

飞秒激光加工光子晶体光纤 微型 F-P 传感器研究*

饶云江^{1,2}, 段德稳¹, 杨晓辰¹, 邓明¹, 朱涛¹, 程光华², 李明²

(1 重庆大学 光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

(2 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, 西安 710119)

摘 要:利用飞秒激光脉冲在光子晶体光纤上熔切出微小矩形孔从而构成光纤法珀干涉腔,并对这种传感器进行了实验测试,在 0~1 500 $\mu\epsilon$ 的应变范围内,干涉条纹波长相对于应变的灵敏度为 0.003 6 nm/ $\mu\epsilon$,线性度达 0.998 9.在 -20 $^{\circ}\text{C}$ ~100 $^{\circ}\text{C}$ 其温度系数为 0.958 nm/ $^{\circ}\text{C}$.利用飞秒激光在光纤上加工 F-P 腔方法简单,能够实现光纤 F-P 腔的规模化批量制造.

关键词:飞秒激光加工, 光纤应变传感器, 非本征型光纤 F-P 传感器, 光子晶体光纤

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2009)01-0091-3

0 引言

光纤法珀腔(Fabry-Perot, F-P)分为本征腔和非本征型 F-P 腔,本征光纤 F-P 腔制作起来工艺难度较高,而非本征光纤 F-P 腔传感器相对制作简单^[1].非本征型光纤 F-P 传感器因其具有灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀,电绝缘性好、便于与光纤传输系统组成遥测网络等优点被广泛的应用于测量应变、压力、振动、加速度、折射率等物理量^[2-6].然而传统的非本征 F-P 腔主要通过将两根单模光纤的端面加工为镜面反射面,装入一个密封玻璃管内而形成,在其制作过程中仍存在很多问题:1)全手工的制作过程使 F-P 传感器的可重复性较差,在对接两个光纤端面形成 F-P 腔时,腔长较难控制,因此如想制作一批相同腔长的 F-P 腔将十分困难;2)F-P 腔的制作中两个光纤端面容易被空气中的气体尘埃污染,以及在对接时用来连接两个光纤端面的毛细管也较容易损坏光纤端面.

本文报道了一种在光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)上直接制作的微型 F-P 传感器,系采用近红外飞秒激光器在 PCF 上直接写入的方法制作而成,制作方法简单,能够实现光纤 F-P 腔的规模化批量制造,具有较好的应用前景.还对用此方法加工形成的 F-P 传感器的温度和应变特性进行了测试.

1 微型 FP 腔结构的飞秒激光制作

在本 PCF F-P 腔制作中采用近红外飞秒激光

器,加工系统装置如图 1. PCF 为折射率导光型 PCF (ESM-12-01),主要成分为熔融石英 SiO₂. 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 nm,能量为 100 μJ ,脉冲宽度为 100 fs,重复频率为 1~5 kHz. 从飞秒激光器中出射的激光首先要通过一个直径为 10 μm 的空间光滤波器(Spatial Light Filter)以提高激光束的质量并扩束,在空间滤波器的小孔处加真空管或者微透镜可以防止击穿空气导致电离(加真空管便宜,不好装;微透镜简单,价格高).然后经分色镜反射后通过物镜(放大倍数 20,数值孔径 NA = 0.45)聚焦在待加工的 PCF 上.激光器出射光的能量由一个衰减器控制,衰减器由一个半波片和一个起偏器构成.用一个由计算机控制的三维移动平台(PI, German)来精确控制 PCF 在 x, y, z 方向的位置, x 方向上的准确度为 100 nm, y 方向上的准确度为 125 nm, z 方向上的准确度为 7 nm. 用一个发光二极管照亮被加工的 PCF,并通过 CCD 摄像头在

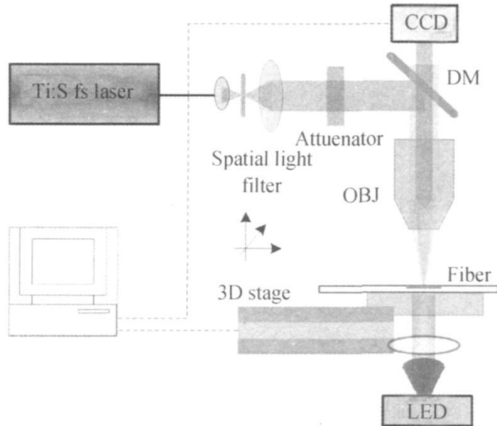


图 1 飞秒激光微加工系统
Fig. 1 Schematic of femtosecond laser micromachining system

* 国家自然科学基金重点项目(60537040)资助
Tel: 023-65106917 Email: ddw225@yahoo.com.cn
收稿日期: 2007-02-13
Journal Electronic Publishing. All rights reserved. http://www.cnki.net

显示器上实时的监控光纤 F-P 腔的形成过程.

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,

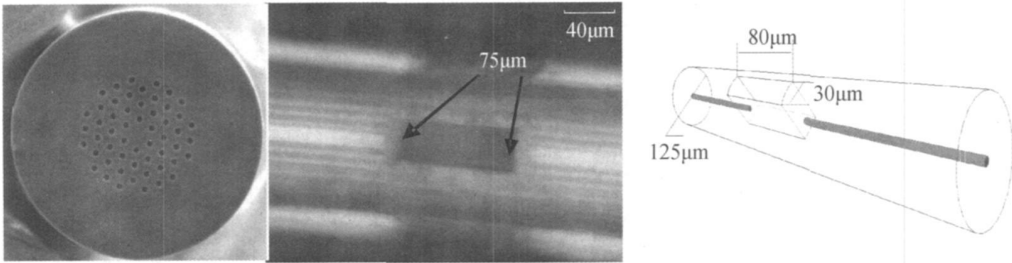


图 2 光子晶体光纤(EMS-12-01)端面与 F-P 腔实物照片及结构

Fig.2 Photo of the PCF and F-P cavity and its structure scheme

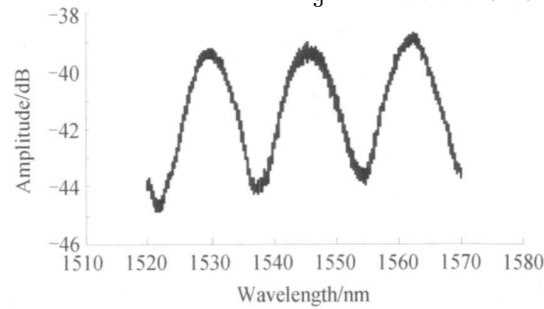


图 3 光子晶体光纤 F-P 腔反射光谱

Fig.3 Reflective spectrum of the PCF F-P cavity

2 实验结果与讨论

将图 2 微型 F-P 腔结构放置在恒温箱内测试其腔长随温度变化的规律,通过光谱仪监测实时并采

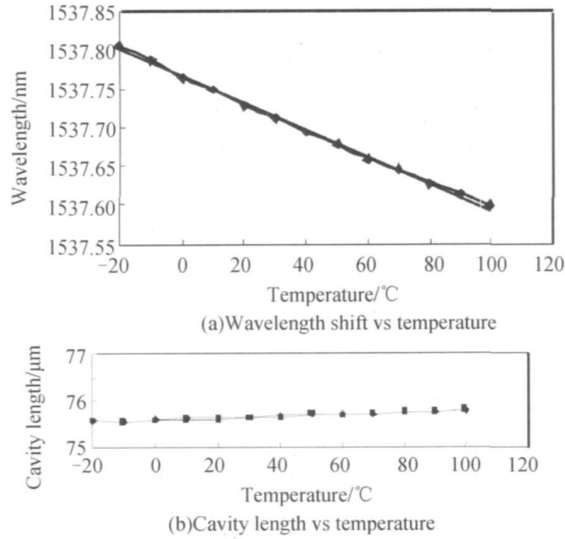


图 4 波长和腔长与温度变化的关系
Fig.4 Relationship of wavelength shift and cavity length vs temperature

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^[7-8],加工出的两个端面相对平整.在加工中,大部分粉尘以等离子体向外喷发的形式得到去除,腔体残留的少量粉尘可以通过超声波或者氢氟酸溶液洗去.实验中加工了的一个长、宽、深分别为 75 μm, 30 μm, 80 μm 的矩形槽,纤芯被挖空部分的两个端面形成了一个腔长约为 75 μm 的微型非本征 F-P 腔,其结构如图 2,其干涉谱线如图 3.

集数据.实验中温度变化范围为一 20℃~+100℃,每隔 10℃待温度稳定后采集一次数据.微型 FP 腔干涉谱线波长和温度变化的关系及其腔长随温度变化实验结果如图 4.

由实验结果可知,在温度由 -20℃变到 100℃的过程中,FP 腔腔长的最大变化量为 0.115 μm,其温度系数为 0.958 nm/℃,实验测得在 1 540 nm 附近条纹波峰漂移为 0.206 nm.

将 PCF 的两端分别固定在左右两个微动台上,施加预应力使光纤拉直,微型 F-P 腔位于被固定 PCF 的中部,固定一端的微动台,另一端拉伸 PCF.微动台的移动范围为 0~130 μm,微型 FP 腔应变特性实验结果如图 5.在 0~1 500 με 的范围里,波长漂移 5.43 nm,灵敏度为 0.003 6 nm/με.

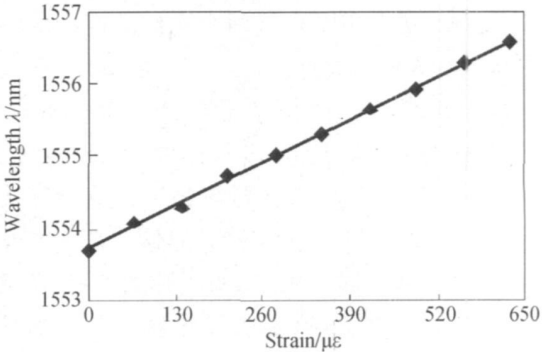


图 5 1 550 nm 区域波峰位置与应变的关系
Fig.5 Relationship between strain and wave-length shift at 1 550 nm band

3 结论

本文报道了一种在全反射型光子晶体光纤上用近红外飞秒激光器加工微型 F-P 传感器的方法,该

方法可从根本上克服光纤 F-P 腔传统制作方法中手工操作, 效率低下和重复性较差的缺点并对该法制作的 PCF F-P 腔作为光纤应变传感器做了温度和应变测评, 结果表明制作的 PCF F-P 腔作为光纤应变传感器具有较高的灵敏度和很好的线性度. 该 PCF F-P 腔在光纤上一次成型, 无需机械拼接, 作为全光纤在线器件, 可广泛应用于一般环境下的应变测量. 此外, 又因其直接制作于光纤上, 腔长较短、稳定等特性, 便于埋入材料或结构中形成分布式多点检测系统, 从而在光纤智能材料和结构领域中具有广泛的应用前景.

参考文献

[1] BI Wei-hong. Mathematical models for fiber optical Fabry-Perot interferometric cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(8): 744-747.
毕卫红, 光纤 Fabry-Perot 干涉仪在传感应用中的数学模型[J]. *光子学报*, 1999, 28(8): 744-747.

[2] BI Wei-hong, ZHENG Sheng-xuan. The optical fiber F-P interferometric strain measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(6): 542-545.
毕卫红, 郑绳萱. 光纤法布里-珀罗干涉式应变的测量[J]. *光子学报*, 1999, 28(6): 542-545.

[3] JACKSON D A. Monomode optical fiber interferometers for

precision measurements[J]. *J Phys E: Sci Instrum*, 1985, 18(18): 981-1001.

[4] RAO Y J. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. *Opt Fiber Technol*, 2006, 12(3): 227-237.

[5] ZHOU Chang-xue, RAO Yun-jiang, ZHU Tao. SFDM/CWDM of fiber-optic fizeau strain sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(11): 1472-1476.
周昌学, 饶云江, 朱涛. 光纤 Fizeau 应变传感器的波分频复用方法[J]. *光学学报*, 2005, 25(11): 1472-1476.

[6] SOHN I B, LEE M S, CHUNG J Y. Fabrication of optical splitter and passive alignment technique with a femtosecond laser[J]. *Photonics Technology Letters*, 2005, 17(11): 2349-2351.

[7] YANG Jian-jun. Femtosecond laser "cold" micro-machining and its advanced applications (I) [J]. *Laser & Optronics Progress*, 2004, 41(3): 41-57.
杨建军. 飞秒激光超精细“冷”加工技术及其应用(I)[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(3): 41-57.

[8] YANG Jian-jun. Femtosecond laser "cold" micro-machining and its advanced applications (II) [J]. *Laser & Optronics Progress*, 2004, 41(4): 39-47.
杨建军. 飞秒激光超精细“冷”加工技术及其应用(续)[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(4): 39-47.

Photonic Crystal Fiber Fabry-Perot Sensor Fabricated Using Femtosecond Laser

RAO Yun-jiang^{1,2}, DUAN De-wen¹, YANG Xiao-chen¹, DENG Ming¹, ZHU Tao¹, CHENG Guang-hua², LI Ming²

(¹ Key Lab of Optoelectronic Technology and System of Education Ministry, Chongqing University, Chongqing 400044, China)
(² State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Received date: 2007-06-19

Abstract: A micro fiber-optic Fabry-Perot sensor was fabricated by using femtosecond laser micromachining in a photonic crystal fiber. The temperature and strain characteristics of the novel sensor were evaluated by experiment and a strain sensitivity of 0.003 6 nm/and a linearity of 0.998 9 for a strain range of 0~1 500 were obtained. The temperature-to-cavity-length sensitivity is 0.958 nm/°C for a temperature range of -20 °C~100 °C. As this PCF F-P sensor can be mass-produced by simply using a femtosecond laser, it is anticipated that it can find wide applications in many fields.

Key words: Femtosecond laser micromachining; Fiber-optic strain sensor; Fiber Fabry-Perot cavity; Photonic crystal fiber



RAO Yun-jiang received his M. E. and Ph. D. degrees in optoelectronic engineering from Chongqing University in 1986 and 1990, respectively. He joined the Optoelectronics Division of Electric and Electronic Engineering Department in Strathclyde University, U. K., as a post-doctoral research fellow in 1990, then employed by Kent University in U. K. as a research fellow and a senior research fellow during 1992~1999. During 1999~2004, he was a Chang-Jiang Chair Professor in optical engineering at Department of Optoelectronic Engineering in Chongqing University, China. He is currently the head of Optical Fiber Technology Research Centre and Dean of School Communication & Information Engineering at University of Electronic Science & Technology of China (UESTC) and Chang Jiang Chair Professor in optical engineering.