

基于腐蚀硼锗共掺光纤的自闭合光纤法-珀传感器

饶云江, 郭宇, 龚元

(电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室 成都 611731)

【摘要】提出了采用化学腐蚀硼锗共掺光纤通过电弧放电封闭成型制作非本征型光纤法-珀传感器的方法。发现硼锗共掺光纤在40%氢氟酸溶液中的腐蚀速率是一般单模光纤的30倍以上。在1.357~1.400的折射率范围内, 条纹对比度随折射率改变的灵敏度约为30 dB/RIU, 分辨率约为 3.33×10^{-5} , 线性度为0.99以上。化学腐蚀硼锗共掺光纤制作光纤法-珀传感器的方法, 适于批量生产, 成本低, 并有望用于制作腔长较长的光纤法-珀传感器, 以实现多个传感器的空间频分复用。

关键词 硼锗共掺光纤; 光纤法-珀传感器; 光纤传感器; 折射率测量

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.02.011

Self-Enclosed Fiber-Optic Fabry-Pérot Sensor Based on Etched B-Ge Co-Doped Optical Fiber

RAO Yun-jiang, GUO Yu, and GONG Yuan

(Key Laboratory of Ministry of Education for Broadband Optical Fiber Transmission and Communication, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract An extrinsic optical fiber Fabry-Pérot sensor is fabricated by chemical etching of B-Ge co-doped optical fiber and electrical arc discharge. It is found that the etching rate of the fiber core is more than 30 times faster than that of the standard single-mode fiber when using 40% hydrofluoric acid as etching solution. Within the RI range of 1.350~1.400, the RI sensor has a sensitivity of ~ 30 dB/RIU and a resolution of $\sim 3.33 \times 10^{-5}$, with a linearity of >0.99 . This low-cost method is suitable for mass production and has great potential for fabricating fiber-optic Fabry-Pérot sensors with long cavity lengths for use in spatial-frequency-division-multiplexing.

Key words B-Ge co-doped fiber; Fabry-Perot sensors; optical fiber sensors; refractive index measurement

光纤传感器测量精度高, 不受电磁干扰, 且安全、小巧^[1-2], 被广泛应用于各个领域。其中, 光纤法-珀传感器由于结构和制作工艺简单而倍受人们关注, 被广泛应用于应变、温度、压力、折射率等测量中^[3-6]。目前制作光纤法-珀传感器的方法主要有3种, 即传统手工制作法、激光微加工法^[5-6]和化学腐蚀法^[7-9]。化学腐蚀法具有成本低廉、步骤简单、可批量生产等优点。

本文采用氢氟酸腐蚀硼锗共掺光纤, 大大增加了法-珀腔的腔长, 缩短了腐蚀时间。本文利用光纤熔接机对腐蚀后的凹槽施放电弧脉冲, 形成自封闭的光纤法-珀传感器。与制作光纤法-珀折射率传感器的其他方法相比, 该方法更加简便, 所需设备简单, 可批量生产, 成本很低。化学腐蚀硼锗共掺光

纤的方法有望用于制作腔长较长的光纤法-珀传感器, 以实现多个传感器的空间频分复用^[10-11]。

1 传感器结构和分析

传感头结构如图1所示, 在硼锗共掺单模光纤端面附近制作一个类似锥形的空气腔, 传感头插入待测介质中测量其折射率, 传感头内嵌的锥形空气腔的底面由氢氟酸腐蚀形成, 锥面则由空芯部分的光纤受熔接机高温放电而塌陷闭合所致。

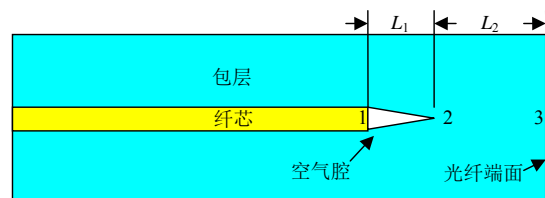


图1 传感头结构示意图

收稿日期: 2010-02-07; 修回日期: 2010-11-12

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(60537040)

作者简介: 饶云江(1962-), 男, 教授, 长江学者, 主要从事光纤传感和通信技术方面的研究。

如图2所示,对于4层介质形成的3个内光学反射平面,假设其反射率和透射率分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 和 T_1 、 T_2 、 T_3 。对于没有镀膜的光纤端面,透射率均远大于反射率,因此可忽略所有高于1次的反射,近似认为反射光是3个面的1次反射光的干涉^[5,12]。图2中第1面反射是由光密介质 n_{core} 到光疏介质 n_0 ,第2面反射是由光疏介质 n_0 到光密介质 n_{clad} ,第3面反射则取决于待测介质的折射率 n' 是否大于光纤包层的折射率 n_{clad} 。

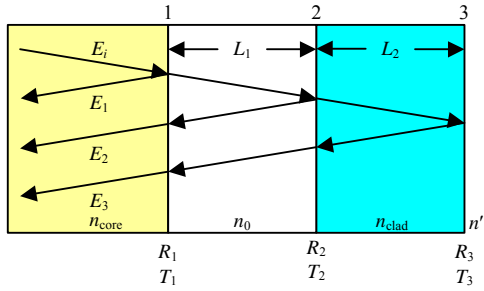


图2 3个光学反射面的反射光场

若 $n' \leq n_{\text{clad}}$, 则:

$$I_r \approx [(R_1 + T_1^2 R_2 + T_1^2 T_2^2 R_3) + (2T_1 T_2 \sqrt{R_1 R_3} \times \cos \frac{4\pi n_0 L_1 + 4\pi n_{\text{clad}} L_2}{\lambda} - 2T_1 \sqrt{R_1 R_2} \times \cos \frac{4\pi n_0 L_1}{\lambda} - 2T_1^2 T_2 \sqrt{R_2 R_3} \cos \frac{4\pi n_{\text{clad}} L_2}{\lambda})] I_i \quad (1)$$

若 $n' > n_{\text{clad}}$, 则:

$$I_r \approx [(R_1 + T_1^2 R_2 + T_1^2 T_2^2 R_3) + (-2T_1 T_2 \sqrt{R_1 R_3} \times \cos \frac{4\pi n_0 L_1 + 4\pi n_{\text{clad}} L_2}{\lambda} + 2T_1 \sqrt{R_1 R_2} \times \cos \frac{4\pi n_0 L_1}{\lambda} + 2T_1^2 T_2 \sqrt{R_2 R_3} \cos \frac{4\pi n_{\text{clad}} L_2}{\lambda})] I_i \quad (2)$$

若忽略法-珀腔的吸收和衍射损耗,法-珀腔的反射光干涉条纹的对比度只取决于两个端面的反射率^[13]。当一个端面的反射率确定时,另一个端面的反射率与其越接近,干涉条纹对比度就越大。但对于3个反射面,情况就会复杂很多^[5]。由于 $\cos \frac{4\pi n_0 L_1}{\lambda}$ 、 $\cos \frac{4\pi n_{\text{clad}} L_2}{\lambda}$ 和 $\cos \frac{4\pi n_0 L_1 + 4\pi n_{\text{clad}} L_2}{\lambda}$ 无法同时取到极值,因此3个面的反射率和间距都会对反射光干涉条纹的对比度产生影响,从而当传感头3个反射面的间距发生改变时(如传感头受到温度影响),将会引起对比度的改变而产生折射率测量误差。

然而实际上传感头的第2个光学反射面近似为圆锥面,其反射光场如图3所示。

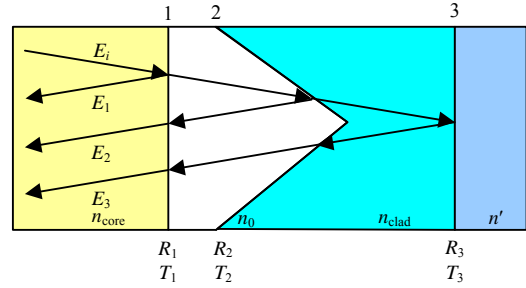


图3 传感头的反射光场

由法-珀腔的光强分布公式可知,法-珀腔的反射光谱主要取决于反射面的反射率和透射率、相邻光线的光程差以及光程差是否恒定3个因素。对于图1所示的传感头结构,在靠近纤芯中心处,相邻光线的光程差比较恒定,该处正好光强密度最大,因此等效的透射率也较大。由于圆锥的角度很小,锥面反射的光线几乎全部被散射,等效反射率接近为0。因此,根据式(1)和式(2),传感器反射光的光强分布为:

若 $n' \leq n_{\text{clad}}$, 则:

$$I_r \approx [(R_1 + T_1^2 T_2^2 R_3) + 2T_1 T_2 \sqrt{R_1 R_3} \cos \delta] I_i \quad (3)$$

若 $n' > n_{\text{clad}}$, 则:

$$I_r \approx [(R_1 + T_1^2 T_2^2 R_3) - 2T_1 T_2 \sqrt{R_1 R_3} \cos \delta] I_i \quad (4)$$

式中, δ 为两条相邻光线的总光程差。由式(3)或式(4)可以看出,传感头可近似看作一个法-珀腔,干涉条纹的对比度大小几乎只取决于端面1和端面3的反射率。因此,当待测介质温度发生变化时,干涉条纹虽然会产生漂移,但对条纹对比度大小的影响是非常小的。

2 传感器制作

该传感器的制作方法非常简单,只有腐蚀与放电两个步骤,如图4所示。

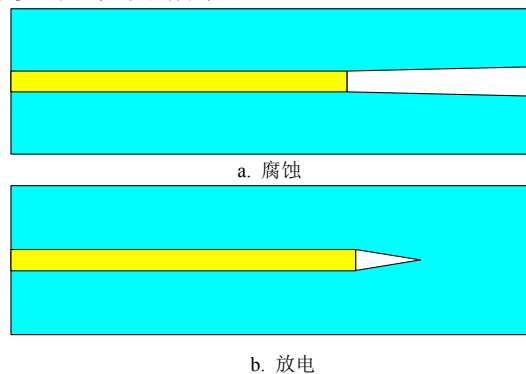


图4 传感头制作过程

2.1 腐蚀

用氢氟酸腐蚀硼锆共掺光纤。腐蚀前先将硼锆共掺光纤一端的涂覆层剥掉,将端面切割平整。然

后将被腐蚀端向下, 竖直浸入已配制好的40%的氢氟酸溶液中。注意光纤端面不能与杯壁等物体接触, 否则会造成端面损伤。

利用化学腐蚀光纤能得到凹槽, 这是由于光纤的纤芯一般掺有金属氧化物(如GeO₂)以提高折射率, 而该部分金属氧化物所形成的化学键的结合能要低于光纤包层(纯SiO₂)中化学键的结合能^[15], 如表1所示。氢氟酸更容易将结合能低的化学键打断, 因此在氢氟酸溶液中纤芯的腐蚀速率高于包层^[14]。一般地说, 在同样浓度的氢氟酸溶液中, 光纤纤芯的掺杂浓度越高, 纤芯和包层的腐蚀速率比就越大。

表1 化学键的结合能

化学键	结合能/(kJ·mol ⁻¹)
Si-O	799.6
Ge-O	660.3
B-O	809
B-Si	317

为保证传感器的机械强度, 希望腐蚀后光纤的外径足够大。因此在同样的腐蚀液中, 纤芯-包层腐蚀速率比越大, 在腐蚀到同样的外径时腐蚀的深度越深。

硼锆共掺光纤由于纤芯掺杂浓度很高, 所以在氢氟酸溶液中纤芯-包层腐蚀速率比非常大, 能腐蚀出几百微米深的凹槽, 且开口直径较小。室温下, 在40%氢氟酸溶液中, 腐蚀硼锆共掺光纤4 min得到的凹槽的显微图如图5所示。

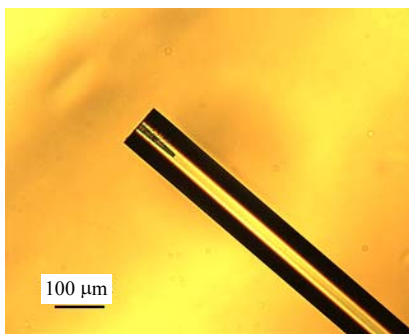
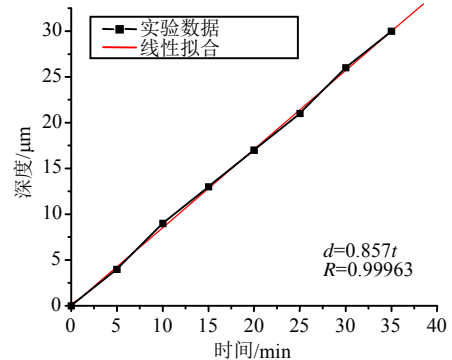


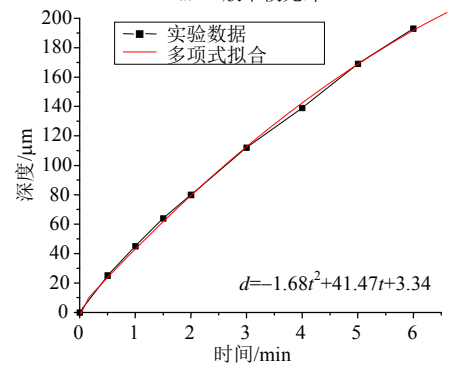
图5 硼锆共掺光纤在40%氢氟酸溶液中腐蚀4 min的显微图

一般单模光纤和硼锆共掺光纤的腐蚀深度与时间的关系如图6所示。为避免氢氟酸溶液随时间挥发引起的浓度降低, 从而造成腐蚀速率的略微降低, 实验时将腐蚀液置于阴暗、空气流动弱的环境中, 还可在溶液表面覆盖一层密度较小的液体(实验中使用的是异辛烷)。从图5可看出, 硼锆共掺光纤的腐蚀速率远远高于一般单模光纤, 只需6 min即可腐蚀到200 μm左右的槽深。从图中还可发现, 一般单模光纤腐蚀的深度与腐蚀时间基本成正比, 线性度

为0.999 63; 而硼锆共掺光纤随着腐蚀深度的增加, 纤芯腐蚀速率逐渐降低, 呈二次曲线变化趋势。这主要是由于用掺硼光纤的纤芯-包层腐蚀速率比远远大于一般单模光纤, 导致腐蚀同样深度时凹槽的开口直径远远小于一般单模光纤腐蚀的凹槽的开口直径。因此在腐蚀到一定深度后, 槽内的氢氟酸溶液得不到及时补充, 造成纤芯腐蚀速率的下降。用一般单模光纤腐蚀出的凹槽由于开口较大, 则几乎不受该因素影响。



a. 一般单模光纤



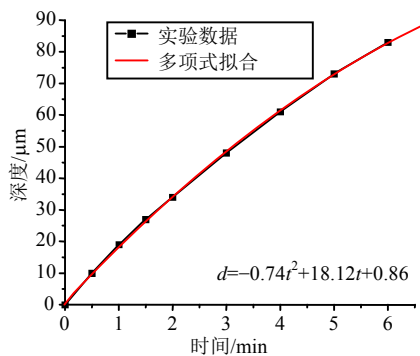
b. 硼锆共掺光纤

图6 40%氢氟酸溶液中光纤腐蚀深度与腐蚀时间的关系

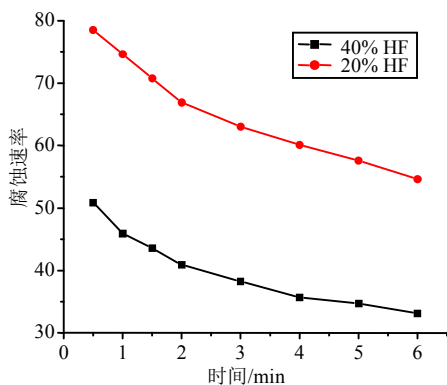
由于硼锆共掺光纤的腐蚀速率过快, 使得精确控制腐蚀的槽深变得困难。为了提高腐蚀精度, 可以适当降低氢氟酸溶液的浓度, 以此降低腐蚀速率。将氢氟酸溶液浓度降低一半时, 硼锆共掺光纤的腐蚀深度与时间的关系图如图7a所示; 图7b为两种溶液浓度下, 硼锆共掺光纤的纤芯-包层腐蚀速率比。降低氢氟酸溶液的浓度后, 硼锆共掺光纤的纤芯-包层腐蚀速率比反而上升。对照图5和图6, 在腐蚀深度接近的时间点上, 硼锆共掺光纤在20%氢氟酸溶液中的纤芯-包层腐蚀速率比在40%氢氟酸溶液中更高。这意味着降低腐蚀液的浓度可进一步减小凹槽的开口直径。这与一般单模光纤的情况相反。

用腐蚀的方法制作光纤法-珀腔的优势之一是可批量生产, 因为制作具有良好的一致性光纤法-珀腔非常重要。影响腐蚀速率的除了光纤的材料和氢氟酸溶液的浓度外, 还有温度和压强。但是, 在

同一批腐蚀过程中，每一根光纤附近的氢氟酸溶液浓度、温度和压强基本是相同的，所以这3个因素对腐蚀一致性的影响是可以忽略的。经过多次实验，发现腐蚀出的腔一致性较好。在同一氢氟酸浓度下，腐蚀一批光纤所得的槽深，其范围不超过平均值的±3%，光纤材料的不均匀以及氢氟酸溶液的浓度波动是产生差别的主要原因。



a. 20%氢氟酸溶液中腐蚀深度与腐蚀时间的关系



b. 不同浓度时纤芯-包层腐蚀速率比

图7 不同氢氟酸溶液浓度时硼锆共掺光纤的腐蚀速率比较

2.2 放电

用光纤熔接机对腐蚀后的光纤开口处进行放电。放电使得光纤塌陷闭合，形成类似锥形的空气腔。放电时，将腐蚀好的光纤放入光纤熔接机的一端，先设定好放电强度和放电时间，然后采用手动熔接放电即可。实验使用的光纤熔接机型号是FITEL S177。放电强度的大小和放电时间的长短对传感器的形状影响很大。采用不同的放电强度和放电时间而形成的各种形状的空气腔如图8所示。放电参数如表2所示。

表2 放电参数记录表

	放电强度	预熔时间/ms	放电时间/ms
图8a	100	150	750
图8b	80	150	750
图8c	40	150	750
图8d	40	150	1 000

图8a放电强度适中，能封闭成腔；光纤端面受影响较小，略成圆弧状。图8b放电强度偏大，出现了两个空气腔；传感器端面同样呈圆弧状。图8c放电强度偏弱，槽口不能封闭成腔。图8d放电强度太大，致使传感器端面成半球状，使得光在光纤中的模场变得复杂，可能导致光谱受温度影响加剧；空气腔也变成球状，不再接近理论模型；如果放电强度再加大，空气腔将不复存在。初步的实验结果显示，在放电强度和合适的时间的情况下，加工的重复性较好，但最佳的实验参数需要进一步优化。

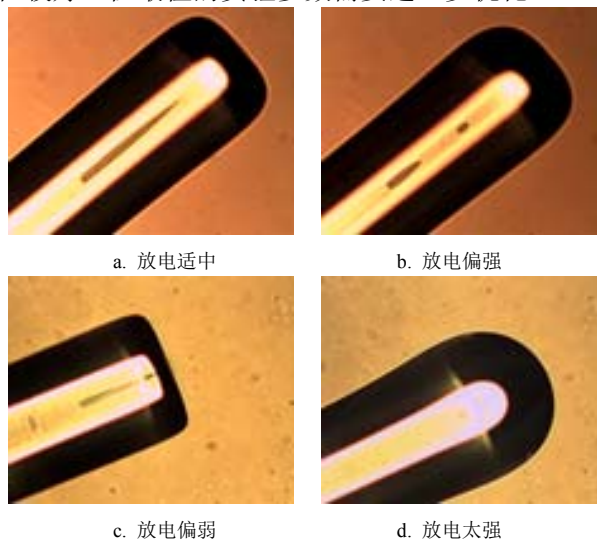


图8 不同放电参数下凹槽形成的不同形状的空气腔

3 实验结果与讨论

本文实验采用Si720高精度光谱仪测量光纤法-珀传感器的干涉条纹，通过计算干涉条纹的对比度测量介质的折射率，实验装置如图9所示。折射率的定标采用了阿贝折射计。

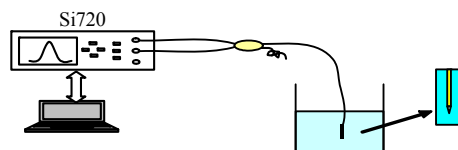


图9 折射率实验系统结构图

传感器的干涉条纹如图10所示,计算出不同折射率下的干涉条纹对比度与折射率的关系如图11所示，折射率与反射光谱条纹对比度的关系约为 $V = -30.32n + 43.55$ 。

在实验中发现，该传感器对温度不敏感。在1.357~1.397的折射率范围内对比度的线性度为0.994 44，对比度共改变了1.2 dB，相应的折射率灵敏度约为30 dB/RIU。由于Si720的光强分辨率为0.001 dB，因此该系统的折射率分辨率约为 3.33×10^{-5} 。

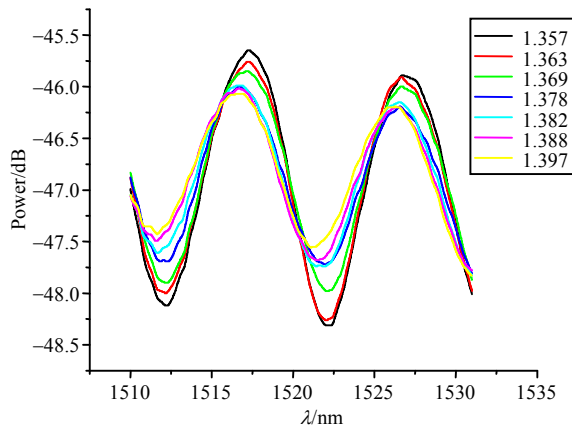


图10 传感器在不同折射率液体中的反射谱

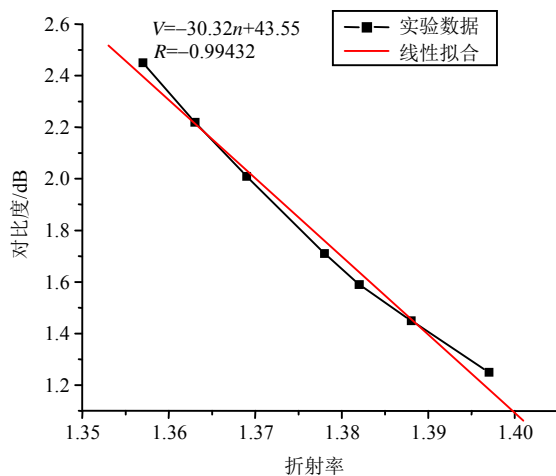


图11 对比度随折射率的变化

4 结 论

本文提出了一种化学腐蚀硼锆共掺光纤制作光纤法-珀传感器的方法。该方法所需设备简单, 操作方便, 可批量生产, 并且生产成本低。采用该方法制成的传感器, 在1.357~1.397折射率范围内具有良好的线性度和较高的折射率分辨率, 并且对温度不敏感。传感器自成一体, 尺寸小、可靠性高, 测量方便。化学腐蚀硼锆共掺光纤的方法, 有望用于制作腔长较长的光纤法-珀传感器。

参 考 文 献

[1] JIN Wei, LIAO Yan-biao, ZHANG Zhi-peng, et al. Guided wave optical sensor: principle and technology[M]. Beijing: Science Press, 1998.
 [2] JIANG Shao-ji, LIANG You-cheng, ZHU Xi, et al. Asymmetric Fabry-Perot interferometric cavity for fiber optical sensors[J]. Chinese Optics Letter, 2006, 4(10): 563-565.

[3] WILLSHIRE A J, PAWEL N, DZIUDA L, et al. Dynamic strain measurement using an extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor and an arrayed waveguide grating device[J]. IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement, 2004, 53(1): 4-9.
 [4] SIRKIS J S, BERKOFF T A, JONES R T, et al. In-line fiber etalon (ILFE) strain sensor fiber optic[J]. Lightwave Technol, 1995, 13(7): 1256-1263.
 [5] RAN Zeng-ling, RAO Yun-jiang, LIU Wei-jun, et al. Laser-micromachined Fabry-Perot optical fiber tip sensor for high-resolution temperature independent measurement of refractive index[J]. Optics Express, 2008, 16(3): 2291-2108.
 [6] RAN Zeng-ling, RAO Yun-jiang, DENG Hong-you, et al. Miniature in-line photonic crystal fiber etalon fabricated by 157 nm laser micromachining. Optics Letters, 2007, 32(21): 3071-3073
 [7] RAO Yun-jiang, XU Bing, RAN Zeng-ling, et al. Micro extrinsic fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensor based on Erbium- and Boron- doped fibers[J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(2): 024208.
 [8] ZHU Yi-zheng, COOPER K L, PICKRELL G R, et al. High-temperature fiber-tip pressure sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(2): 861-869.
 [9] ZHANG Yan, CHEN Xiao-pei, WANG Yong-xin, et al. Microgap multicavity Fabry-Pérot biosensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(7): 1797-1804.
 [10] RAO Yun-jiang, JIANG Jian, ZHOU Chang-xue. Spatial-frequency-multiplexed fiber-optic Fizeau strain sensor system with optical amplification, sensors & actuators[J]. Physical, 2005, 120(2): 354-359.
 [11] RAO Yun-jiang, ZHOU Chang-xue, ZHU Tao. SFDM/CWDM of fiber-optic Fizeau strain sensors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(6): 1259-1261.
 [12] 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.
 LIU Wei-jun, RAO Yun-jiang, RAN Zeng-ling, et al. Novel Fabry-Pérot fiber-optic refractive-index sensor based on laser micromachining[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7): 1400-1404.
 [13] ZHU Yong, ZHANG Jie, CHEN Wei-min, et al. Study on the method of improving EFPI's signal quality[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(5): 544-548.
 [14] CHEN Xiao-pei, SHEN Fa-bin, WANG An-bo, et al. Novel Fabry-Perot fiber optic sensor with multiple applications[EB/OL]. (2004-11-17). <http://dx.doi.org/10.1117/12.581014>.
 [15] GONG Yuan, RAO Yun-Jiang, GUO Yu, et al. Temperature-insensitive micro Fabry-Pérot strain sensor fabricated by chemically etching Er-doped fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(22): 1725-1727.

编辑 张俊