

文章编号: 0258-7025(2009)06-1459-04

飞秒激光加工的高对比度法布里-珀罗干涉传感器

饶云江^{1,2} 邓明¹ 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 成都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 利用 800 nm 的飞秒激光在普通单模光纤上一次成型地制作一个微矩形槽作为法布里-珀罗 (Fabry-Pérot, F-P) 干涉腔, 然而, 制作的 F-P 干涉腔端面粗糙、倾斜, 使得该传感器只有 ~5 dB 的对比度, 为后续的信号处理带来了一定的困难, 且在一定程度上降低了测量的准确性与可靠性。通过选择最佳的加工参数、改善加工环境和改进加工方法, 制作出了平整度好、端面平行的 F-P 干涉腔, 其对比度达到了 ~18 dB。此外, 该 F-P 干涉传感器的全光纤结构使其能耐 800 °C 的高温, 为在恶劣环境下工作提供了应用潜力。

关键词 传感器; 光纤光学; 光纤传感器; 飞秒激光加工; 光纤 F-P 腔

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1459

Visibility-Enhanced In-Line Fabry-Pérot Interferometers by the Use of Femtosecond Lasers

Deng Ming¹ Rao Yunjiang^{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 Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks Technologies
of Education Ministry of China, University of Electronics Science & Technology of China,
Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract A novel in-line Fabry-Pérot interferometer is directly fabricated in a single mode fiber by the use of femtosecond lasers. The spectrum fringe of this interferometer has the visibility of ~5 dB due to the rough and slopped cavity surfaces, making it more difficult for post signal processing and reducing the measurement accuracy and reliability. By choosing the optimal parameters, improving machining environments and methods, ideal Fabry-Pérot cavities are fabricated, which are so smooth and parallel that the fringe visibility is as high as ~18 dB. In addition, with an accessible cavity and all-fiber structure, this sensor can work in high temperatures up to 800 °C, which is attractive for sensing applications in harsh environments.

Key words sensors; fiber optics; optical fiber sensors; femtosecond laser processing; fiber Fabry-Pérot cavity

1 引言

光纤法布里-珀罗 (Fabry-Pérot, F-P) 干涉传感器凭借其抗电磁干扰能力强、精度高、稳定性好、可靠性好、分辨率高等优势, 被广泛用于测量应变、压力、振动、加速度、温度、超声波、折射率等物理量^[1~5]。传统的光纤 F-P 干涉传感器是通过将两段

光纤插入一根毛细管中或者将其焊接在一段空心光纤上制作而成的^[6], 然而该方法基于手工操作、耗时、耗力、重复性差, 且还需要进行腔长的标定, 使得光纤 F-P 干涉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 F-P 干涉传感器的进一步广泛应用。为了克服以上的缺点, 文中提出了利用

收稿日期: 2008-11-10; 收到修改稿日期: 2008-12-22

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(60537040)、重庆市自然科学基金(CSTC2008BB2165)、重庆大学骨干教师创新基金和重庆大学研究生创新基金资助课题。

作者简介: 饶云江(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信及传感技术等方面的研究。

E-mail: yjrao@cqu.edu.cn

飞秒激光微细加工工艺一次成型地在普通单模上进行光纤 F-P 干涉传感器的制作,该方法不需要昂贵的掩模版,通过计算机控制,可以精确制作任意腔长的光纤 F-P 干涉传感器,重复性高、成本低廉,是一种更适合于批量加工的方法。文献[4,5]首次利用飞秒激光分别在普通单模光纤和光子晶体光纤上制作出了微光纤 F-P 干涉传感器,然而制作的传感器反射光强小,对比度低,使得后续的信号处理比较困难并且也降低了测量的准确性与可靠性。本文在此基础上,采取了一些有效的措施,比如,调整激光器的参数、改进加工方法、改善实验环境等,制作出了高对比度的光纤 F-P 干涉传感器。该光纤 F-P 干涉传感器的全光纤结构使其能耐 800°C 的高温且具有较低的温度灵敏度,在光传感领域具有较大的潜在应用价值,可以实现一些物理量的绝对测量。

2 传感器的制作

在加工过程中飞秒激光在极短的时间和极小的空间内与光纤(硅)相互作用,向作用区域内集中注入的能量获得有效的高度积累,作用区域内的温度在瞬间内急剧上升,并将远远超过硅的熔化和气化温度值,使得硅高度电离成高温、高压、高密度的等离子体,最终作用区域内的硅以等离子体向外喷发的形式得到去除。等离子体的喷发几乎带走了全部热量,作用区域内的温度基本恢复到加工前的状态,从而在这一过程中避免了热熔化的存在,实现了相对意义上的冷加工,大大减弱了传统加工中热效应带来的诸多负面影响^[7~9]。

图 1 是光纤 F-P 干涉传感器的结构示意图。根据干涉腔的条件和光纤参数,F-P 干涉腔腔长 L 取值范围为 $10\sim 100\ \mu\text{m}$,腔体的宽度 W 为 $8\sim 30\ \mu\text{m}$,腔体的深度 $D > 62.5\ \mu\text{m}$,以保证腔体穿过纤芯。在所加工的结构中,取 $D \times W \times L = 50\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m} \times 75\ \mu\text{m}$ 。采用的激光光源是钛宝石激光再生放大器(Spitfire-F, Spectra-Physics),波长为 $800\ \text{nm}$,能量为

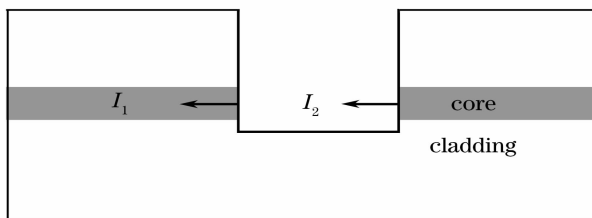


图 1 光纤 F-P 干涉传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic configuration of the fiber-optic Fabry-Pérot interferometers

$100\ \mu\text{J}$,脉冲宽度为 $100\ \text{fs}$,重复频率为 $1\ \text{kHz}$ 。普通单模光纤(SMF-28)固定在一个三维微动台上,控制三维微动台使其与飞秒激光焦斑产生相对移动,激光在 X 和 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 $15\ \mu\text{m}$,进入第二层的扫描,总共提升 5 次即可完成 $75\ \mu\text{m}$ 的深度腔体制作。在整个过程中,微动台的移动速率约为 $300\ \mu\text{m/s}$ 。图 2 是腔长为 $50\ \mu\text{m}$ 的光纤 F-P 干涉传感器的实物照片。从图 2 可以看出,该光纤 F-P 干涉传感器的两个反射面严重不平行,导致腔体内很大一部分光被散射出去从而降低了反射光强,使得干涉谱的强度小至 $-38\ \text{dBm}$,对比度低至 $\sim 5\ \text{dB}$,如图 3 所示。这样对后续信号处理极为不利且严重降低了测量的准确性与可靠性。此外,在加工过程中,溅射出来的微小颗粒吸附在腔体或者光纤的表面而污染腔体端面,降低了端面的反射率,也会降低干涉谱的光强和对比度。

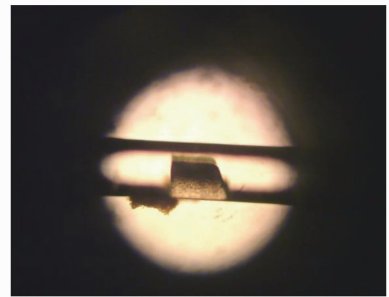


图 2 光学显微镜下端面倾斜的 F-P 干涉传感器
Fig. 2 Optical micrograph of a F-P sensor with sloped surface

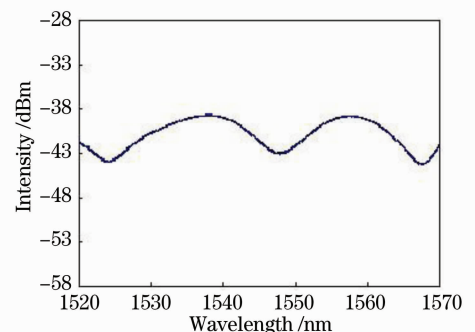


图 3 端面倾斜的 F-P 干涉传感器的反射谱
Fig. 3 Interference spectrum of a F-P sensor with sloped surface

为了改善加工端面的质量,采取以下几种措施: 1)调整激光加工的参数,比如,能量减小为 $20\ \mu\text{J}$,微动台的移动速率减小为 $10\ \mu\text{m/s}$,采用 $50\times$ 目镜; 2)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 F-P 干涉腔;3)用超声波清洗装置清洗掉吸附在腔体端面和光纤表面的粉尘。改善后的光纤 F-P 干涉传感器如图 4 所示,其干涉谱如图 5 所示。可以看出,与上述加工的光纤 F-P 干涉腔相比,改善后的 F-P 干涉腔端面更加平行、整洁,其干涉条纹更加光滑、精细、规则,其干涉谱的强度比前者提高了~6 dBm,对比度约为前者的 3 倍,降低了后续信号处理的难度,提高了测量的准确性和可靠性,提供了复用的潜力。

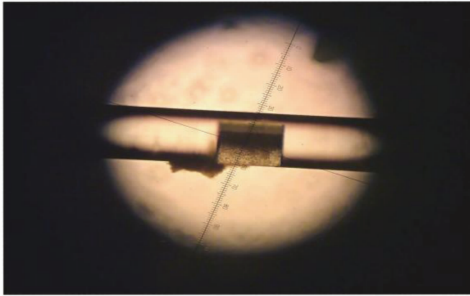


图 4 光学显微镜下端面平行的 F-P 干涉传感器

Fig. 4 Optical micrograph of a F-P sensor with parallel surface

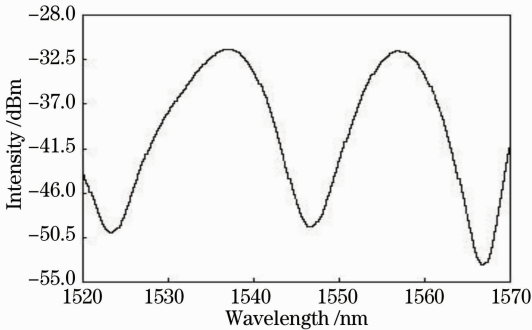


图 5 端面平行的 F-P 干涉传感器的反射谱

Fig. 5 Interference spectrum of a F-P sensor with parallel surface

3 实验结果及分析

实验研究了光纤 F-P 干涉传感器的温度特性,将所制作的光纤 F-P 干涉传感器穿过高温炉拉直后将其两端分别固定在微动态上,且保持整个光纤 F-P 干涉传感器呈水平放置,其实验装置如图 6 所示。从宽带光源发出的光经过 2×1 耦合器后进入光纤 F-P 干涉传感器,从传感器反射回来的信号再通过耦合器进入光谱分析仪,然后通过计算机进行数据采集和处理。实验过程中,改变高温炉的温度使其从 200 ℃ 逐渐升到 800 ℃,通过光谱仪实时监测干涉条纹的变化,并每隔 60 ℃ 记录一次数据,结果如图 7 所示。可以看出,该光纤 F-P 干涉传感器

能耐 800 ℃ 的高温,且在此温度范围内,腔长随着外界温度的升高而线性增加,温度灵敏度为 0.12 nm/℃,远小于文献[6]中的光纤 F-P 干涉传感器的温度灵敏度,减小了温度交叉敏感效应,在应变、折射率等物理量的高精度测量方面有广泛的应用潜力。

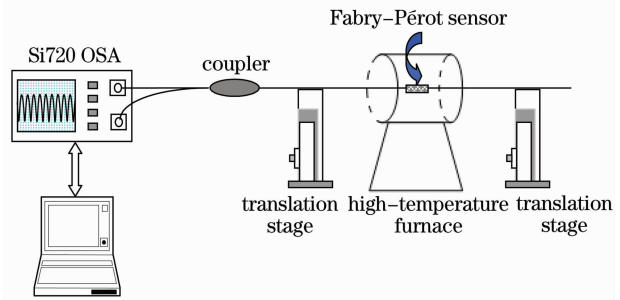


图 6 温度实验装置图

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental set-up

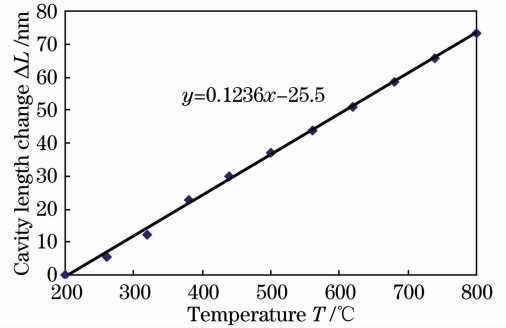


图 7 腔长随温度的变化

Fig. 7 Temperature versus the change of cavity length

4 结 论

采用飞秒激光在普通单模光纤上一次成型地制作出微光纤 F-P 干涉传感器,与传统的 F-P 干涉传感器相比,该传感器具有体积小、制作简单、成本低、重复性强、易于批量生产等优点。此外,实验发现该传感器具有高达~18 dB 对比度且能耐 800 ℃ 的高温。作为全光纤器件,微光纤 F-P 干涉传感器具有较大的潜在应用价值,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

- 1 Yunjiang Rao. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2006, **12**: 227~237
- 2 Shaoji Jiang, Youcheng Liang, Xi Zhu *et al.*. Asymmetric Fabry-Pérot interferometric cavity for fiber optical sensors [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(10): 563~565
- 3 Liu Weijun, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Novel Fabry-Pérot 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
- 4 Y. J. Rao, M. Deng, D. W. Duan *et al.*. Micro Fabry-Pérot interferometers in silica fibers machined by femtosecond laser[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(21): 14123~14128
- 5 Wang Wei, Rao Yunjiang, Tang Qingtao *et al.*. Micromachining of an in-fiber extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensor 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
- 6 J. S. Sirkis, D. D. Brennan, M. A. Putman *et al.*. In-line fiber etalon for strain measurement [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(11): 1256~1262
- 7 Guanghai 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
- 8 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
- 9 Deng Yunpei, Jia Tianqing, Leng Yuxin *et al.*. Experimental and theoretical study on the ablation of fused silica by femtosecond lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(7): 2216~2220
- 邓蕴沛,贾天卿,冷雨欣等. 飞秒激光烧蚀石英玻璃的实验与理论研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(7): 2216~2220