在 20~100 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,该光纤法布里-珀罗传感器具有较小的负温度特性,干涉条纹往短波方向漂移了 0.15 nm。作为全光纤传感器件,该类型传感器重复性高,成本低廉,易于批量加工,在光传感领域具有较大的潜在应用价值。

关键词 导波与光纤光学;光纤传感器;飞秒激光加工;光纤法布里-珀罗腔

中图分类号 TN 253;TP 212.14 **文献标识码** A

Micromachining of an in-Fiber Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Sensor by Using a Femtosecond Laser

WANG Wei¹, RAO Yun-jiang^{1,2}, TANG Qing-tao¹,
DENG Ming¹, ZHU Tao¹, CHENG Guang-hua³

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

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

³ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710068, China

Abstract The fabrication of a micromachining extrinsic Fabry-Perot (F-P) interferometer (MEFPI) within a conventional single-mode fiber (SMF) by using a 800 nm femtosecond laser was reported in this paper. The strain and temperature characteristics of the MEFPI are investigated. The experimental results show that the strain sensitivity is 0.006 nm/ $\mu\epsilon$, and linearity is 99.69% at the range of 0 to 350 $\mu\epsilon$. Furthermore, the interference fringe of the MEFPI shifts about 0.15 nm to the short wavelength while the temperature rises from 20 $^{\circ}\text{C}$ to 100 $^{\circ}\text{C}$. Such kind of in-fiber interference sensors has many advantages, such as compact size, good reliability, low cost, easy fabrication and mass-production, which offers great potential for sensing applications.

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

收稿日期:2007-05-31;收到修改稿日期:2007-07-11

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:王 维(1984—),女,四川人,硕士研究生,主要从事光纤传感器方面的研究。

E-mail: weiwei19840225@126.com

导师简介:饶云江(1962—),男,云南人,教授,目前主要从事光纤技术与光电器件方面的研究。

E-mail: yjrao@uestc.edu.cn

1 引 言

随着现代测量技术的发展, 光纤法布里-珀罗(F-P)传感器越来越受到人们的重视, 被广泛用于测量应变、压力、振动、加速度、折射率等。与传统的传感器相比, 光纤法布里-珀罗传感器具有不受电磁干扰、适用范围广、稳定性好、可靠性好、分辨率高、精度高、体积小、重量轻等显著优点^[1,2]。但是传统的制作方法工序复杂、重复性差, 还需进行腔长的标定^[3], 这就使得光纤法布里-珀罗传感器的批量生产较为困难, 从而在一定程度上限制了光纤法布里-珀罗传感器进一步的广泛应用。为了克服以上缺点, 本文提出了利用飞秒激光微细加工工艺^[4~6]进行微型光纤法布里-珀罗干涉(MEFPI)传感器的制作, 飞秒激光直接写入法制作光纤法布里-珀罗干涉(EFPI)传感器不需要昂贵的掩模板, 通过计算机的控制, 可以进行任意腔长的光纤法布里-珀罗干涉传感器制作, 重复性高, 成本低廉, 是一种更适合于批量加工的方法。

2 微型光纤法布里-珀罗传感器的设计加工

采用掺钛蓝宝石飞秒激光器加工微型光纤法布里-珀罗传感器的实验装置如图 1 所示。整个加工装置主要由光源系统、显微镜-实时监测系统和三维精密微动系统构成。从飞秒激光器输出的激光(能量为 $100 \mu\text{J}$, 宽度为 150fs)首先通过一个空间滤波器进行扩束和光束质量的改善; 扩束后的激光经过二向色镜反射后, 再通过聚焦物镜聚焦到待加工的光纤上。监视系统采用发光二极管作为照明光源,

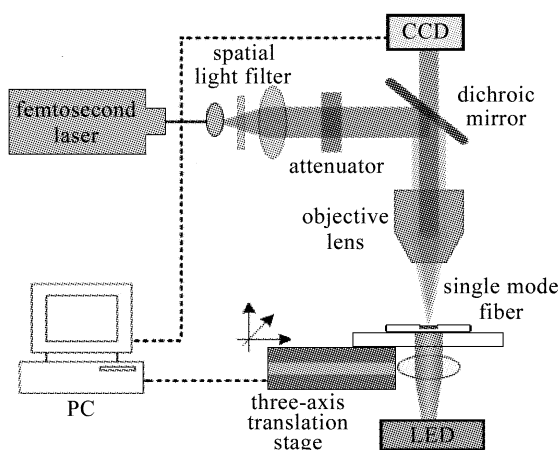


图 1 飞秒激光加工装置

Fig. 1 Schematic configuration of the femtosecond laser fabrication system

其发出的光照亮被加工的光纤, 然后通过二向色镜进入安装在反相光学望远镜上的 CCD 相机进行成像显示, 以达到实时监测的目的。三维移动平台(型号为 M111. 1DG)在 x, y, z 方向移动范围为 $15 \text{mm} \times 15 \text{mm} \times 15 \text{mm}$, 分辨率为 $100 \text{nm} \times 125 \text{nm} \times 7 \text{nm}$, 通过计算机控制驱动卡, 向控制器发送指令, 从而控制三维移动轴的三维运动, 可以满足待加工的光纤跟激光束之间的准确定位。

根据现有的实验设备和技术条件, 设计了如图 2 所示的微型光纤法布里-珀罗干涉传感器。根据干涉腔的条件和光纤参数, 法布里-珀罗腔腔长 L 取为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$, 腔体的宽度 W 为 $8 \sim 30 \mu\text{m}$, 若大于 $30 \mu\text{m}$, 加工后的传感器易断裂, 而腔的深度 $D > 62.5 \mu\text{m}$, 以保证腔体达到纤芯以下。在所加工的结构中, 取 $D \times W \times L = 75 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ 。

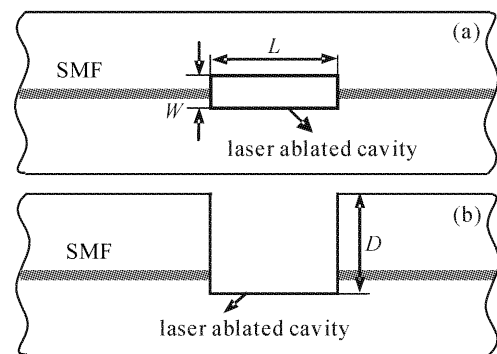


图 2 微型光纤法布里-珀罗干涉传感器结构示意图

Fig. 2 Schematic configuration of MEFPI

微型光纤法布里-珀罗干涉传感器具体的加工过程为: 取一段单模光纤(SMF), 将中间一段光纤去掉涂敷层, 把光纤用夹具固定在三维精密微动平台上。通过软件控制系统进行焦斑位置的微调, 使光斑定位在光纤的正中心。将设计好的参数($D \times W \times L$)输入软件控制系统, 控制三维微动台与飞秒激光焦斑产生相对移动, 激光在 x, y 二维平面内每扫描刻蚀完一层时, 微动台在 z 方向相应地向上提升 $15 \mu\text{m}$, 进入第二层扫描, 总共提升 5 次即可完成 $75 \mu\text{m}$ 深度的腔体制作。制作的腔长为 $80 \mu\text{m}$ 的微型光纤法布里-珀罗干涉传感器的实物照片如图 3, 其干涉谱如图 4 所示。

与传统加工相比, 飞秒激光加工可以实现相对意义上的冷加工, 避免了加工过程中热熔化, 从而大大减弱了热效应带来的诸多负面影响^[4~6], 因此加工的腔体表面没有材料熔化的痕迹, 边缘也较为光滑, 如图 3 所示。但是加工的腔体两个端面不是严

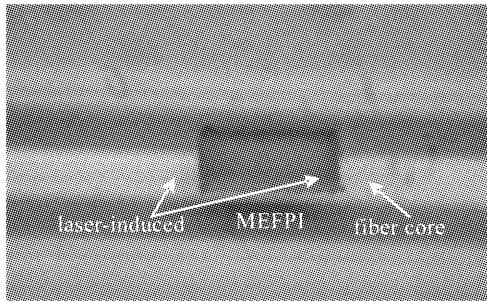


图3 光学显微镜下的微型光纤法布里-珀罗干涉传感器
Fig. 3 Optical micrograph of a MEFPI sensor with
80 μm cavity length

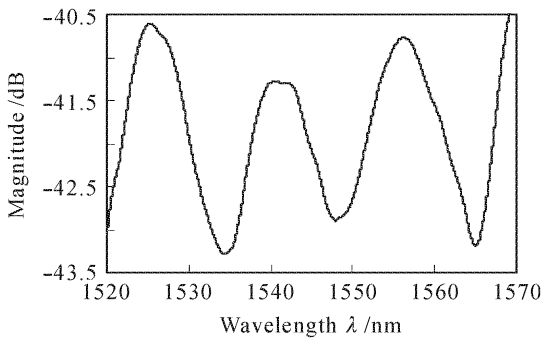


图4 腔长为 80 μm 的微型光纤法布里-珀罗干涉传感器的干涉谱
Fig. 4 Interference spectrum of a MEFPI sensor with
80 μm cavity length

格平行,这主要是因为光纤夹具在夹持光纤时使光纤有一个上翘的角度,造成飞秒激光光束在写入法布里-珀罗干涉传感器的过程中与光纤轴向不是严格垂直的。而传感器腔体的两个反射端面不严格平行则会大大降低反射光强,从而降低干涉谱的光强大小和对比度,这对后续信号处理极为不利。为此采用从两个方向分别写入两个小腔的方式来合成一个需要的传感器腔体。另一方面,在加工过程中,溅射出来的微小颗粒会吸附在腔体或者光纤的表面而污染腔体端面,影响端面的反射率,也会降低干涉谱的光强大小和对比度。因此一般先用超声波清洗装置,清洗掉绝大部分吸附在腔体端面和光纤表面的粉尘,然后再用低浓度的氢氟酸腐蚀,除去残留在腔体表面的极少部分粉尘,以此来优化微型光纤法布里-珀罗干涉传感器的干涉特性。

3 实验特性及讨论

基于飞秒激光技术加工制作的微型光纤法布里-珀罗干涉传感器属于直接在光纤内部刻蚀成槽形成的法布里-珀罗腔,本身结构与传统的法布里-

珀罗腔不同,为此实验研究了微型光纤法布里-珀罗干涉传感器的应变特性,图5为微型光纤法布里-珀罗干涉传感器应变测量系统的实验装置示意图。从光源输出的宽带光经过 2×1 耦合器进入微型光纤法布里-珀罗干涉传感器,微型传感器的两段尾纤分别用胶固定在两个微动台(精度为 $1 \mu\text{m}$)上,两固定点之间距离为 $140 \mu\text{m}$ 。经过微型光纤法布里-珀罗干涉传感器反射的干涉谱进入 Si720 光谱仪(波长分辨率为 0.25 pm ,精度为 1 pm),通过计算机采集光谱数据进行解调处理。在实验开始之前,应给微型光纤法布里-珀罗干涉传感器施加一个预应力使其处于绷直状态,以防止两个固定点之间光纤下垂造成微型光纤法布里-珀罗干涉传感器腔体结构的变化,导致解调结果的误差。控制微动台,使其以 $10 \mu\text{m}$ 的步长均匀拉伸微型光纤法布里-珀罗干涉传感器,每变化 $10 \mu\text{m}$,采集一组数据。

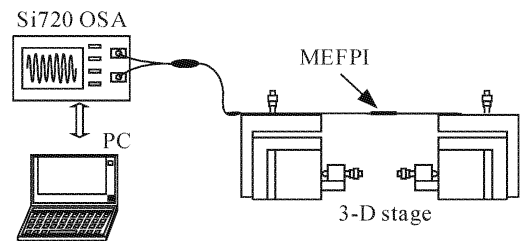


图5 应变实验系统结构图

Fig. 5 Schematic diagram of the strain experimental fabrication system

由于制作的微型光纤法布里-珀罗干涉传感器腔长很小,在 $1520 \sim 1570 \text{ nm}$ 波段范围内的干涉条纹数少,而且在实验过程中腔长变化量很小,因此用快速傅里叶变换(FFT)和离散腔长变换(DGT)法解调的精度都较低^[7,8],故而采用干涉条纹某一波峰或波谷所对应波长的漂移量来间接表征应变的变化。

由法布里-珀罗腔的干涉理论可知^[9,10],光在法布里-珀罗腔中往返一次的相位差可表示为

$$\phi = \frac{4\pi nL}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 n 为折射率, L 为初始腔长, λ 为光波波长。

设微型光纤法布里-珀罗干涉传感器腔长为 L 时一个波谷所对应的波长为 λ ,在施加应力后,微型光纤法布里-珀罗干涉传感器腔长变为 $L + \Delta L$,同一波谷所对应的波长变为 $\lambda + \Delta\lambda$,则由(1)式可得

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

$$\frac{4\pi n(L + \Delta L)}{\lambda + \Delta\lambda} = (2m + 1)\pi, \quad (3)$$

(2),(3)式化简后得

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (4)$$

再设传感器两个固定点之间所受应力与微型光纤法布里-珀罗干涉传感器受应力所产生的应变成比例,并设该比例系数为 k ,则微型光纤法布里-珀罗干涉传感器的应变可表示为

$$\varepsilon = k \frac{\Delta L}{L} = k \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (5)$$

可见干涉条纹波长的漂移量和微型光纤法布里-珀罗干涉传感器的应变量成正比。实验结果如图 6 所示,微型光纤法布里-珀罗干涉传感器的应变与波长的漂移量呈线性关系,线性度达 99.69%,与理论相符。在 $0 \sim 350 \mu\varepsilon$ 的范围里,干涉条纹波长漂移了 1.95 nm,灵敏度为 $0.006 \text{ nm}/\mu\varepsilon$ 。

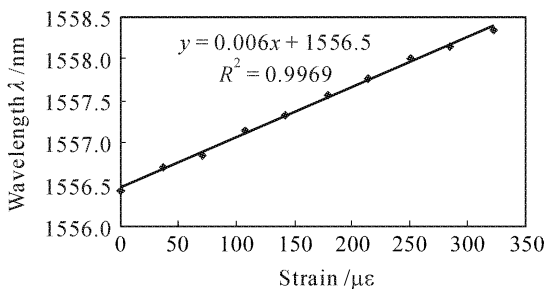


图 6 1556 nm 区域波谷位置与应变的关系

Fig. 6 Relationship of strain and wave trough in 1556 nm area

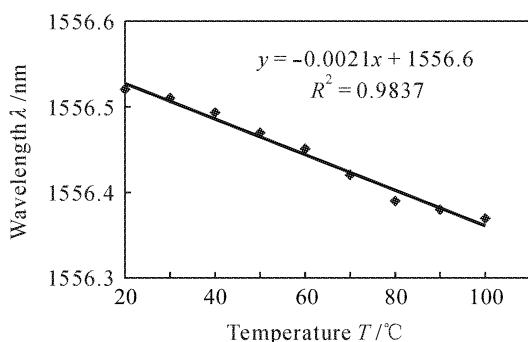


图 7 波长随温度的变化

Fig. 7 Temperature leads to the shift of wavelength

为了研究微型光纤法布里-珀罗干涉传感器的温度特性,进行了温度实验。控制温度箱,使温度从 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $100 \text{ }^\circ\text{C}$,每升 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 采集一次数据,得到的实验结果如图 7 所示。从图中可以看出,在 $20 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内,波长的漂移量与温度成线性,灵敏度为 $-0.0021 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。随着温度的升高,波长

往短波方向有轻微的漂移,说明腔长在减小,与传统的法布里-珀罗干涉传感器正好相反,称之为负温度特性。这主要是因为微型光纤法布里-珀罗干涉传感器是一个矩形槽,当温度升高时,处于自由状态的两个反射端面会向腔体中间膨胀,导致腔长减小,因而呈现负温度特性。另外,由于石英的热膨胀系数很小(约为 $10^{-7}/^\circ\text{C}$),因此温度的灵敏度较低。

尽管微型光纤法布里-珀罗干涉传感器的温度灵敏度较低,但是温度和压力的交叉敏感性还是较大的,因此需要对温度进行校正。在加工了微型光纤法布里-珀罗干涉传感器的光纤上再加工一个光纤布拉格光栅^[11],使微型光纤法布里-珀罗干涉传感器受力拉伸用于测量应变,而光纤布拉格光栅不受力用来测量温度以补偿温度所引起的应变误差。

4 结 论

介绍了一种利用飞秒激光加工微型光纤法布里-珀罗干涉传感器的方法,虽然存在加工端面平行度不高,传感器腔内有粉尘或微小附着物等问题,但都提出了相应的改进措施。实验表明,在 $0 \sim 350 \mu\varepsilon$ 的应变范围内,微型光纤法布里-珀罗干涉传感器的应变灵敏度为 $0.006 \text{ nm}/\mu\varepsilon$,线性度高达 99.69%;在 $20 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内,微型光纤法布里-珀罗干涉传感器的灵敏度为 $-0.0021 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,具有负温度特性,这与传统法布里-珀罗干涉传感器不同,本文从热力学的角度给出了定性的解释,并就温度和应变的交叉敏感性提出了相应的改进方案。微型光纤法布里-珀罗干涉传感器可望在大型结构智能监测、生物医疗、油井测量等领域发挥重要作用。

参 考 文 献

- Jin Wei, Liao Yanbiao, Zhang Zhipeng *et al.*. Guided Wave Optical Sensor: Principle and Technology [M] Beijing: Science Press, 1998. 217~242, 287~319
靳 伟,廖延彪,张志鹏 等. 导波光学传感器:原理与技术[M]. 北京:科学出版社,1998. 217~242, 287~319
- Shaoji Jiang, Youcheng Liang, Xi Zhu *et al.*. Asymmetric Fabry-Perot interferometric cavity for fiber optical sensors [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(10):563~565
- Rao Yunjiang, Zhou Changxue, Ran Zengling *et al.*. SFDM/WDM for large number of fiber-optic F-P sensors based on chirped fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):631~635
饶云江,周昌学,冉曾令 等. 啁啾光纤光栅法布里-珀罗传感器波分频复用[J]. 中国激光, 2006, **33**(5):631~635
- Guanghua Cheng, Qing Liu, Yishan Wang *et al.*. Writing of internal gratings in optical glass with a femtosecond laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(2):119~121
- Cheng Guanghua, Liu Qin, Yang Lingzheng *et al.*. The

- nonlinear absorption and configuration of refractive index changes of fused silica induced by femtosecond laser pulse [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11):1281~1285
程光华,刘青,杨玲珍等. 飞秒激光脉冲诱导透明介质的非线性吸收和折射率改变轮廓研究[J]. 光子学报, 2003, **32**(11):1281~1285
- 6 Sun Xiaohui, Zhou Changhe. Fabrication of microoptical elements with femtosecond laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):133~137
孙晓慧,周常河. 飞秒激光加工微光学元件的研究[J]. 中国激光, 2006, **33**(1):133~137
- 7 Zhang Peng, Zhu Yong, Tang Xiaochu *et al.*. Demodulation of the optical fiber Fabry-Perot sensor based on Fourier transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2):186~189
章鹏,朱永,唐晓初等. 基于傅里叶变换的光纤法布里-珀罗传感器解调研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(2):186~189
- 8 Zhang Xianda. *Modern Signal Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 65~151
张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2002. 65~151
- 9 Rao Yunjiang, Wang Xijing, Zhu Tao *et al.*. Demodulation algorithm for frequency-division-multiplexed fiber-optic Fizeau strain sensor networks [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):997~1000
饶云江,王希晶,朱涛等. 光纤菲佐传感器频分复用网络解调方法研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(7):997~1000
- 10 Yunjiang Rao. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, (12):227~237
- 11 Zeng Xiangkai, Rao Yunjiang, Yu Banmei *et al.*. Simultaneous static-strain, temperature and vibration measurement using a single fiber-optic sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(10):1254~1258
曾祥楷,饶云江,余般梅等. 光纤应变、温度、振动同时测量新技术的研究[J]. 光子学报, 2001, **30**(10):1254~1258