

文章编号:1004-4213(2010)04-0584-4

飞秒激光制造微型光纤法布里-珀罗干涉传感器*

吴易明,李明[†],程光华

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 a. 光学定向与瞄准技术研究室;

b. 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,西安 710119)

(2 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要:基于飞秒激光光刻技术,提出了光纤端面光刻制造微型光纤法布里-珀罗干涉传感器的方案.该方案解决了传统飞秒激光制造光纤 F-P 传感器的平行度差的问题,制造了对比度超过 20 dB 的高灵敏度和高分辨率的微型 F-P 光纤传感器件.该制造方法简单、参量可控,制作的器件可应用恶劣温度条件下应变的精确测量.

关键词:飞秒激光;光纤 F-P 干涉型传感器;平行度和光洁度

中图分类号:O437

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103904.0584

0 引言

光纤传感器具有诸多优良特性,可实现某些特殊极端条件下的测量工作,具有非常广泛的工程应用价值.在众多形式的光纤传感器中,法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)干涉型光纤传感器因其结构简单灵巧、体积小、安装简便且成本较低在很多领域具有广阔的应用前景. F-P 干涉型传感器分为非本征型和本征型两种,结构简单的非本征型 F-P 光纤传感器由于不需要将一束光分成两束光和将两束光合成一束光,具有单传输线、单端点和灵敏度高的优点,成为近年来研究的热点.

由于飞秒激光烧蚀具有较低的损伤阈值、有限的热影响区域和较高的加工准确度,在激光微加工领域具有重要的应用价值^[1-4]. 实验中飞秒激光脉冲持续时间只有飞秒量级,远小于材料中受激电子通过声子将能量转移、转化等形式的释放的时间,从而避免了热扩散的影响,在加工过程中限制了热影响区,避免了热熔化的存在,实现了相对意义上的“冷”加工,因此飞秒激光光刻孔的周围区域将不会受到热影响,而且其边缘不会出现大量的熔化物质^[5]. 利用飞秒激光与透明介质作用的库仑爆炸机理^[6-8],将高功率飞秒激光脉冲聚焦到光纤表面,当焦点的功率密度超过材料的非线性效应阈值时,这种高强度脉冲激光与介质相互作用的非线性效应,在焦点处能够产生高温等离子体微爆,形成一个亚微米尺度结构改变,利用软件控制飞秒激光脉冲在光纤中

制作微腔,封装后就得到微型光纤 F-P 干涉传感器.

1 影响光纤 F-P 传感器性能的主要因素

干涉型光纤传感器,其原理是外界因素使得光纤中传输光波的相位发生变化进而改变出射光(干涉光)的强度,以此达到测量目的.

$$\varphi = 2\pi nL/\lambda_0 \quad (1)$$

式(1)中, λ_0 为光在真空中的波长, n 为光纤纤芯的折射率, L 为光在光纤中传播的距离.一般通过外界因素可改变 n 和 L ,进而可改变相位 φ ,而相位 φ 和出射光光强 I 密切相关,从而改变出射光光强.

光纤传感器的输出的干涉光强与反射面间距 L 、工作波长和两个反射面介质折射率 n 以及界面反射率 R 有关,在本实验中腔长、工作波长和介质折射率都是容易标定的量,所以本文主要研究微腔轴界面反射率 R 和微腔干涉对比度的关系.很显然,反射率 R 是由微腔相干面的平行度和光洁度决定的,故微型光纤 F-P 干涉性传感器,其性能主要由两个因素决定:微腔的光洁度和平行度,激光脉冲能量和切割速度对制作样品表面光洁度的影响已经被很多人深入研究过^[9-11],目前只有平行度问题亟待解决.传统的飞秒激光制造 F-P 光纤传感器是采用飞秒激光在光纤侧面写入微腔,但是此种方法制作的传感器其光谱图像的干涉条纹不太平滑,而且对比度很低,没有使用价值.原因是由于准直好的激光光束进入显微物镜聚焦后,形成的光束是一个锥形光束,垂直样品写入的时候,随着写入深度的增加,在写入得到的微腔壁的两侧不能均匀分配激光能量,造成倾角的出现,其倾斜角度与激光能量、激

* 国家自然科学基金(60678013)资助

[†] Tel: 029-88887640

Email: liming@opt. ac. cn

收稿日期: 2009-06-26

修回日期: 2009-11-17

光写入速度以及不同数值孔径的激光写入头有关,大致范围为 $5^{\circ} \sim 16.2^{\circ}$ ^[11],如图 1,这样制作的光纤传感器的微腔相对腔面平行度很低,没有实用价值.

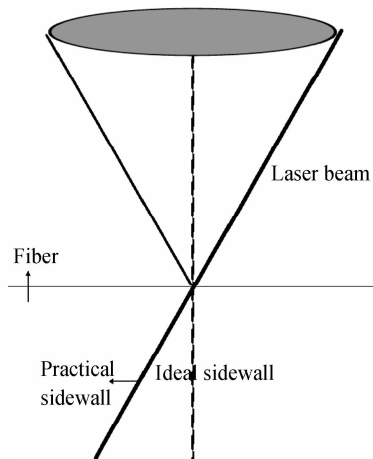


图 1 倾角形成的原理图

Fig. 1 Setup of forming the slope of the cutting

本研究小组最初发展了一种双面加工法制作微型 F-P 光纤干涉型传感器^[11],利用双面加工消除微腔轴向相对端面倾斜角的方法保持腔面平行度,制作的微型 F-P 光纤干涉型传感器效果良好.但在制作过程中,对于激光光束准直后倾斜一个固定角度的技术环节不好控制,且技术手段方面,双面加工存在两次光纤轴向和 X 轴平台方向准直和需要再次重新对微腔定位的问题.目前提出了一种更为简易的技术手段:飞秒激光脉冲由光纤端面写入微腔制作微型 F-P 光纤干涉型传感器.本文介绍了利用飞秒激光与透明介质作用的机理,采用实验室具备的微加工系统,以飞秒激光作为微纳加工工具,通过微加工系统控制传感器的腔长,通过控制激光参量和激光写入的方法控制微腔光洁度^[11],利用端面加工法解决微腔平行度问题,避免了传统光纤 F-P 传感器制作和性能上的各种缺陷,且传感区不需封装、成本低廉、参量可控适于批量生产,可以达到产业化的需求.

2 实验装置

图 2 为飞秒激光微加工系统的实验装置示意图,主要包括飞秒激光系统、光束控制系统、实时监控和聚焦系统、三维移动系统、快门和工业控制计算机及 CAD 控制软件.实验中使用美国光谱物理公司的 MAITAI 自锁模钛宝石激光器作为飞秒激光种子源,输出的单脉冲能量约为 10 nJ,脉宽为 80 fs.放大器为光谱物理公司的 Spitfire,在 1 kHz、5 mJ 的激光抽运下,输出能量 800 μ J,激光输出脉宽小于 120 fs.光束控制系统包括光束匀化、二分之一波片和偏振片组合的能量调节元件,其目的是保

证好的光束质量.平场长工作距离聚焦物镜一方面将通过 45° 反射镜的飞秒激光聚焦在样品上,同时由 LED 提供光源将样品表面形貌成像在 CCD 上,其中 CCD 和物镜的距离是可调的.待制作的光纤样品放置在一个三维步进式精密移动平台上,移动平台为德国 PI 公司的 M405、M126 和 M111,在 X、Y、Z 方向的步长分别为 100 nm、118 nm 和 7 nm.在具体制作光纤传感器件的过程中,搭建了一套对光纤传感器件检测分析的光谱分析系统,这套系统由日本 Yokogawa electric 公司生产的光谱分析仪和中心波长为 1 550 nm 的宽带光源和光纤环形器构成,实验样品采用普通的单模光纤.本文中所开展的实验全部是在洁净(千级)空气条件下进行的.计算机控制的快门和三维移动平台在电脑的控制下,协同工作.整个系统由计算机自动控制,用 VC 语言程序编程控制三维微移动平台的运动的速度、位置、加速度和快门的开关,系统的位置误差不超过 0.1 μ m.

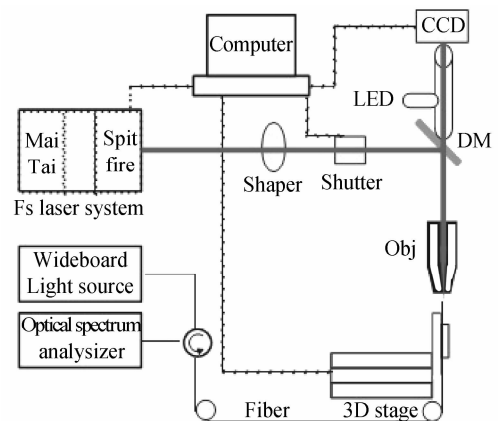


图 2 飞秒激光微加工系统的实验装置

Fig. 2 Setup of femtosecond pulse laser micro-maching system

3 端面加工制作微型光纤传感器的工艺过程

由于激光写入微槽的时,虽然微槽侧壁会产生倾斜角,但是微槽底部是垂直于写入激光光束的一个平滑的平面,利用此平面作为微型 F-P 光纤传感器的相干界面,制造微型 F-P 光纤干涉型传感器件将解决光纤 F-P 腔平行度的问题.

实验过程中首先利用调平水泡调整微移动平台 X 方向、Y 方向平台水平,调平误差为 $10''$,调整 Z 方向平台与 X、Y 方向平台垂直,再调整激光光束方向垂直向下,然后取一段光纤一端去掉涂层端面切平并用酒精清洗.另一端和光谱分析仪连接,利用光纤夹具,使光纤轴向与激光光束以及三维移动平台的 Z 轴重合,光纤端面表面经透镜在 CCD 成像,微调整至光纤端面表面的像清晰,说明此时光纤端

面与激光光束基本垂直. 经过光束整形后的激光光束经物镜聚焦到光纤端面, LED 光经半透半反镜使光纤端面形貌成像在 CCD 上, 实时监控激光写入过程. 由计算机控制三维移动平台按设计的程序移动, 在光纤端面写入微腔, 如图 3. 实验中采用写入头数值孔径为 0.4 的显微物镜, 激光参量选择为飞秒激光脉冲能量为 3 mW、激光光束孔径为 0.5 mm. 本文实验研究中, 采取的微移平台的移动速度均是 0.3 mm/s. 图 4 为在光纤端面飞秒激光脉冲写入的深度为 50 μm , 正视图尺寸为 ($67 \times 67 \mu\text{m}^2$) 的微腔.

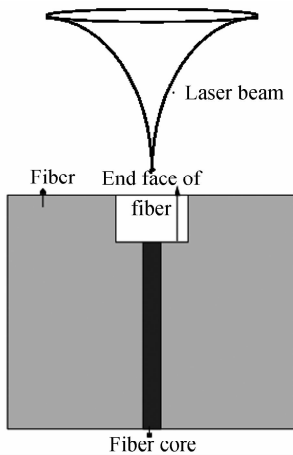


图 3 fs 激光端面加工示意图
Fig. 3 Setup of fabricating on the end of the fiber with fs laser

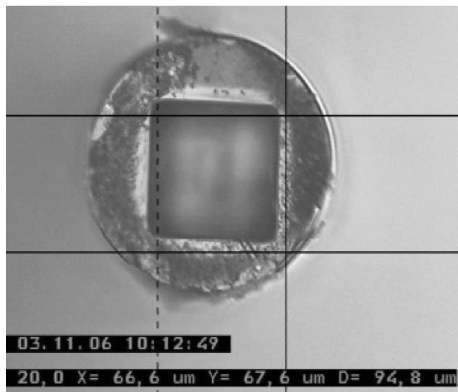


图 4 fs 激光端面制作微腔俯视图
Fig. 4 Planform of cavity with fs laser fabricating

光纤端面写入的微槽, 由于激光写入时, 写入光束与光纤端面基本垂直, 并与光纤轴向平行. 由激光光刻的原理知, 微槽的底面将于写入光束以及光纤轴心垂直, 即微槽底面将平行于光纤端面, 误差不会超过分级量级, 远远小于侧面刻槽造成的倾角角度. 将微槽 (如图 5(a)) 放在酒精溶液中浸泡, 清洗激光写入时的微尘, 再取一段光纤, 两端切平, 取任意一端 (如图 5(b)) 与制作微腔后的光纤端面焊接, 以微槽底面作为微型光纤干涉传感器腔的轴向对面的一个相干面, 这样就在光纤中构成了一个微型光纤 F-P 干涉型传感器, 如图 5(c), 这样就得到了理论上

严格平行的微腔. 此方案避免了光纤传感区的封装并且只需微腔底面直径大于纤芯直径 ($\varphi = 10 \mu\text{m}$), 且微腔居于光纤中心体积很小, 同时避免了普通飞秒激光侧面加工制作的光纤 F-P 腔易断裂的情况.

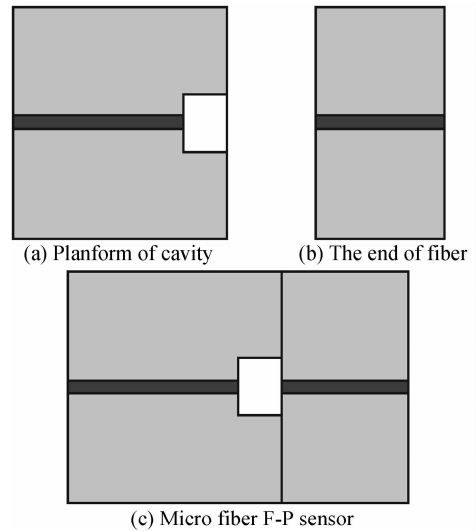


图 5 fs 激光端面加工制作的微型 FP 光纤传感器
Fig. 5 Micro fiber F-P sensor with femtosecond laser pulses fabricating on the end of the fiber

用光谱测试系统对该微型光纤 F-P 干涉型传感器进行测试 (腔长为 50 μm), 该系统由日本 Yokogawa electric 公司生产的光谱分析仪和中心波长为 1 550 nm 的宽带光源和光纤环形器构成, 与制作的光纤传感器相连, 如图 1. 由宽带光源提供的光束在传感腔端面干涉, 得到了很好的干涉光谱图, 干涉条纹曲线平滑, 对比度为 25 dB 的干涉光谱图 (如图 6), 且干涉条纹非常平滑、灵敏度高, 说明此方案制作微型 F-P 光纤干涉型传感器效果良好.

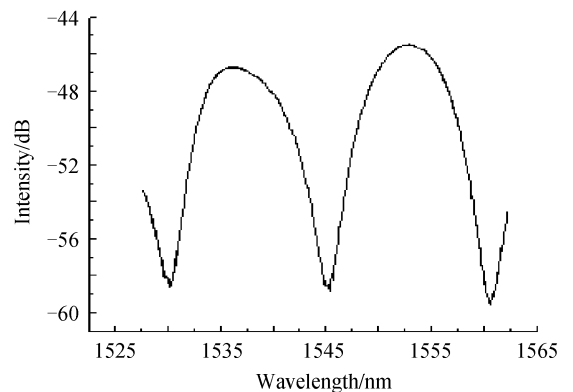


图 6 端面制作的腔长 50 μm 的干涉光谱图
Fig. 6 Interference spectrum of an FP sensor with a 50 μm cavity length. on the end of the fiber

4 结论

利用飞秒激光在光纤端面写入微槽, 从根本上解决了飞秒激光制作微型 F-P 光纤干涉型传感器

的技术难点,制作的器件已经达到了高灵敏度的要求,并且具有较高的加工效率和准确度,微腔参量可控,对加工装备要求简单,有望实现光纤 F-P 腔的规模化制造,具有很好的应用前景。

参考文献

- [1] ZHANG Hong-hai, FAN Xi-qiu, HU Xiao-feng, *et al.* A novel method of fabricating microlens arrays [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)*, 2006, **34**(6): 77-79.
张鸿海, 范细秋, 胡晓峰, 等. 一种微透镜阵列制作方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, **34**(6): 77-79.
- [2] HE Miao, YI Xin-jian, CHENG Zu-hai, *et al.* Research on fabrication of 128×128 element GaAs concave microlenses array device[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **28**(6): 71-73.
- [3] CHAN J, HUSER T, RISBUD S H, *et al.* Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses[J]. *Opt Lett*, 2001, **26**(21): 1726-1728.
- [4] LI Ming, CHENG Guang-hua, ZHAO Wei, *et al.* Concave microlens arrays produced by femtosecond laser with HF acid etching[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 547-550.
李明, 程光华, 赵卫, 等. 飞秒激光和酸刻蚀方法制作凹面微透镜阵列模具及其复制[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 547-550.
- [5] DACHRAOUI H, HUSINSKY W. Fast electronic and thermal processes in femtosecond laser ablation of Au[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **89**(10): 104102. 1-104102. 3.
- [6] HU Zhan, SINGHA S, LIU Yao-ming, *et al.* Mechanism for the ablation of Si<111> with pairs of ultrashort laser pulses [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, **90**(13): 131910. 1-131910. 3.
- [7] LENNER M, KAPLAN A, PALMER R E. Nanoscopic coulomb explosion in ultrafast graphite ablation[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, **90**(15): 153119. 1-153119. 3.
- [8] DACHRAOUI H, HUSINSKY W, BETZ G. Ultra-short laser ablation of metals and semiconductors: evidence of ultra-fast coulomb explosion[J]. *Appl Phys A*, 2006, **83**(2): 333-336.
- [9] ZHENG H Y, LIU H, WAN S, *et al.* Ultrashort pulse laser micromachined microchannels and their application in an optical switch[J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2006, **27**(9-10): 925-929.
- [10] NOLTE S, WILL M, AUGUSTIN M, *et al.* Cutting of optical materials by using femtosecond laser pulses, lithographic and micromachining techniques for optical component fabrication [C]. *SPIE*, 2001, **4440**: 152-160.
- [11] LI M, CHENG G, ZHAO W, *et al.* Inscription high-fringe visibility Fabry - Perot etalon in fiber with a high numerical aperture objective and femtosecond laser[J]. *Laser Physics*, 2008, **18**(8): 1-4.

Fabricating Micro Fiber Fabry-Perot Sensor with Femtosecond Laser Pulses

WU Yi-ming, LI Ming, CHENG Guang-hua

(1 a. *Optical Directional and Pointing Technique Research Center*; b. *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)
(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Based on femtosecond laser inscription technology, a novel method for femtosecond laser micromachining system is proposed to fabricate a microfiber Fabry-Perot (F-P) cavity on the fiber end surface. This technique can solve the parallelism problem of the traditional fiber F-P sensors inscribed by femtosecond laser. The F-P interferometric sensor made by the proposed technique shows over 20 dB fringe visibility. This technique is parameter-controllable and easy to implement. It is a promising candidate of strain measurement in the case of extreme temperature circumstances.

Key words: Femtosecond laser; Fiber-optic Fabry-Perot cavity; Parallelism and Surface roughness



WU Yi-ming was born in 1975. Now he is an associate professor and a Ph. D. degree candidate at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS. His research interests focus on optical measurement technology of geometric sense and applied technology of polarization optics.