

文章编号: 0253-2239(2010)02-0326-04

带微通道的新型光纤法布里-珀罗折射率传感器

张 健¹ 饶云江^{1,2} 冉曾令¹ 徐 兵¹

(¹ 电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 四川 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 报道了一种新型结构的光纤法布里-珀罗(F-P)折射率传感器。使用腐蚀工艺在切割好的掺铒光纤端面制作一个封闭的微槽,然后与一段单模光纤熔接形成封闭的 F-P 腔。腐蚀产生的微槽底部是一个凹谷,靠近凹谷切割并研磨产生一个微通道,同时光束也能够返回并不损坏 F-P 干涉仪,利用毛细作用液体可进入 F-P 腔。根据 F-P 干涉原理,传感头反射光谱的波谷波长与腔内折射率成线性关系。实验表明当折射率在 1.3333~1.3899 内变化时,线性度为 0.9996,灵敏度为 1068 nm/RIU (refractive index unit)。该传感器为全光纤结构,具有体积小、结构稳定、精度高、耐腐蚀等特点,适用于液体和气体折射率的微型化测量。

关键词 光纤光学;光纤 F-P 腔;腐蚀;微通道;折射率测量

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0326

Novel Fabry-Pérot Fiber Refractive-Index Sensor With Microchannel

Zhang Jian¹ Rao Yunjiang^{1,2} Ran Zengling¹ Xu Bing¹

(¹ Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)
² Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract A novel optical fiber Fabry-Pérot (F-P) refractive-index sensor is reported. A micro-hole is made by etching the tip of a cleaved erbium-doped fiber (EDF). We fabricate a self-enclosed F-P cavity inside an optical fiber by splicing the first fiber to another cleaved fiber. The micro-hole by etching is a flute, a microchannel is made by cleaving and then polishing near the flute, and the light could return which results in F-P interferometer unharmed. The liquid could easily get into the F-P cavity by capillarity. According to the F-P interference principle, the reflection spectra pit wavelength of the sensor is linear with refractive index in the cavity. The experimental results show that the linearity is 0.9996 and the sensitivity is 1068 nm/RIU at the refractive-index range of 1.3333 to 1.3899. The sensor is all-fiber structure, having many advantages such as small size, steady structure, high precision, enduring cautery, etc. It could meet subminiature applications for refractive-index measurement.

Key words fiber optics; fiber Fabry-Pérot cavity; etching; microchannel; refractive-index measurement

1 引 言

折射率是一个与温度、浓度等密切相关的物理参数,在生物、化学、医学和食品安全等领域中,通常需要抗干扰能力强、耐腐蚀和响应快的微型化探针。而光纤折射率传感器正是具备上述优良特性而得到了快速发展,如光纤表面等离子体共振 (SPR) 型^[1,2]和光纤光栅型^[3,4]等,但光纤 SPR 成本高,传感头寿

命有限,光纤光栅受温度影响大。光纤法布里-珀罗 (F-P) 干涉仪由于其精度高、灵活性强和广泛适应性成为研究热点^[5]。传统的光纤 F-P 折射率传感器主要有两种方案^[6~8]: 1) 使用反射镜作 F-P 腔,再通过透镜将光耦合进光纤,光纤只起传光作用,这种方法结构复杂,稳定性难以满足; 2) 直接采用两光纤端面相对构成 F-P 外腔,或者在光纤端面镀高反膜,

收稿日期: 2009-05-13; 收到修改稿日期: 2009-08-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60537040)资助课题。

作者简介: 张 健(1983—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail: jianzhang.uestc@gmail.com

导师简介: 饶云江(1962—),男,博士,教授,主要从事光纤传感及光纤通信等方面的研究。E-mail: yjrao@uestc.edu.cn

使用粘贴等各种方法固定光纤形成 F-P 腔,但胶水容易老化,同样也存在稳定性不够的问题,液体通道装置也增加了复杂度。近年兴起的微型光纤 F-P 腔体积大大缩小,而且具有高机械稳定性。Rao 等^[9,10]利用 157 nm 激光微加工的纤内微 F-P 腔探针具有结构紧凑、稳定性好等特点,利用干涉条纹对比度解调,但分辨率有待提高。Tao 等^[11]利用飞秒激光在光纤柱面加工微槽作为 F-P 折射率传感器,但 F-P 腔部分很脆弱。Wang 等^[12]采用腐蚀掺杂光纤制作了微型光纤 F-P 压力传感器。

提出一种基于纤内微 F-P 结构的新型折射率传感器,采用腔内填充,利用反射谱波谷位置实现解调。传感器结构简单,并具有高稳定性、体积小等特点。

2 传感器的制作和结构分析

在光纤内制作 F-P 腔,目前主要有激光微加工和化学腐蚀两种方法^[9~12],前者设备昂贵,后者成本低,操作简单,采用化学腐蚀方法制作纤内微腔,制作过程如图 1 所示。首先利用氢氟酸和氟酸氨混合溶液在掺铒光纤端面腐蚀出一个微槽如图 1(a);用 Veeco 轮廓仪可以获得微槽的轮廓如图 2 所示,其深度为 8.5 μm,且底部为一个凹谷;然后和普通单模光纤焊接形成封闭空气 F-P 腔如图 1(b);然后在靠近凹谷端进行切割如图 1(c);最后插入陶瓷插芯,在金刚砂纸片上研磨,将凹谷的底部磨去一部分产生一个微孔作为液体或者气体的通道如图 1(d)。制作好的传感头如图 3 所示。

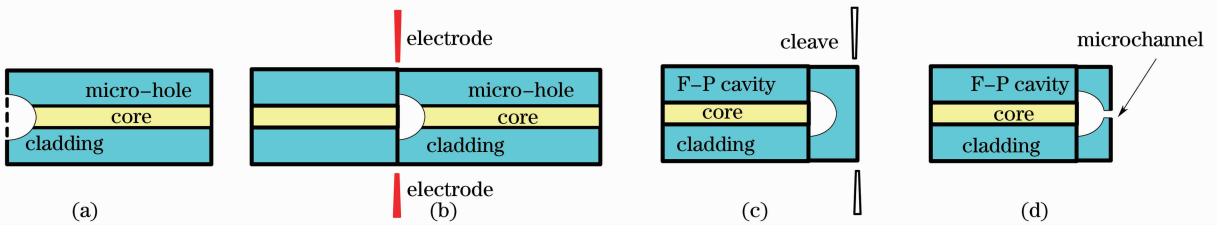


图 1 传感器制作过程。(a)用氢氟酸在光纤端面腐蚀一个微孔;(b)将带微孔的端面和另一段光纤熔接;(c)熔接好后切割;(d)研磨出一个微通道,制作好传感器

Fig.1 Fabrication process of the sensor. (a) creating a micro-hole at the fiber tip by using a HF etching process; (b) splicing the fiber with the micro-hole to another cleaved fiber; (c) cleaving; (d) sensor is completed after a polishing operation of a microchannel

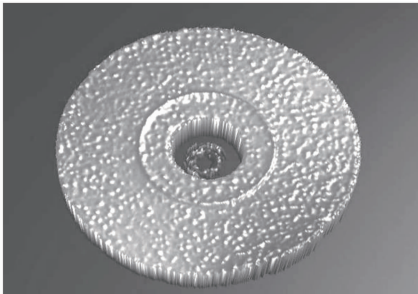


图 2 光纤端面微槽的三维图

Fig.2 3D image of microtrough on the end of fiber

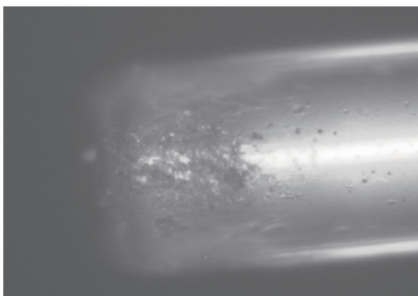


图 3 传感器显微镜图

Fig.3 Microscope image of finished sensor

图 4 为传感头端面的显微镜照片,箭头所指之处即为微通道入口,轮廓仪测得其直径为 3.5 μm,小于纤芯。通过腐蚀方法制作的 F-P 腔,其端面呈弧形,不能产生 F-P 多光束干涉。但是由于端面反射率很低(小于 3.4%),且微型通道的直径很小(小于纤芯),腔长很短,使得单模干涉不会被破坏,近似为双光束干涉。此外该 F-P 腔圆对称的结构也使得它对偏振不相关,而且实验中用的 Si720 出来的光已经是去偏光。如果该传感头用来测量气体折射

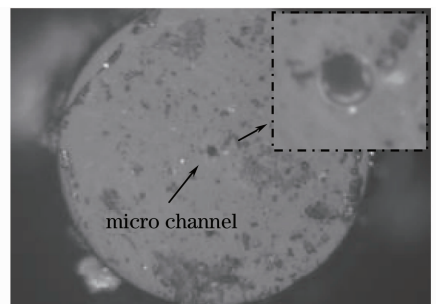


图 4 光纤端面的微通道

Fig.4 Micro channel on end of fiber

率,一般气体的热光系数都很小(约 $6.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$),使得它对温度不敏感。

根据 F-P 腔干涉原理,干涉反射光谱范围内只有某些特定的波长 λ_k 附近出现干涉极小,且下式成立:

$$2nd = k\lambda_k, \quad (1)$$

式中 n, d, k, λ_k 分别为 F-P 腔内介质的折射率、F-P 腔长、干涉级次和干涉谱中心波长。设 F-P 干涉仪腔内介质的折射率为 n_0 时,与其对应的第 k 级干涉峰中心波长为 λ_k ,则由(1)式得折射率 n 与第 k 级干涉峰中心波长 λ_k 之间的关系为

$$n = (n_0/\lambda_0)\lambda_k. \quad (2)$$

可见,对特定波长下某干涉级次,光纤 F-P 干涉仪反射谱中心波长的变化与腔内介质折射率的变化成线性关系。

3 实验及结果

折射率测试系统如图 5 所示,解调系统 Si720 光纤传感分析仪的波长扫描范围是 1510 ~ 1590 nm,波长分辨率为 0.25 pm。测试液体为甘油和水的混合溶液,实验中为了确保 F-P 腔中无气泡,在将传感头浸入液体的时候选择有微通道的一端朝上。这里利用了毛细作用,实验证明,液体进入腔的速度是相当快和彻底的,约 8 s 后干涉光谱就保持稳定。传感头每次使用后需用酒精清洗使用后的传感头,以免腔内残留物质在下次测量时引起误差。为了保证清洗的彻底,传感头不能用来测量过于粘稠的液体,这是这种传感头的不足。

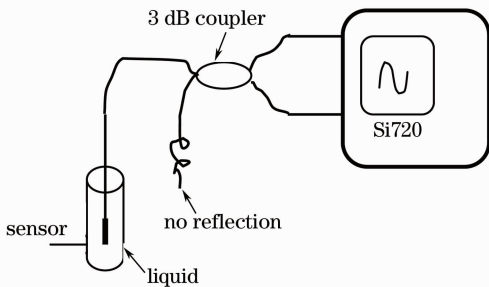


图 5 折射率测试系统

Fig. 5 Experimental setup for refractive index test

测试不同折射率的反射谱如图 6 所示,腔内液体折射率在 1.3333~1.3899 范围内,反射谱波谷位置按线性变化如图 7 所示,波谷共改变 60.45 nm。

拟合所得关系为

$$\lambda_{\text{pit}} = 1068n + 104.21, \quad (3)$$

式中 λ_{pit} 为反射谱波谷波长, n 为液体折射率,线性度

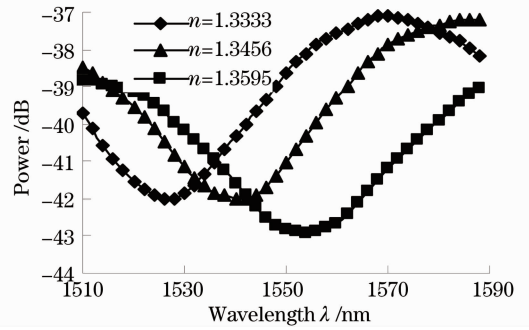


图 6 n 为 1.3333, 1.3456 和 1.3595 时的反射谱

Fig. 6 Reflection spectrum for $n=1.3333,$

1.3456 and 1.3595

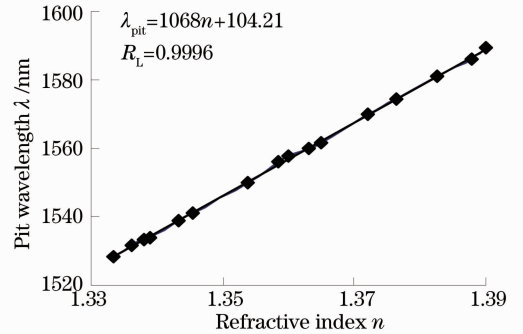


图 7 反射谱波谷与折射率的关系

Fig. 7 Relation between reflection spectrum pit and environment refractive index

(R_L) 为 0.9996。该传感器灵敏度为 1068 nm/RIU, 利用 si720 系统解调的折射率分辨率为 1.488×10^{-7} RIU。

从图 6 可知,信号光比较弱,在 -37 dBm 以下,条纹对比度在 5 dB 左右,这是由于 F-P 反射面呈弧使得反射率太小造成,尤其是微通道一端由于腐蚀引起表面粗糙损耗较大。提高纤内 F-P 腔两反射面的反射率是进一步工作的重点,如在光纤端面镀高反膜。图 7 中的测试误差主要是由于没有对测试信号进行足够滤波造成的。

4 结 论

通过在纤内 F-P 腔的反射端面加工一个微通道,使液体能够填充 F-P 腔,利用干涉仪的波谷位置变化来实现折射率的测量。提高腔内端面反射率可进一步改善性能。传感器具有分辨率高、低成本、耐腐蚀、结构简单、应用范围广等特点,相比直接采用两光纤端面相对构成的 F-P 外腔,该光纤 F-P 结构更加稳定,体积更小,可插入如血管等狭小空间进行探测。此外,该传感器还作为气体传感器用于浓度监测。

参 考 文 献

- 1 Anuj K. Sharma, Rajan Jha, B. D. Gupta. Fiber-optic sensors based on surface plasmon resonance: a comprehensive review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2007, **7**(8): 1118~1129
- 2 Zeng Jie, Liang Dakai, Zeng Zhenwu *et al.*. Reflective optical fiber surface plasma wave resonance sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 405~409
曾 捷, 梁大开, 曾振武等. 反射式光纤表面等离子体波共振传感器特性研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 405~409
- 3 Wei Liang, Yanyi Huang, Amnon Yariv *et al.*. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(15): 151122-1~151122-3
- 4 Deng Hongyou, Rao Yunjiang, Wang Pinghe *et al.*. LPFGs written on fibers with thinned claddings [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(2): 155~157
邓洪有, 饶云江, 汪平河等. 薄包层长周期光纤光栅的研究 [J]. *光电子•激光*, 2008, **19**(2): 155~157
- 5 Yun-jiang Rao. Recent progress in fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2006, **12**(3): 227~237
- 6 Wei Renxuan, Jiang Desheng. Solution concentration measurement with F-P interference wavelength [J]. *J. Opto-Electronics • Laser*, 2003, **14**(6): 655~656
魏仁选, 姜德生. 基于 F-P 干涉波长的溶液浓度测量方法研究 [J]. *光电子•激光*, 2003, **14**(6): 655~656
- 7 Yang Xiufang, Wang Xiaoming, Gao Zonghai *et al.*. Research on liquid concentration real-time detecting system based on Fabry-Pérot interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1343~1346
杨秀芳, 王小明, 高宗海等. 基于法布里珀罗干涉仪的液体浓度实时检测系统的研究 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1343~1346
- 8 Jiang Desheng, Wei Renxuan. Solution concentration measurement system based on fiber Fabry-Pérot Interference wavelength [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1127~1131
姜德生, 魏仁选. 基于光纤 F-P 干涉波长的溶液浓度测量系统研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1127~1131
- 9 Ran Zengling, Rao Yunjiang, Liu Weijun *et al.*. Laser-micromachined Fabry-Perot optical fiber tip sensor for high-resolution temperature independent measurement of refractive index [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 2252~2563
- 10 Liu Weijun, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Novel Fabry-Pérot Fiber-optic refractive-index sensor based on laser micromachining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1400~1404
刘为俊, 饶云江, 冉曾令等. 基于激光微加工的新型光纤法布里-珀罗折射率传感器 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1400~1404
- 11 Tao Wei, Yukun Han, Yanjun Li *et al.*. Temperature insensitive miniaturized fiber in line Fabry-Perot interferometer for highly sensitive refractive index measurement [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(8): 5764~5769
- 12 Yizheng Zhu, Anbo Wang. Miniature fiber-optic pressure sensor [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 447~449