

# 基于 157 nm 激光制作的微光纤 F-P 折射率传感器\*

刘为俊<sup>1</sup>, 饶云江<sup>1,2</sup>, 冉曾令<sup>1</sup>, 廖弦<sup>1</sup>

(1 电子科技大学 宽带光纤传输与通信技术教育部重点实验室, 成都 610054)

(2 重庆大学 光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:**分析了 157 nm 激光制作的光纤法珀折射率传感器的传感特性. 采用干涉条纹计数的方法对法珀腔的反射光谱进行解调, 避免了光强波动的影响, 同时具有较宽的折射率(RI)范围. 在 0~70℃ 范围内 25 μm 的法珀腔腔长变化量为 6.25 nm, 等效折射率变化为  $\sim 2.46 \times 10^{-4}$ . 常温下对折射率范围为 1.33~1.427 的甘油(丙三醇)溶液进行了测量, 实验结果曲线的相关系数为 0.9951, 测量准确度为  $\sim 3.70 \times 10^{-4}$ .

**关键词:**导波光学; 折射率传感器; 光纤法珀腔; 准分子激光微加工

中图分类号: TN25

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)01-0099-4

## 0 引言

光纤传感器以其抗电磁干扰、耐腐蚀、测量精准等特点而在传感领域得到了广泛关注<sup>[1-4]</sup>. 折射率是化工、医药、冶金、环保及科研等领域中常常需要测量的一个重要物理量. 光纤法珀传感器作为最流行的光纤传感器之一在包括折射率测量在内的多个领域有着广泛的应用<sup>[1,4-5]</sup>. 光纤 F-P 折射率传感器为非本征型法珀腔, 采用绝对测量的方式, 可直接检测腔内物质折射率的变化, 但非本征型法珀腔在制作方法上存在不足: 需手工操作, 无法事先确定腔长, 光纤端面在制作时容易受到污染, 不易获得高平行度<sup>[6-9]</sup>.

克服法珀腔制作方法上不足对光纤法珀折射率传感器的应用具有重要意义. 157 nm 准分子激光微加工技术的发展, 使激光融切光纤具有很高的效率和准确度, 为光纤法珀腔的制作提供了新的方法<sup>[7]</sup>. 本文分析了采用 157 nm 激光制作的光纤法珀折射率传感器的传感特性, 对不同甘油溶液的折射率进行了实际测量.

## 1 激光微加工的微光纤法珀腔

### 1.1 准分子激光微加工系统

157 nm 准分子激光加工原理如图 1. 激光光束经均匀系统的光强均匀化后, 照射在掩模板上, 掩模图案通过光刻投影镜头成像在装有加工零件的平台上, 通过光子直接打断分子键消溶被加工材料, 将掩模图案转移至被加工材料表面及纵深方向, 从而完

成材料的加工. 它一般由准分子激光器、光束均匀系统、对准观察系统、掩模、光刻投影镜头、加工台组成. 这种方法为并行加工方式, 一次成形, 加工的材料面宽, 效率高且成本较低. 其中加工准确度由投影系统的成像分辨率决定, 易于保证<sup>[7]</sup>.

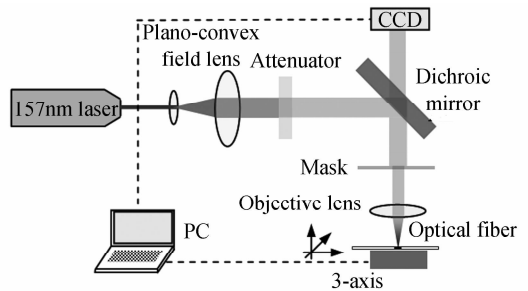


图 1 激光微加工示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 157nm laser micromachining

### 1.2 光纤法珀腔反射光谱解调原理

根据多光束干涉的原理, 光纤法珀腔的反射输出光强  $I_R$  与输入光强  $I_0$  可表示为<sup>[8]</sup>

$$I_R = \frac{2R(1 - \cos \Phi)}{1 + R^2 - 2R \cos \Phi} \cdot I_0 \quad (1)$$

$$\Phi = 4\pi nL / \lambda \quad (2)$$

式中  $R$  为端面反射率,  $\Phi$  为光学相位,  $n$  为腔内材料的折射率,  $L$  为腔长,  $\lambda$  为光源波长. 当端面反射率较小时, 可用双光束干涉代替多光束干涉, 此时可视为斐索干涉仪, 式(1)可表示为

$$I_R = 2R(1 - \cos \Phi) I_0 \quad (3)$$

即干涉条纹近似为余弦函数. 利用干涉条纹计数的方法求取有效腔长  $nL$ , 干涉条纹的第  $m$  级和第  $m+p$  级极大值对应的波长分别为  $\lambda_m$  和  $\lambda_{m+p}$ , 则由式(2)和式(3)可得:

$$nL = \left(\frac{m}{2} + \frac{1}{4}\right)\lambda_m \quad (4)$$

$$nL = \left(\frac{m+p}{2} + \frac{1}{4}\right)\lambda_{m+p} \quad (5)$$

\* 国家自然科学基金重点项目(60537040)资助

Tel: 028-83201084 Email: lwj120@163.com

收稿日期: 2007-08-20

由式(4)和(5)联立求解,即可求出有效腔长  $nL$  为

$$nL = \frac{q}{2} \left( \frac{\lambda_{m+q}\lambda_m}{\lambda_{m+q} - \lambda_m} \right), q=1,2,3 \dots \quad (6)$$

当腔长已知时即可求得腔内材料的折射率  $n$ . 由于式(6)中没有光源强度  $I_0$  项,因而光源强度波动对折射率的求解没有影响,避免了强度型解调方法受光源强度波动带来的问题,提高了折射率的测量准确度和稳定性.

## 2 实验结果

采用 Coherent 公司的 LPF202157 nm 激光加工系统在单模光纤上加工腔长为  $\sim 25 \mu\text{m}$  的法珀腔(图 2). 实验中光源波长范围为  $1510\text{nm} \sim 1590\text{nm}$ , 波长分辨率为  $0.0025\text{nm}$ . 将纯甘油(折射率为 1.474)与水混合,配置不同浓度的甘油溶液,其折射率范围为 1.351 至 1.427. 图 3 为折射率为 1.357 时测得的反射谱,由于溶液改变了腔内的折射率,使得各波长的反射光强产生相应的衰减,干涉条纹更加紧凑. 采用式(6)的解调方式,为了准确找到干涉条纹的两个峰值,选一条水平等高线,在第一个峰附近与干涉条纹交于 A、B 两点, A、B 两点对应波长的平均值即为峰值波长  $\lambda_m$ , 同样的方法可求出第二个峰值  $\lambda_{m+1}$ ; 利用式(6)计算出有效腔长  $nL$ . 常温下腔长  $L$  为  $25.392 \mu\text{m}$ . 图 4 为不同折射率时的实验结果. 在实验过程中,每次测量完成后,将 F-P 腔从甘油溶液中取出,放入清水中洗去腔内残余甘油溶液,用吹风机烘干腔内的清水,使反射谱恢复至最初在空气中的形状,避免对下次测量造成干扰.

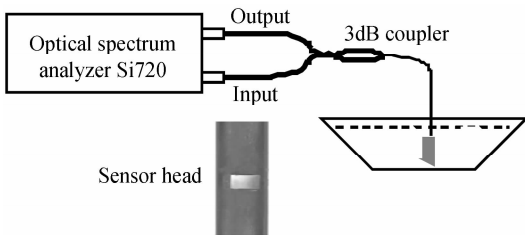


图 2 实验装置  
Fig. 2 Experiment setup

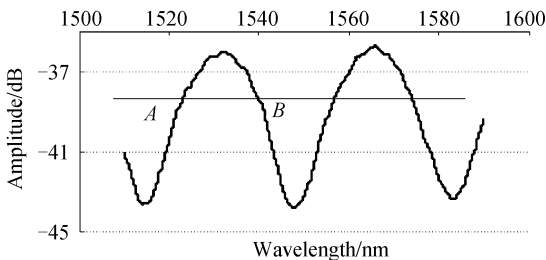


图 3 折射率为 1.357 时的干涉条纹  
Fig. 3 Interference fringe with refractive index 1.357

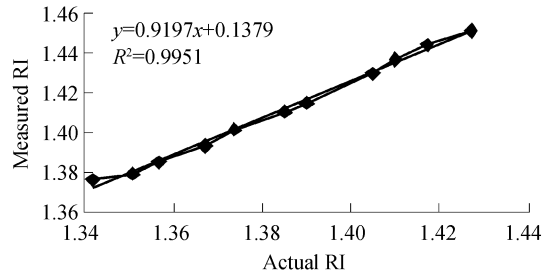


图 4 实验结果曲线  
Fig. 4 Curve of experiment results

## 3 误差分析

信号测量的误差主要由两个波长  $\lambda_m$  和  $\lambda_{m+p}$  的误差决定,干涉条纹曲线的畸变是造成该误差的直接原因. 通过将各折射率下获得的干涉条纹曲线与理论曲线对比,  $\lambda_m$  和  $\lambda_{m+p}$  的误差  $\Delta\lambda$  均为  $\sim 0.2\text{nm}$ . 因此,根据式(6),常温下折射率的测量准确度为

$$\Delta n = \sqrt{\left[ \frac{\partial n}{\partial \lambda_m} \cdot \Delta \lambda_m \right]^2 + \left[ \frac{\partial n}{\partial \lambda_{m+p}} \cdot \Delta \lambda_{m+p} \right]^2} \approx 3.70 \times 10^{-4}$$

通过不断优化激光加工系统的加工参量可望改善干涉条纹的平滑度及对比度,进而减小误差及提高实验拟合曲线的相关系数. 拟合直线的斜率不为 1,原因在于式(3)对式(1)的简化.

法珀腔的腔长在不同温度环境下会发生变化(见图5),在  $0 \sim 70^\circ\text{C}$  范围内腔长的变化量为  $6.25\text{nm}$ , 将其转化为等效的折射率变化为  $\sim 2.46 \times 10^{-4}$ . 如果需要精确测量特定温度下的液体折射率,应在该温度下对腔长作标定.

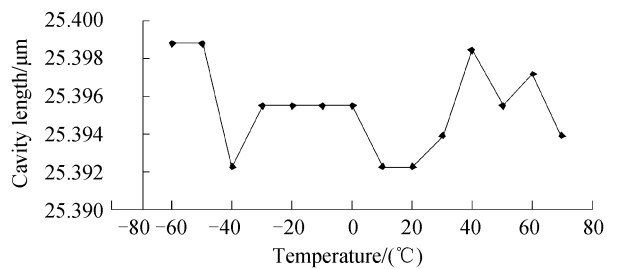


图 5 腔长与温度的关系  
Fig. 5 The relationship between cavity length and temperature

当液体浓度增大时,其折射率随之增大,光纤与溶液的端面反射率减小,反射谱条纹各波长的强度均有所下降;同时长波长的折射角大于短波长的,部分长波长的光透射至腔外,使得第二个端面的反射光强进一步减小,所以长波长处的干涉条纹对比度比短波长的小,如图 6. 缩短腔长  $L$  可减少透射出去的光强,但缩短腔长会使得溶液填充进腔内的时间增加,因此在测量时应在折射率测量范围和响应时

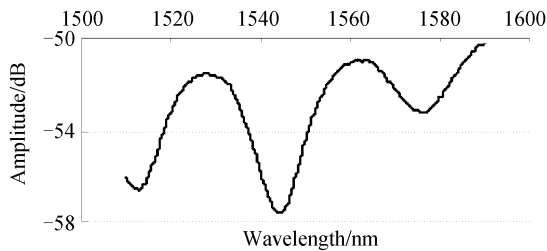


图 6 折射率为 1.447 时的干涉条纹

Fig. 6 Interference fringe with refractive index 1.447

间之间作权衡.

## 4 结论

本文采用对法珀腔反射光谱进行干涉条纹计数的解调方法,对不同浓度甘油(丙三醇)溶液的折射率进行了测量,测量结果显示出良好的线性度.若在微法珀腔内填充适当的吸附材料,将特定的目标分子吸附在腔内,腔体内的折射率因而发生改变,通过折射率的测量可以获得目标分子的浓度.因此这种传感器可望用于临床诊断、环境监测、食品生产、医药制造和生化武器探测等领域,具有广泛的应用前景.

### 参考文献

- [1] RAO Yun-jiang, ZENG Xiang-kai, ZHU Yong, *et al.* EFPI/FBG strain-temperature sensor and application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1):85-88.  
饶云江,曾祥楷,朱永,等. 非本征型法布里-珀罗干涉仪/光纤布拉格光栅应变-温度传感器及其应用[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1):85-88.
- [2] ZHANG Dong-sheng, GUO Dan, HU Chun-chi, *et al.* The measurement of distributing pressure in molding cavity based on fiber bragg grating sensors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5):847-850.  
张东升,郭丹,胡春池,等. 基于光纤光栅传感的模压腔内压强分布式测量[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5):847-850.
- [3] ZENG J, LIANG D K, CAO Z X. Applications of optical fiber SPR sensor for measuring of temperature and concentration of liquids[C]. *SPIE*, 2005, **5855**:667-670.
- [4] LÜ Tao, LIU De-sen. Study on the optical fiber liquid-level sensor based on extrinsic F-P cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4):690-693.  
吕涛,刘德森. 基于非本征 F-P 腔光纤液位传感器研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(4):690-693.
- [5] ELSTER J, JONES E M, EVANS K M. Optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometric (EFPI)-based biosensors [C]. *SPIE*, 2000, **3911**:105-112.
- [6] TUCK J C, FEMANDO F G. New techniques for manufacturing optical fibre-based fibre Fabry-Perot sensors [C]. *SPIE*, 2002, **4694**:43-52.
- [7] MACHAVARAM R V, TUCK J C, TEAGLE1 C M, *et al.* Laser micro-machined and acid-etched Fabry-Perot cavities in silica fibres[C]. *SPIE*, 2006, **6038**:6068D.
- [8] JIN Wei, RUAN Shuang-shen. New advances in optical fiber sensing technology[M]. Science Press, 2005:262-263.  
靳伟,阮双琛. 光纤传感技术新进展[M]. 科学出版社, 2005:262-263.
- [9] ZHAO Lei, CHEN Wei-min. Optimization on end Reflectivity of Fiber Optic F-P Sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6):1008-1012.  
赵雷,陈伟民. 光纤 F-P 传感器光纤端面反射率优化[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6):1008-1012.

## Optical Fiber F-P Refractive Index Sensor Based on 157 nm Laser Micromachining

LIU Wei-jun<sup>1</sup>, RAO Yun-jiang<sup>1,2</sup>, RAN Zeng-ling<sup>1</sup>, LIAO Xian<sup>1</sup>

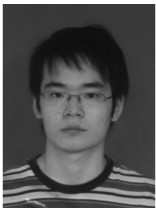
(1 Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks of Education Ministry, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

(2 Key Lab of Optoelectronic Technology and System of Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Received date: 2007-08-20

**Abstract:** The sensing characteristics of optical fiber F-P refractive index sensor produced by 157 nm excimer laser micromachining system in normal single-mode optical fiber was analysed. The reflective spectrum interferometric fringe count of this F-P sensor, which can avoid the fluctuation of optical power of the measurement system was employed, and it could lead to a large refractive index measurement range. The length variation of a F-P cavity with about 25  $\mu\text{m}$  length is 6.25 nm when the temperature varies from 0  $^{\circ}\text{C}$  to 70  $^{\circ}\text{C}$ , which equates the refractive index variation of the cavity  $\sim 2.46 \times 10^{-4}$ . The glycerin solution with the refractive index range of 1.33  $\sim$  1.427 was measured in normal temperature. The correlation coefficient of fitting curve of experiment results is 0.9951 and the resolution is  $\sim 2.46 \times 10^{-4}$ .

**Key words:** Wave-guided optics; Refractive index sensor; Optical fiber F-P cavity; Excimer laser micromachining



**LIU Wei-jun** was born in 1983. He got his B. S. degree from University of Electronic and Science Technology of China in 2005. Now he is working for his M. S. degree in the same university, and his research interests focus on optical fiber sensors and signal processing.