

基于准分子激光微加工光纤 F-P 腔的压力传感器

吕艳华¹, 商娅娜², 刘奂奂², 庞拂飞²

(1. 上海大学 计算中心, 上海 200444; 2. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200444)

摘要: 为了实现薄膜厚度的精确控制从而提高传感器灵敏度, 设计了一种基于准分子激光微加工光纤法布里-珀罗(F-P)腔的压力传感器, 该 F-P 腔传感器是在光纤陶瓷插芯的端面上集成刻蚀的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)膜而构成。通过准分子激光对 PET 膜的刻蚀, 精确地控制 F-P 腔的深度与面积。该传感器在 0~1070 Pa 的范围内表现出 3.3 nm/kPa 的敏感度。

关键词: 法布里-珀罗; 光纤; 光纤传感器

中图分类号: TP212 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)09-0035-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.09.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Pressure sensor of fiber Fabry-Perot cavity based on excimer laser micromachining

LYV Yanhua¹, SHANG Yana², LIU Huanhuan², PANG Fufei²

(1. Computation Center, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: A pressure sensor of fiber Fabry-Perot (F-P) cavity based on excimer laser microfabrication is designed to control the thickness of the film accurately and improve the sensitivity of the sensor. The F-P cavity sensor is composed of etched polyethylene terephthalate (PET) film integrated on the end surface of the fiber ceramic ferrule. The depth and area of F-P cavity can be precisely controlled by excimer laser etching of PET film. The sensor exhibits sensitivity of 3.3 nm/kPa in the range of 0~1070 Pa.

Key words: Fabry-Perot; optical fiber; optical fiber sensor

0 引言

光纤非本征法布里-珀罗干涉仪(Extrinsic Fabry-Perot Interferometer, EFPI)是最重要的传感器技术之一, 其具有高灵敏度、小尺寸和抗电磁干扰等优点, 被广泛应用于多种物理量传感器的研究, 如压力应变^[1-5]、温度^[6]、声波^[7]和折射率^[8]等。典型的 EFPI 可以利用光纤端面与敏感薄膜构成, 由于其在静态或动态压力应用中具有良好传感性能而备受关注。据报道, 许多研究改善了 EFPI 敏感膜的性能。一方面, 在光纤端

面集成高灵敏度的敏感薄膜, 包括二氧化硅、银膜^[9,10]、蓝宝石^[11]和石墨烯^[12,13]等; 另一方面, 通过使用不同技术对敏感薄膜进行薄化可以提高传感器的灵敏度。

为了刻蚀二氧化硅薄膜, 研究人员提出通过使用氢氟酸改变腐蚀速率和控制刻蚀时间来控制薄膜厚度。该方法优点在于低成本和相对简单的工艺, 缺点是难以控制腐蚀过程和精确控制刻蚀膜的厚度。此外, 还有研究人员采用抛光结合湿刻蚀方法, 进一步减小薄膜的厚度。然而, 薄膜厚度的控制仍然是问题。为此, 一些研究人员选择波长为 1064 nm 的钕(Nd):YAG 激光对硅膜进行刻蚀^[14], 但是, 由于 Nd:YAG 激光器工作波长为 1064 nm, 工作波长较长、光子能量小, 加工主要是热效应过程, 即“激光热处理”, 无法实现高精度的加工。本文设计基于准分子激光微加工方法制备的光纤压力传感器, 其具有 EFPI 结构, 可精确地控制法布里-珀罗(F-P)腔的深度和面积。

收稿日期: 2019-07-15。

作者简介: 吕艳华(1978-), 女, 助理实验师, 主要从事光纤及光波导研究。现工作于上海大学计算中心, 从事光通信、光传感、光波导及光纤传感信号处理等领域前沿研究工作, 目前针对光纤传感重要技术问题提供解决方案。



1 准分子激光微加工光纤 F-P 腔

本文首先设计了一种简单的光纤 F-P 腔传感器, 其结构如图 1 所示。它是由标准的光纤陶瓷插芯头与刻蚀有凹槽结构的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)敏感膜粘贴而得。本研究膜片尺寸和厚度的控制对于获得性能良好的光纤 EFPI 传感器至关重要, 为此, 我们提出了一种利用 ArF 准分子激光器微加工技术的 EFPI 制备方法, 以在光纤端面上制造 F-P 腔。准分子激光的波长为 193 nm, 具有高光子能量, 可以实现对许多材料微加工, 如聚合物、二氧化硅^[15]、硅^[16]及一些金属^[17]材料等。

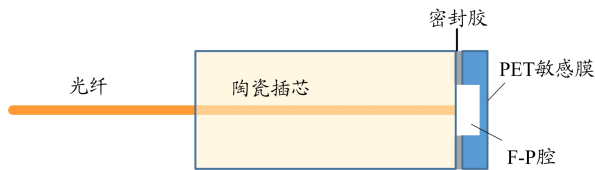


图 1 光纤 F-P 腔传感器结构

基于 ArF 准分子激光器的微加工系统光路原理如图 2 所示。整形匀光后的激光束通过特定形状通光孔的掩模投射到样品上, 样品上的加工形状由通光孔掩模限定, 孔的形状可以为矩形、圆形或三角形等, 激光束的能量由衰减片进行调节。激光以脉冲形式与样品相互作用, 在样品上加工深度由加工脉冲数决定, 而单个激光脉冲加工深度则由激光能量决定。样品固定在 X-Y 二维精密平移台上, 激光加工的位置由样品的移动进行控制, 竖直方向则通过移动物镜镜头来调整焦平面。

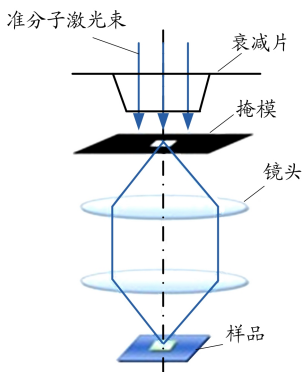
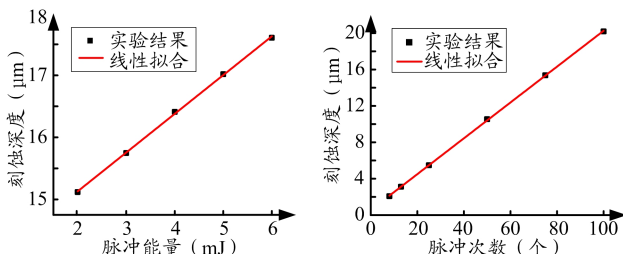


图 2 准分子激光束的投影微加工示意图

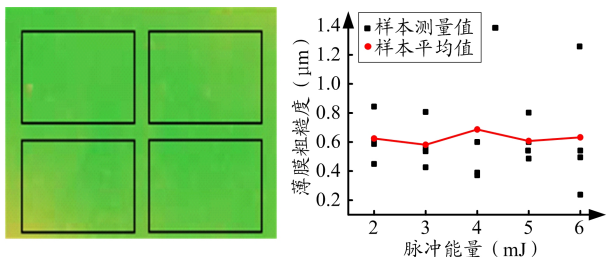
为了制备 EFPI 压力薄膜, 本文研究了 PET 薄膜的准分子激光加工工艺, 以及激光能量、脉冲数对薄膜刻蚀深度影响参数。在激光能量方面, 我们发现加工 PET 薄膜时存在能量阈值, 约为 1.1 mJ, 当激光能量超过该能量阈值时, 刻蚀深度随着脉冲能量的增加而线性增加, 如图 3(a) 所示, 刻蚀速率约为 0.62 $\mu\text{m}/\text{mJ}$; 在激光加工脉冲数方面, 增加脉冲数是增加刻蚀深度的一种有效方案, 为此, 我们将激光脉冲能量保持在 2 mJ 时, 研究了脉冲数与刻蚀深度之间的

关系, 如图 3(b) 所示, 它们之间也呈现良好的线性关系, 刻蚀速率为 0.2 $\mu\text{m}/\text{脉冲数}$ 。由于加工表面的粗糙度, 决定于 EFPI 干涉腔光谱性能, 本文在加工 PET 膜后, 对加工区域的粗糙度进行了测试分析, 利用共聚焦轮廓仪(SNEOX, Sensofar)对样品刻蚀区域表面粗糙度进行测试。为了更加准确获得粗糙度参量, 我们选择了一个 8.24 mm $\times$ 5.33 mm 矩形区域, 它分为 4 个部分。PET 刻蚀样品轮廓仪照片和粗糙度与激光能量的依赖关系如图 4 所示。可以看出, 刻蚀后的粗糙度几乎不受激光能量的影响, 粗糙度基本保持在 0.6~0.7 μm 。



(a) 脉冲能量与刻蚀深度关系 (b) 脉冲次数与刻蚀深度关系

图 3 PET 膜的刻蚀深度研究



(a) 刻蚀区域的照片 (b) 薄膜粗糙度与脉冲能量的关系

图 4 激光加工后的 PET 薄膜

基于上述准分子激光加工参数, 本文设计并制备了 PET 压力传感膜, 激光加工前 PET 膜厚度为 25 μm 。图 5(a) 为加工的 PET 传感膜的显微轮廓照片, 中心圆盘凹槽为压力敏感区域, 它是激光束通过圆形通光孔模板直接刻蚀得到, 加工参数如下: 激光能量为 4 mJ, 脉冲次数为 100, 刻蚀得到结构参数直径为 250 μm , 深度为 3.2 μm 。此后, 为了避免在光纤陶瓷插芯头端面粘贴该压力传感膜过程中, 胶被吸入中心凹槽部分, 我们又在周围加工了环形的凹槽, 深度约 5 μm , 以聚集粘结胶。最后, 利用紫外固化胶将加工的 PET 膜与光纤陶瓷插芯头进行粘结, 制备出光纤 EFPI 压力传感器如图 5(b) 所示。

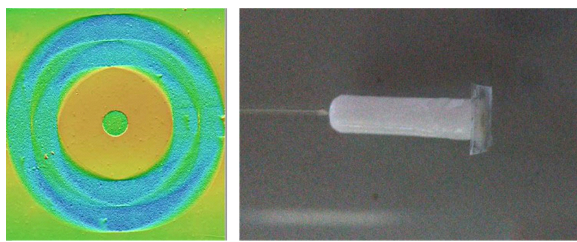
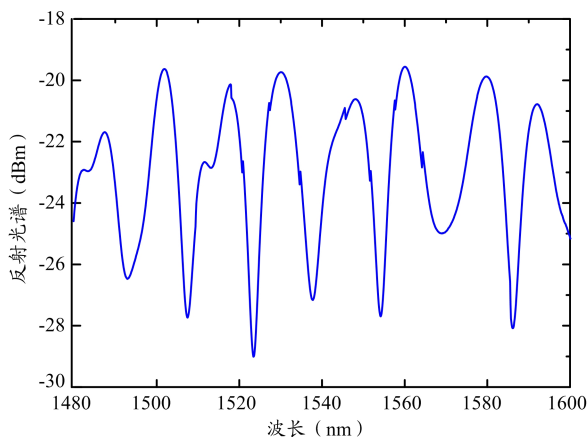


图 5 加工的 PET 传感膜显微轮廓照片和光纤 EFPI 压力传感器实物

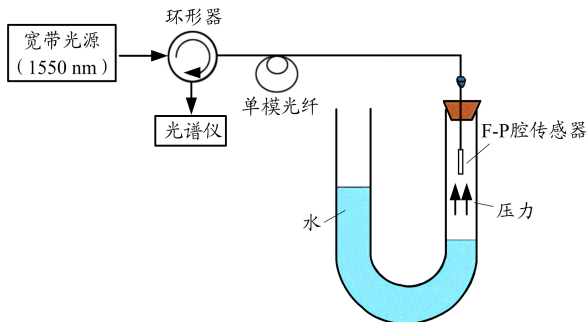
2 基于 EFPI 的压力传感器的表征

EFPI 传感器的反射光谱如图 6(a)所示,干涉对比度良好。测量静压的实验装置如图 6(b)所示。该实验的原理是通过膜片的变形对反射光进行调制。通过带有水的 U 形管调节环境压力。EFPI 传感器头放置在 U 形管的一个端口中。对带传感器头的端口进行密封,这样可以通过将水注入另一个端口来调节气压,实现 0~1070 Pa 范围的调节。通过 2 个端口的高度差来计算气压,压力和液位差的关系可以表示为:

$$P = \rho gh \quad (1)$$



(a) 传感器的反射光谱

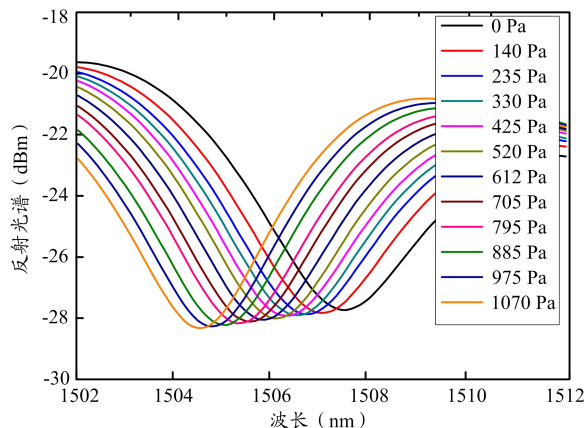


(b) 测量装置示意图

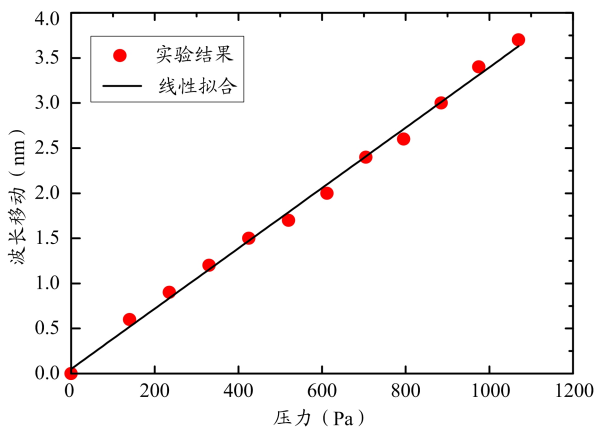
图 6 基于 PET 膜的 F-P 腔压力传感特性测试

其中,水的密度 $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$, g 为重力加速度, h 是液位差。

图 7(a)为对环境压力变化的反射光谱响应图,随着压力的增加,反射光谱移向更短的波长。通过监测 EFPI 的谐振波长变化,可获得定量关系,如图 7(b)所示。谐振波长漂移响应呈现良好的线性,其中波长的压力灵敏度为 3.3 nm/kPa 。



(a) 不同压力下传感器的反射光谱



(b) 波长漂移和压力之间的关系

图 7 环境压力变化下反射光谱及波长移动

3 结束语

本文提出并验证了基于准分子激光微加工方法制备的光纤压力传感器,其具有 EFPI 结构,通过在光纤插芯的端面上集成刻蚀的 PET 膜制得。准分子激光器对 PET 膜进行刻蚀,通过脉冲能量和脉冲时间精确地控制 F-P 腔的深度和面积。该传感器在 0~1070 Pa 的范围内表现出良好的线性关系,具有 3.3 nm/kPa 的高压敏感度。此外,本研究是通过 U 形管液位差来实现气体压力的调控,因此,该传感器还

可以对液位进行监控,由于传感器不与被测液体接触,它将在监测强酸或碱溶液领域中找到许多应用。

参考文献:

- [1] WANG Y, WANG D N, WANG C, et al. Compressible fiber optic micro-Fabry-Pérot cavity with ultra-high pressure sensitivity [J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14084–14089.
- [2] BAE H, YU M. Miniature Fabry-Perot pressure sensor created by using UV-molding process with an optical fiber based mold [J]. Optics Express, 2012, 20(13): 14573–14583.
- [3] PANG C, BAE H, GUPTA A, et al. MEMS Fabry-Perot sensor interrogated by optical system-on-a-chip for simultaneous pressure and temperature sensing[J]. Optics Express, 2013, 21(19): 21829–21839.
- [4] KAUR A, WATKINS S E, HUANG J, et al. Microcavity strain sensor for high temperature applications [J]. Optical Engineering, 2014, 53(1): 017105–017105.
- [5] SHANG Y, LI Z, CHEN N, et al. Fabrication of a Miniature Fiber-optic EFPI Pressure Sensor[C]//Asia Communications and Photonics Conference. November 12–15, 2013, Beijing, China. Washington: Optical Society of America. AF21. 6, 2013.
- [6] ZHANG S, ZHAO Z, CHEN N, et al. Temperature characteristics of silicon core optical fiber Fabry – Perot interferometer [J]. Optics letters, 2015, 40(7): 1362–1365.
- [7] XU J, WANG X, COOPER K L, et al. Miniature all-silica fiber optic pressure and acoustic sensors[J]. Optics Letters, 2005, 30(24): 3269–3271.
- [8] JIANG M, LI Q S, WANG J N, et al. Optical response of fiber-optic Fabry-Perot refractive-index tip sensor coated with polyelectrolyte multilayer ultra-thin films [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31

(14): 2321–2326.

- [9] GUO F, FINK T, HAN M, et al. High-sensitivity, high-frequency extrinsic Fabry – Perot interferometric fiber-tip sensor based on a thin silver diaphragm[J]. Optics Letters, 2012, 37(9): 1505–1507.
- [10] XU F, SHI J, GONG K, et al. Fiber-optic acoustic pressure sensor based on large-area nanolayer silver diaphragm[J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 2838–2840.
- [11] YI J, LALLY E, WANG A, et al. Demonstration of an all-sapphire Fabry – Pérot cavity for pressure sensing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(1): 9–11.
- [12] MA J, JIN W, HO H L, et al. High-sensitivity fiber-tip pressure sensor with graphene diaphragm[J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2493–2495.
- [13] MA J, XUAN H, HO H L, et al. Fiber-optic Fabry – Perot acoustic sensor with multilayer graphene diaphragm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(10): 932–935.
- [14] JIANG J, LIU T, LIU K, et al. Optical fiber fabry-perot pressure sensor machined by Nd: YAG laser [C]// 9th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN 2010), October 24 –27, 2010, Nanjing, China. Stevenage: YAG laser, 2010, 112–115.
- [15] WATSON S, GANDER M J, MacPherson W N, et al. Laser-machined fibers as Fabry-Perot pressure sensors [J]. Applied Optics, 2006, 45(22): 5590–5596.
- [16] LIU N, HASSEN W M, DUBOWSKI J J. Excimer laser-assisted chemical process for formation of hydrophobic surface of Si (001) [J]. Applied Physics A, 2014, 117(1): 37–41.
- [17] CHEN H L, WU H S, LEE C C, et al. Fabry – Perot structures for attenuated phase-shifting mask application in ArF and F₂ lithography [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2003, 21(6): 3057–3061.

参考文献著录规则——总要求及图书、期刊的著录格式

为了帮助向本刊投稿的作者按规范著录参考文献,现将常见类型文献的著录格式作如下要求。

参考文献中的责任者采用姓在前名在后的著录形式。无论中外人士一律姓在前名在后;外国著者的“名”可以用缩写字母,“姓”全部大写,“姓”和缩写的“名”之间勿用“.”,而是空格。如原文中作者为“P. S. 昂温”则在本刊要求中应写成“昂温 P S”,Albert Einstein Seny 应写成 EINSTEIN A S。参考文献的责任者不超过 3 位时,全部照录。超过 3 位时,只著录前 3 位责任者,其后加“,等”或与之相应的词。

◆原著的著录格式:

[序号] 著者. 书名[M]. 版本(1 版不著录). 出版地:出版者,出版年:起–止页码.

[1] 原 荣. 光纤通信[M]. 北京:电子工业出版社,2002.

[2] CRAWFPRD GORMAN M.Future libraries:dreams,madness,& reality[M].Chicago:America Library Association,1995.

◆译著的著录格式: [序号] 著者. 书名[M]. 译者,译. 出版地:出版者,出版年:起–止页码.

◆期刊的著录格式: [序号] 著者. 题名[J]. 刊名, 出版年份,卷(期):起–止页码.

[1] 蒋超,张沛,张永军,等.基于 SRLG 不相关的共享通路保护算法[J]. 光通信技术,2007,31(7):4–6.

[2] DIANOV E M,BUFETOV I A, BUBNOV M M,et al. Three-cascaded 1407nm Raman laser based on phosphorus-doped silica fiber[J].OPTICS LETTERS, 2000,26(6):402–404.