

文章编号:1004-4213(2010)07-1239-4

激光加工微型光纤折射率传感器的工艺与特性*

孙东¹, 冉曾令¹, 饶云江²

(1 电子科技大学 宽带光纤传输与通信网络技术重点实验室(教育部), 成都 610054)

(2 重庆大学 光电技术与系统重点实验室(教育部), 重庆 400044)

摘要:提出一种由 157 nm 激光制造的新型微型光纤法布里-珀罗折射率传感器的制作方法, 传感头由靠近单模光纤端的具有光纤顶端微通道的法布里-珀罗空气腔组成, 将单模光纤顶端的微通道作为检测介质的入口. 分别在法珀腔的反射界面镀以薄膜作为反射镜面来确保高的光对比度. 试验中获得了 1 130. 887 nm/refractive-index 的分辨率. 和其他的光纤传感器相比, 这种传感器具有体积小, 结构坚固, 高分辨率, 线性良好, 测量范围宽等优点, 能够满足实际应用的要求, 特别是对需要小型传感器的场合.

关键词: 光纤; 法布里-珀罗干涉仪; 激光加工; 折射率测量

中图分类号: C34

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20103907. 1239

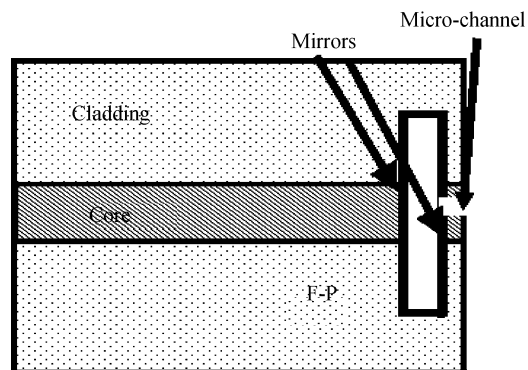
0 引言

法布里-珀罗折射率传感器近年来引起人们极大的关注, 主要由于该传感器具有优良的特性, 如耐腐蚀性, 对电磁干扰免疫, 高准确度测量等, 在各领域有很宽泛的应用, 如生物医学测量 and 环境保护方面. 目前在应用方面, 折射率传感器有两种类型, 即消逝场相互作用和直接测量. 例如光纤表面等离子体共振传感器^[1], 长周期光纤光栅 (Laser Period Fiber Grating, LPFG)^[2-4], 化学腐蚀布拉格光纤光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG)^[5], 光微谐振/光微腔^[6], 光子晶体^[7]等类型传感器是基于消逝场效应的影响, 是通过测量谐振波长的移动变化所对应的折射率变化获得的, 这类型传感器表现出从几百纳米到几千纳米/外界折射率的高灵敏度, 但是仍然具有对环境折射率变化非线性响应, 具有相对较大的温度交叉敏感, 有限的测量范围等缺点. 研究发现, 法布里-珀罗干涉仪, 既可以作为物理又可以作为化学传感器^[8-12]. 作为化学传感器, 通过测量法-珀腔对折射率变化的响应的相位调制, 原则上可以获得折射率测量的绝对值, 该测量具有低的温度交叉敏感, 线性度良好, 高分辨率等优点. Jennifer L. Elster 等人报道了一种基于生物传感器的传统的非本征法珀干涉仪, 该折射率分辨率达到 10^{-6} ^[13]. Tao Wei 等人报道了一种开放式光纤微切口法珀折射率传感器^[14].

本文报道了一种微法珀腔顶端折射率传感器, 该传感器由 157 nm 激光器^[15]制造, 带有薄层反射镜面, 传感器头由位于单模光纤顶端的短腔组成, 单模光纤的顶端带有由 157 nm 激光器制造的微通道. 需要测试的介质通过这个微通道导入法珀腔. 这种传感器可以提供高分辨率的折射率测量, 因为该传感器是对光相位敏感的传感器, 而且不受测量范围的限制^[10], 该传感器的测量准确度得到了巨大的提高, 这是由于法珀腔的内部更加精细, 使反射光谱中的干涉条纹变得很窄. (本文制作的传感器的精细度为 $F=4$, 在文献^[10]中提到的传感器的精细度为 0.5), 因此对于波谷处中心波长的质询更加精确.

1 传感器的配置和分析

传感器结构如图 1, 分别将 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 薄膜镀在法珀腔的两个端面作为反射镜面. 光纤顶端的微通道作为被测液体或气体的入口, 微通道的长度为 $5 \mu\text{m}$, 位于法珀腔和光纤断面之间, 液体或气体在



(a) Structure of the sensor head

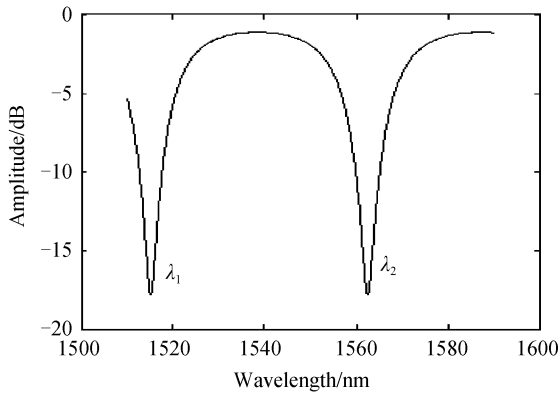
* 国家重点自然科学基金(60537040)资助

Tel: 028-61830277

Email: sundong@uestc.edu.cn

收稿日期: 2009-10-10

修回日期: 2009-11-27



(b) Simulated reflective interference spectrum

图 1 传感器结构及模拟反射干涉谱

Fig. 1 Structure of the sensor and simulation result of reflective interference spectrum

数秒钟之内很容易导入或导出。同时,微通道的直径要足够小以确保珐珀腔的光性能。该微通道可以很容易通过 157 nm 超紫外激光烧灼技术实现^[16]。

珐珀腔的光程长度可以通过式(1)来计算

$$nL = (\lambda_1/2) \text{Integer}[\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1)] \quad (1)$$

式(1)中, λ_1 和 λ_2 是两个临近条纹中心所对应的波长,如图 1(b)。传感器在空气中的腔长 L 是确定的, n 可以通过式(1)获得。

2 传感器的制作与测试

为了制作传感头,用 157 nm 激光微加工系统来实现。制作工艺分为 5 个步骤,如图 2。1)用 120 个激光脉冲在光纤的一端制作一个深 25 μm ,直径大约为 60 μm 的圆孔。脉冲能量密度,脉冲宽度,脉冲频率分别为 $\sim 20 \text{ J/cm}^2$, 15 ns, 和 20 Hz; 2)分别在裸光纤的一端和带有圆孔的光纤端镀上高反射镜面; 3)两个光纤端熔接在一起密封圆孔,保证珐珀空气腔的形成(端面的有效折射率为 40%); 4)用 157 nm 激光器对已熔接好的珐珀腔一段进行切割,来获得离空气腔距离很短的一段尾段。最后,在光纤的尾段制作一个微孔(微通道),该微孔由 157 nm 激光器在已经熔接好的珐珀腔尾段横截面制作,微

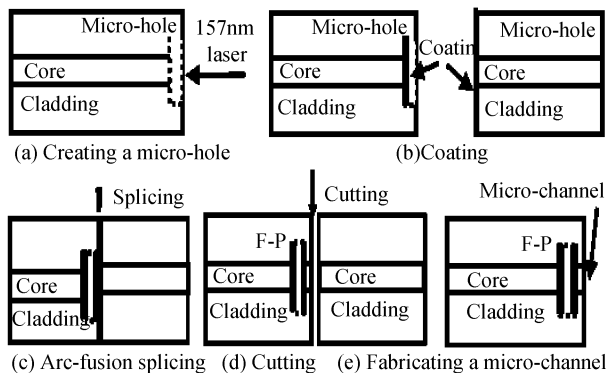
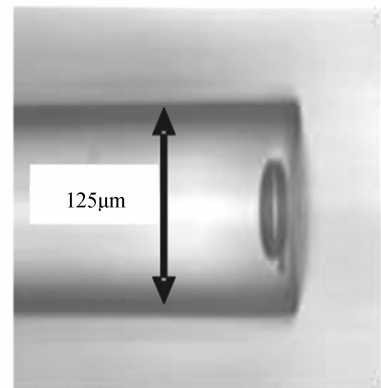


图 2 制作工艺

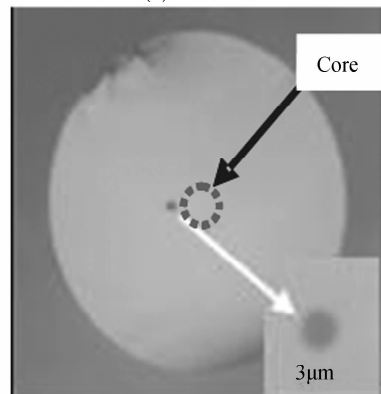
Fig. 2 Fabrication process

孔距离光纤纤芯的距离约 5 μm ,用 40 个脉冲制作一个直径为 3 μm 的圆孔通道。脉冲能量密度,脉冲宽度,脉冲频率分别为 20 J/cm^2 , 15 ns, 和 20 Hz。

制作传感头的微观图像如图 3,横截面图如图 4。空气腔的长度为 25 μm ,光纤尾段端面距离空气腔的长度为 5 μm ,微通道的直径为 3 μm 。实验中,将传感头浸入盐溶液,用光谱分析仪(OSA)(Si720, Micron Optics Inc., USA)来测量传感器的反射光谱。用 ABBE 折射计来校正折射率的值。折射率测量范围为 1.333 3~1.40。传感器的反射谱如图 5, n 分别等于 1.333, 1.333 8 和 1.343 4。实验中折射率测量的结果如图 5(b),折射率从 1.333 到 1.395,在 1 550 nm 波段处,条纹波谷的波长移动为 70.115 nm,折射率的分辨率为 1 130.887 nm/RI,对于 Si720,由于它的波长准确度为 1 pm,它的有效



(a) Side view



(b) Top view (c) Close-up display of the micro-channel

图 3 光传感头

Fig. 3 Photos of the sensor

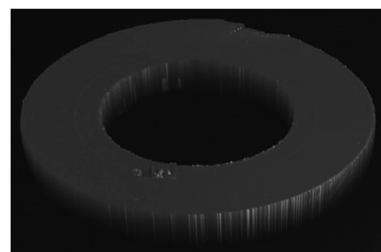


图 4 157 nm 激光器制作的珐珀腔的横截面图

Fig. 4 F-P cavity produced by 157 nm laser cross-section diagram

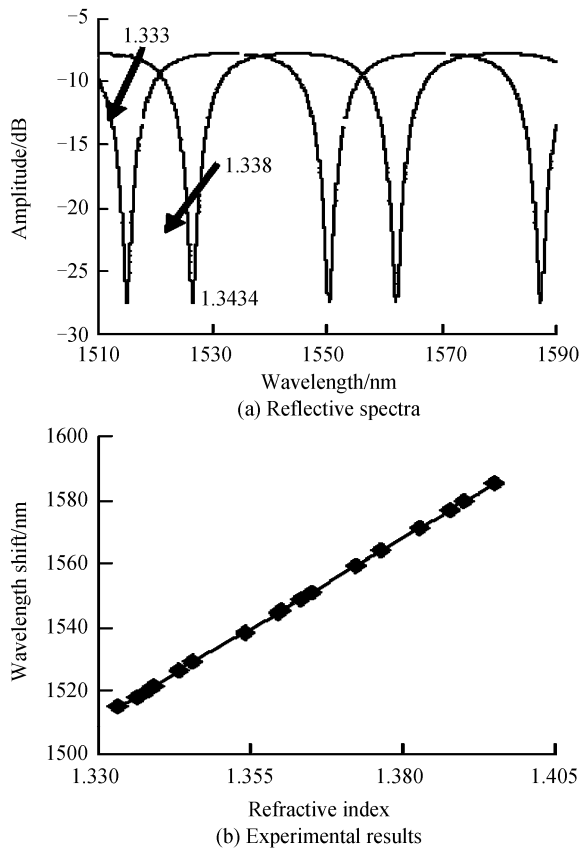


图5 传感器的反射光谱及波谷中心波长相对于折射率变化的实验结果

Fig. 5 Experimental results of reflective spectra of sensor and valley wavelength shift with RI variation

折射率的分辨率分别为 8.84×10^{-7} , 根据图 5(b) 所示的测量结果, 可以看到该传感器具有优良的线性, 线性度为 99.9%。

图 6 为该传感器的温度特性, 可以看出: 对于 1550 nm 处波长的峰值温度灵敏度为 0.8 pm/°C, 相对应的折射率和温度间的交叉灵敏度为 7×10^{-7} 。

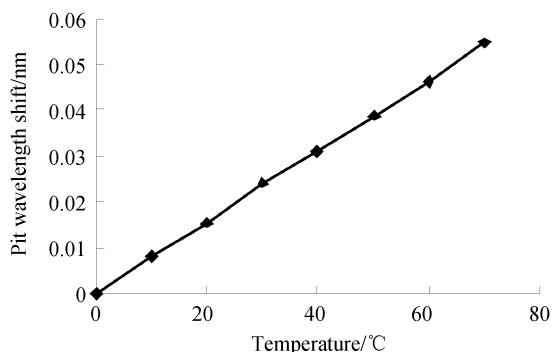


图6 传感器的温度响应

Fig. 6 Temperature response of the sensor

3 结论

阐述了一种微型法珀腔传感器, 该传感器由 157 nm 激光微加工技术制造, 可以高分辨率的测量折射率. 该传感器具有 1130 nm/RIU 的高灵敏度.

该传感器具有高敏感度、测量范围大、良好的线性、微型尺寸和很小的温度交叉效应等优点, 使它在化学和医疗传感方面的应用成为焦点.

参考文献

- [1] MONZON-HERNANDEZ D, VILLATOR J. High-resolution refractive index sensing by means of a multiple-peak surface plasmon resonance optical fiber sensor [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, **115**: 227-231.
- [2] RAN Zeng-ling, RAO Yun-jiang, ZHU Tao, et al. Er doped fibre amplifiers based on novel long period fibre gratings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 72-75. 冉曾令, 饶云江, 朱涛, 等. 基于新型长周期光纤光栅的掺铒光纤放大器 [J]. *光子学报*, 2003, **32**(1): 72-75.
- [3] SHU X W, ZHANG L, BENNION I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings [J]. *J Lightwave Technol*, 2002, **20**(2): 255-266.
- [4] DING J F, ZHANG A P, SHAO L Y, et al. Fiber-taper seeded long-period grating pair as a highly sensitive refractive-index sensor [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(6): 1247-1249.
- [5] LIANG W, HUANG Y Y, XU Y, et al. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **86**(15): 151122.
- [6] WHITE I M, OVEYS H, FAN X. Liquid-core optical ring-resonator sensors [J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(9): 1319-1321.
- [7] SKIVESEN N, TETU A, KRISTENSEN M, et al. Photonic-crystal waveguide biosensor [J]. *Opt Exp*, 2007, **15**(6): 3169-3176.
- [8] TAYLOR H F. Fiber optic Fabry-Perot sensors [J]. *Fiber Optic Sensors*, Marcel Dekker, New York, 2002.
- [9] RAO Y J. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. *Opt Fiber Technol*, 2006, **12**(3): 227-237.
- [10] MARKUS S, BERND W, NORBERT F. Fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer strain sensor with < 50 pm displacement resolution using three-wavelength digital phase demodulation [J]. *Opt Exp*, 2001, **8**(8): 475-480.
- [11] CHEN X P, SHEN F B, WANG Z, et al. Micro-air-gap based intrinsic Fabry-Perot interferometric fiber-optic sensor [J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(30): 7760-7766.
- [12] EDVRD C, DENIS D. In-line short cavity Fabry-Perot strain sensor for quasi distributed measurement utilizing standard OTDR [J]. *Opt Exp*, 2007, **15**(14): 8719-8730.
- [13] ELSTER L, JENNIFER, JONES, et al. Optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometric (EFPI)-based biosensors [C]. // Biomedical Diagnostic, Guidance, and Surgical-Assist Systems II. *SPIE*, 2000, **3911**: 105-112.
- [14] TAO Wei, HAN-Yu-kun, LI Yan-jun, et al. Temperature-insensitive miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer for highly sensitive refractive index measurement [J]. *Opt Exp*, 2008, **16**(8): 5764-5769.
- [15] RAO Yun-jiang, DUAN De-wen, YANG Xiao-chen, et al. Photonic crystal fiber Fabry-Perot sensor fabricated using femtosecond laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 91-93.
- [16] 饶云江, 段德稳, 杨晓辰, 等. 飞秒激光加工光子晶体光纤微型 F-P 传感器研究 [J]. *光子学报*, 2009, **8**(1): 91-93.
- [16] RAN Zeng-ling, RAO Yun-jiang. Miniature in-line photonic-crystal-fiber etalon fabricated by 157 nm laser micromachining [J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(16): 3071-3073.

Laser-Machined Miniature Fiber-Optic Refractive-Index Sensor Tip

SUN Dong¹, RAN Zeng-ling¹, RAO Yun-jiang²

(1 Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission & Communication Networks Technology (Ministry of Education), University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

(2 Key Lab of Opto-Electronic Technology & Systems (Ministry of Education), Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: A novel miniature fiber-optic Fabry-Perot refractive-index sensor machined by 157 nm laser is proposed. The sensor head consists of a micro air F-P cavity near the tip of a single-mode fiber with a micro channel on the fiber tip. The micro channel is used as the entrance for medium under test. Two thin films are coated at reflective interfaces of the F-P cavity as mirrors to ensure high optical contrast, respectively. A RI resolution of 1 130.887 nm/ refractive-index unit is achieved by experiment. Compared with other fiber-optic RI sensors, the proposed sensor has a number of outstanding advantages including small, rigid, high resolution, excellent linearity, and wide measurement range, etc, which can meet the requirements for practical applications especially in biomedical diagnostic where small sensor size is essential.

Key words: Fiber optics; Fabry-Perot interferometer; Laser-Machining; Refractive-Index measurement

SUN Dong was born in 1981. He is a M. S. degree candidate and his research interests focus on fiber-optic sensing and optical fiber transmission technology.



RAN Zeng-Ling was born in 1977. He is an associate professor, and his research interests focus on fiber-optic sensing and optical fiber transmission technology.

