

聚合物微腔的探针型光纤法布里-珀罗干涉仪传感器

杨先辉¹ 张轩宇² 万之套³ 刘镇领³ 杨皓³ 于永森²

¹中国石油集团渤海钻探工程有限公司博士后科研工作站, 天津 300457

²吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林 长春 130012

³中国石油集团渤海钻探工程有限公司, 天津 300457

摘要 设计了一种在单模光纤末端涂覆聚二甲硅氧烷(PDMS)形成聚合物微腔的探针型光纤法布里-珀罗干涉仪传感器(PFFPI),并对其折射率(RI)和温度传感特性进行了研究。其折射率和温度测量分别是基于消光比变化和波长漂移进行的,同时着重对这个器件的与众不同的折射率传感特性进行了理论分析,该理论分析可用于传感器的设计。传感器同时具有比较高的折射率灵敏度和温度灵敏度,在折射率为1.3625~1.4206的范围内折射率灵敏度为-180.359 dB/RIU(RIU表示折射率单元),在温度为25℃~60℃的范围内温度灵敏度为355.28 pm/℃。该传感器具有体积小和生物相容性良好等优点,与传统光纤传感器相比其更具优势的应用就是生化活动的检测,如组织培养等。

关键词 传感器;光纤传感器;光纤法布里-珀罗干涉仪;聚合物微腔;聚二甲硅氧烷;探针型;高灵敏度

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.050606

Polymer Micro-Cavity Based Probe Type Fiber Fabry-Perot Interferometer Sensor

Yang Xianhui¹ Zhang Xuanyu² Wan Zhitao³ Liu Zhenling³ Yang Hao³ Yu Yongsen²

¹Post-Doctoral Research Center of CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin 300457, China

²State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

³CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin 300457, China

Abstract A polymer micro-cavity based probe-type fiber Fabry-Perot interferometer is demonstrated by coating PDMS at the end tip of the single mode fiber, at the same time, the refractive index (RI) and temperature sensing characteristics of the sensor are also investigated. The refractive index and temperature sensing are based on extinction ratio measurement and wavelength shift measurement, respectively. Meanwhile, the theoretical analysis of the special refractive index sensing characteristics of the sensor is conducted, which can be used to design sensors. The sensor has a simultaneously high sensitivity to refractive index and temperature, the refractive index sensitivity is -180.359 dB/RIU (RI unit) in the refractive index range of 1.3625~1.4206, and the temperature sensitivity is 355.28 pm/℃ in the temperature range of 25℃~60℃. The sensor has the merits of compact size and good biocompatibility. It is advantageous in applications for biochemical activity detection when compared to the conventional fiber sensors, such as tissue culture.

Key words sensors; fiber sensor; fiber Fabry-Perot interferometer; polymer micro cavity; PDMS; probe type; high sensitivity

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.2430

收稿日期: 2014-01-06;收到修改稿日期: 2014-02-06;网络出版日期: 2014-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(91123027)、天津市企业博士后创新项目择优资助(2012-04)、中国石油集团科研与技术开发项目(2013E-38-06)

作者简介: 杨先辉(1972—),男,博士研究生,主要从事光纤传感技术和油气井测试等方面的研究。

E-mail: xianhuiyang@163.com

导师简介: 于永森(1974—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: yuys@jlu.edu.cn

1 引言

探针型的光纤法布里-珀罗干涉仪(PFFPI)可以进行遥远距离的测量和危险环境的定点探测,是一种很重要的光纤传感器,同时其兼具传统光纤法布里-珀罗干涉仪的体积小、稳定好、抗电磁干扰和灵敏度高优点,在以往得到了广泛的研究,被用作温度^[1-6]、折射率(RI)^[7-11]、压力^[12-13]、生化^[14]等方面的传感。有多种方法可用于制作探针型光纤法布里-珀罗干涉仪,如激光微加工^[5,9-11]、熔接^[1-4,6,8,12]、化学腐蚀^[13]等。这些方法具有加工精细、加工结构巧妙等优点,但是往往需要如激光器等昂贵的设备或者如光子晶体光纤等一些特种光纤,这极大地增加了系统的造价和加工复杂度。同时,基于全二氧化硅光纤结构的光纤^[15-20]传感器由于材料低热膨胀系数和热光系数的限制,其温度灵敏度受到限制,而通过端面沾取聚合物薄膜^[7,14]的方法则可以有效地避免上述这些问题。

本文提出了一种在光纤末端利用光纤熔接机沾取形成聚二甲硅氧烷(PDMS)薄膜的方法制作了具有较高温度灵敏度和折射率灵敏度的探针型光纤法布里-珀罗干涉仪传感器,具有造价低、结构紧凑、生物相容性好等优点。文中对该传感器的独特折射率响应做了一个系统的分析,有助于设计基于这种结构的理想传感器。

2 结构与原理

2.1 PFFPI的制备

PFFPI的基本结构是在单模光纤(SMF-28e, Corning)的末端形成一个PDMS聚合物微腔,这层PDMS微腔由于表面张力的作用形成一个良好的反射面,如图1所示。

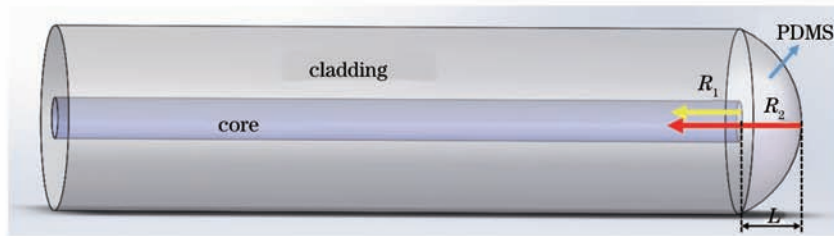


图1 PFFPI的结构示意图

Fig.1 Structure diagram of PFFPI

如图2所示,PFFPI的具体制备方法如下:首先将PDMS(Sylgard 184, Dow corning)的预聚体和固化剂以体积比为10:1的组分充分搅拌混合,并在离心机上去除搅拌时产生的气泡。用一段端面切平的单模光纤沾取在配好的PDMS溶液中,随后将其放在光纤熔接机(FSU-975, Ericsson)的一个夹具上夹住,然后将另一段通过3 dB耦合器和宽带光源(Superk Compact, NKT Photonics)与光谱仪(AQ6370, Yokogawa)相连的端面切平的单模光纤也放在熔接机上夹住,光谱仪的波长分辨率和功率分辨率分别为0.02 nm和0.001 dB。通过控

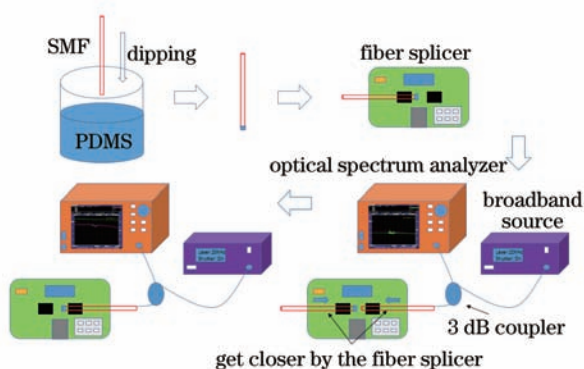


图2 PFFPI的制作过程示意图

Fig.2 Fabrication process diagram of PFFPI

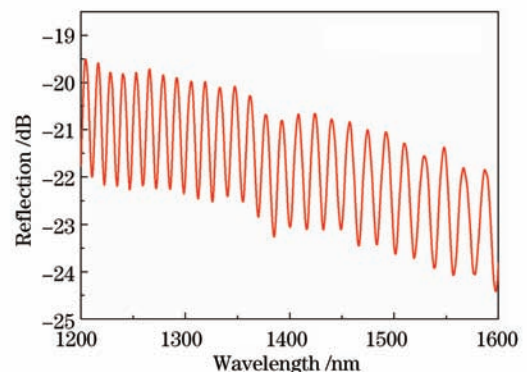


图3 腔长为46 μm的PFFPI在空气中的反射谱

Fig.3 Reflection spectrum of PFFPI with a cavity length of 46 μm in the air

制熔接机的步进电机,使两段光纤端面接触,从而和光谱仪相连的光纤端面上将会沾取一定量的PDMS并形成质量较好的PDMS微腔。此外,通过控制两段光纤的接触次数,就可以形成不同厚度的腔。然后将制备好的光纤被放置在干燥箱中在105℃的温度下固化2h。对于固化之后腔长 L 为46 μm 的PFFPI,其在空气中的反射谱如图3所示。

2.2 PFFPI的干涉原理

如图1中的干涉原理示意图所示,其干涉是依靠PFFPI的两个反射面的菲涅耳反射,这两个面分别是光纤端面与PDMS的界面以及PDMS与空气的界面。光纤端面与PDMS界面反射率可以表示为 $R_1 = \left| \frac{n_{\text{core}} - n_{\text{pdms}}}{n_{\text{core}} + n_{\text{pdms}}} \right|^2$,其中 n_{core} 和 n_{pdms} 分别是光纤纤芯和PDMS的折射率。PDMS与空气的界面的反射率可以表示为 $R_2 = \left| \frac{n_{\text{pdms}} - n_{\text{sur}}}{n_{\text{pdms}} + n_{\text{sur}}} \right|^2$,其中 n_{sur} 是外部环境的折射率(SRI)。进而可以得到该器件的干涉的标准化反射谱^[9]:

$$R_{\text{FP}}(\lambda) = R_1 + M^2 R_2 + 2\sqrt{M^2 R_1 R_2} \cos[4\pi n_{\text{pdms}} L/\lambda + \delta(\pi)], \quad \delta(\pi) = 0, \quad n_{\text{pdms}} > n_{\text{sur}}; \delta(\pi) = \pi, \quad n_{\text{pdms}} \leq n_{\text{sur}}, \quad (1)$$

式中 $M = (1 - \alpha)(1 - A_1)$ 为损耗项, α 为PDMS腔的损耗因子, A_1 为第一个反射面的透射损耗因子, λ 为入射光的波长, $\delta(\pi)$ 代表 π 相移。在下面的模拟中,采用的参数分别为 $L = 46 \mu\text{m}$, $\alpha = 0.02$, $A_1 = 0.4$, $n_{\text{core}} = 1.4634$, $n_{\text{pdms}} = 1.4206$ 。利用(1)式,可以将消光比表示为

$$\eta_{\text{ER}} = 10 \lg \frac{R_1 + M^2 R_2 + 2\sqrt{M^2 R_1 R_2}}{R_1 + M^2 R_2 - 2\sqrt{M^2 R_1 R_2}}. \quad (2)$$

2.3 PFFPI的折射率传感理论

在本实验中得到了和之前报道的工作^[2,9]不同的实验结果,为了解释和分析这个实验结果,详细分析了 η_{ER} 和 n_{sur} 的关系。根据 $R_2 = \left| \frac{n_{\text{pdms}} - n_{\text{sur}}}{n_{\text{pdms}} + n_{\text{sur}}} \right|^2$,可以得到 R_2 随着 n_{sur} 的变化关系,如图4所示。

从图4中可以看出,在 $1 \leq n_{\text{sur}} \leq 1.8$ 的折射率范围内, $R_2 < 3\%$ 且 R_2 与 n_{sur} 是一个二次关系,可知在一定折射率范围内有两个不同的外部折射率值对应于相同的 R_2 。根据图4可知,在 $n_{\text{sur}} = 1.4206$ 时,第二个端面的反射率 $R_2 = 0$ 。同时由(2)式可以得到 η_{ER} 与 R_2 之间的关系,如图5所示。

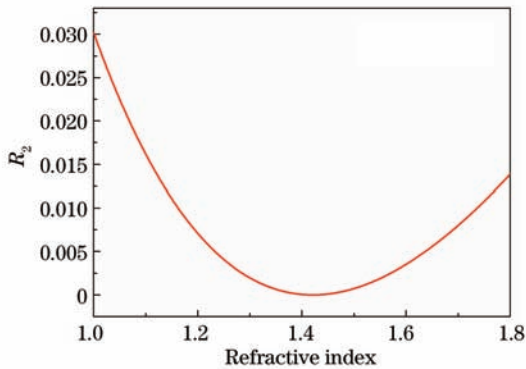


图4 R_2 随着 n_{sur} 的变化趋势

Fig.4 Variation tendency of R_2 changes with n_{sur}

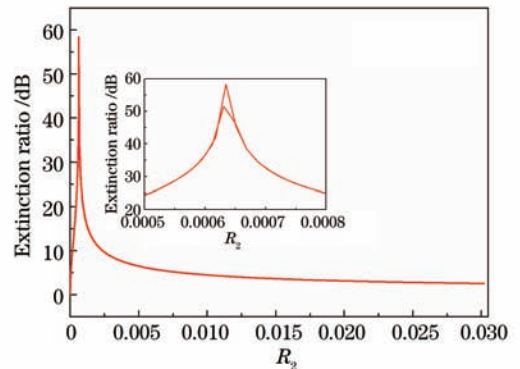


图5 η_{ER} 与 R_2 的关系

Fig.5 Relationship between η_{ER} and R_2

在 $1 \leq n_{\text{sur}} \leq 1.8$ 的折射率范围内,可以看到在第二个端面的反射率较低时,消光比有极大值,图5中的插图是对极大值附近区域的一个放大,从插图中可以看到有两个峰值极大值,对应于图4中的两个低反射率值。

根据 η_{ER} 对 n_{sur} 求导可以得到:

$$\dot{\eta}_{\text{ER}} = \frac{-80M\sqrt{R_1}n_{\text{pdms}}(n_{\text{pdms}} - n_{\text{sur}})}{\ln 10(R_1 - M^2 R_2)\sqrt{R_2}(n_{\text{pdms}} + n_{\text{sur}})^3}. \quad (3)$$

结合 $R_2 = \left| \frac{n_{\text{pdms}} - n_{\text{sur}}}{n_{\text{pdms}} + n_{\text{sur}}} \right|^2$ 和(2)式可以得到 η_{ER} 与 n_{sur} 的关系,如图6所示。

由(3)式和以上的分析不难理解 η_{ER} 与 n_{sur} 之间的关系, η_{ER} 的极大值实际上是一个无穷大的点,但是在实验中由于光谱仪分辨率和探测范围的限制,只能得到一个有限值。从图6中可以看到,在 n_{sur} 发生改变时, η_{ER} 有多个拐点,对于传感器而言这是非常不利的,因为这极大地影响了器件的解调,在下文中将会对这个拐点作进一步的分析。

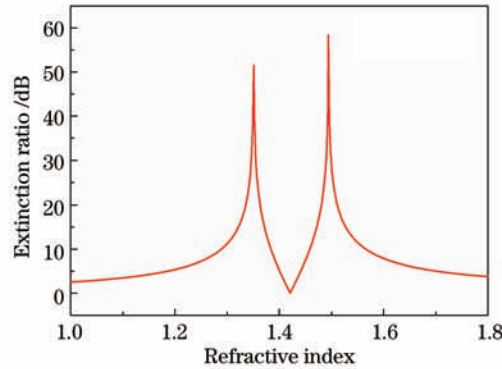


图6 η_{ER} 与 n_{sur} 之间的关系

Fig.6 Relationship between η_{ER} and n_{sur}

2.4 PFFPI的温度传感理论

根据(1)式中的相位项,可得到当 $4\pi n_{pdms}L/\lambda = (2m+1)\pi$ 时,该波长的位置对应于干涉峰的峰谷,此时 $\lambda_{valley} = 4n_{pdms}L/(2m+1)$,当外界温度发生改变时,由于材料的热膨胀效应和热光效应,使得相位发生变化,从而导致波长的漂移。当温度改变时,则可得

$$\frac{\Delta\lambda_{valley}}{\lambda_{valley} \cdot \Delta T} = \frac{\Delta n_{pdms}}{n_{pdms} \cdot \Delta T} + \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta T} = \varepsilon + \kappa, \quad (4)$$

式中 ε 是PDMS的热膨胀系数 (3.25×10^{-4}),而 κ 是PDMS的热光系数 (-1.5×10^{-4})。由于聚合物的热膨胀系数和热光系数比二氧化硅的热膨胀系数 (5.5×10^{-7}) 和热光系数 (1.0×10^{-5}) 高很多,因此根据(4)式,可以设想该器件的温度灵敏度相对全二氧化硅的结构来说将会有很大的提升。根据某一个干涉峰峰谷波长随温度增加的漂移量,可计算该器件的温度灵敏度。

3 实验结果和分析

3.1 PFFPI的折射率测量

在实验中,所用的器件的腔长 $L=46 \mu\text{m}$ 。将PFFPI浸入不同浓度的溴化钠溶液中进行折射率测量,该系列溴化钠溶液的折射率范围是 1.3317 ~ 1.4236,测得该器件的折射率灵敏度为 -180.359 dB/RIU (RIU表示折射率单元)。与以往报道的光纤法布里-珀罗干涉仪传感器相比,该传感器的折射率灵敏度较高^[2,8-9],其响应曲线和光谱变化分别如图7和图8所示。图8中箭头代表折射率的增加。

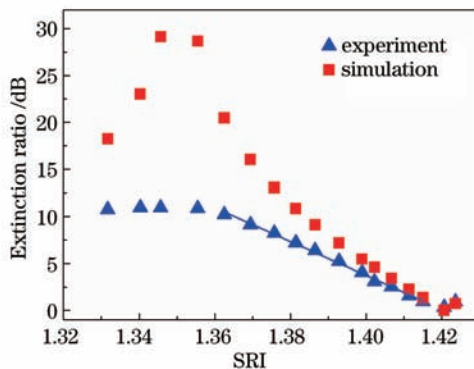


图7 PFFPI的折射率响应曲线

Fig.7 Response curve of PFFPI to RI

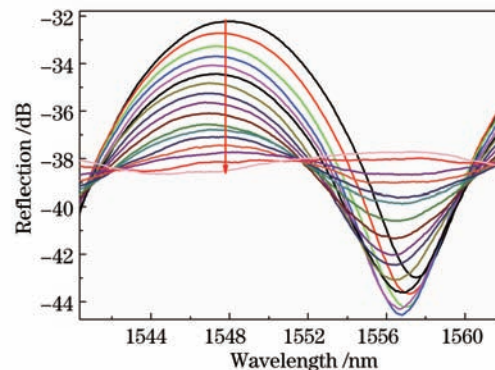


图8 PFFPI随着外界折射率的光谱变化

Fig.8 PFFPI spectra change with the SRI

由理论分析可知,在低折射率范围内,该器件的折射率响应有一个拐点,这个点对于实际应用是不利的,但是根据计算可以得到当涂覆在单模光纤末端的材料折射率低于 1.413 或者高于 1.673 时,在实验的测量范围内,第一个拐点可以被去除,同时第二个拐点可以利用 π 相移解决。从图 7 中可以看到理论模拟和实验测量在低折射率范围内有一个较大的偏离,这可能是由于端面反射率较低,使得传感器的反射功率较小,而光谱仪的探测范围有限导致的。同时从图 7 中可以看到理论模拟的曲线有一个更高的斜率,因而可以使用具有更宽探测范围的光谱仪来实现更大的灵敏度。从图 8 中可知,在初始的低折射率范围内,干涉波长发生了一定的变化,这可能是由于制作的探头初始放入水溶液中,该器件需要一个稳定过程,而稳定后在其他折射率范围内,波长基本保持不变。

3.2 PFFPI 的温度测量

将 PFFPI 封装在一个玻璃管中,然后将该玻璃管放置在油浴槽内进行温度测量,此油浴槽的温度精度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$,测得的温度灵敏度为 $355.28\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,这相对于全二氧化硅结构的光纤传感器来说是比较高的^[15-21]。其随温度改变时,PFFPI 的光谱响应和光谱变化如图 9 和图 10 所示。

从图 9 中可以看到,理论模拟和实验有一个差距,这可能是由于 PDMS 随着固化条件的不同,材料的性质也有所不同,即热膨胀系数和热光系数发生改变。从图 10 中可知随温度的增加,干涉峰的位置发生红移,且消光比基本不发生改变。

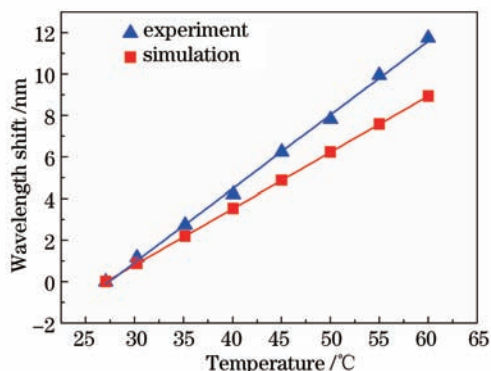


图 9 PFFPI 随温度增加的响应曲线

Fig.9 Response curve of PFFPI to temperature

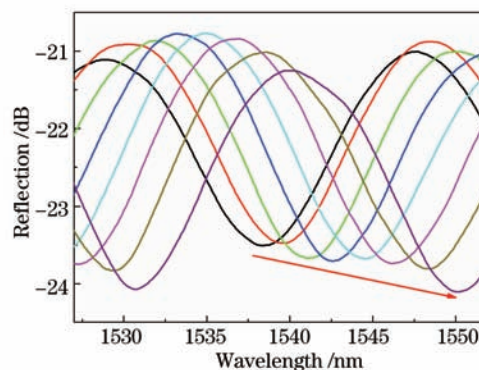


图 10 PFFPI 随温度增加的光谱变化(箭头代表温度的增加)

Fig.10 PFFPI spectra change with temperature (the arrow represents the increase of the temperature)

4 结 论

基于光纤末端沾取 PDMS 的方法形成了一个探针型的光纤法布里-珀罗干涉仪传感器。这个传感器由于引入了聚合物材料,其温度灵敏度很高,同时与以往的结构相比,其折射率灵敏度也较高。文中对这个传感器的传感特性进行了系统地分析。该结构具有小巧、灵敏度高、生物兼容性好和成本低等优点,是用于生化传感等方面的一个优选的传感器。

参 考 文 献

- 1 D Wu, T Zhu, G Y Wang, *et al.*. Intrinsic fiber-optic Fabry-Perot interferometer based on arc discharge and single-mode fiber [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(12): 2670-2675.
- 2 C L Lee, J M Hsu, J S Horng, *et al.*. Microcavity fiber Fabry-Perot interferometer with an embedded golden thin film [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 25(9): 833-836.
- 3 Y Gong, Y Guo, Y J Rao, *et al.*. Fiber-optic Fabry-Perot sensor based on periodic focusing effect of graded-index multimode fibers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22(23): 1708-1710.
- 4 J J Wang, E M Lally, B Dong, *et al.*. Fabrication of a miniaturized thin-film temperature sensor on a sapphire fiber tip [J]. *IEEE Sen J*, 2011, 11(12): 3406-3408.
- 5 J Ma, J Ju, L Jin, *et al.*. Fiber-tip micro-cavity for temperature and transverse load sensing [J]. *Opt Express*, 2011, 19(13): 12418-12426.

- 6 J Zhang, H Sun, Q Z Rong, *et al.*. High-temperature sensor using a Fabry-Perot interferometer based on solid-core photonic crystal fiber [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(7): 070607.
- 7 O Frazão, P Caldas, J L Santos, *et al.*. Fabry-Perot refractometer based on an end-of-fiber polymer tip [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(16): 2474-2476.
- 8 B Dong, J Z Hao, T S Zhang, *et al.*. High sensitive fiber-optic liquid refractive index tip sensor based on a simple inline hollow glass micro-sphere [J]. *Sens Actuators B*, 2012, 171: 405-408.
- 9 Z L Ran, Y J Rao, W J Liu, *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): 2252-2263.
- 10 M Tian, P Lu, L Chen, *et al.*. Micro multicavity Fabry-Perot interferometers sensor in SMFs machined by femtosecond laser [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(16): 1609-1612.
- 11 Z L Ran, Y J Rao, J Zhang, *et al.*. A miniature fiber-optic refractive-index sensor based on laser-machined Fabry-Perot interferometer tip [J]. *J Lightw Technol*, 2009, 27(23): 5426-5429.
- 12 M S Ferreira, J Bierlich, H Lehmann, *et al.*. Fabry-Perot cavity based on hollow-core ring photonic crystal fiber for pressure sensing [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(23): 2122-2124.
- 13 N Wu, Y Tian, X T Zou, *et al.*. A miniature fiber optic blood pressure sensor and its application in in vivo blood pressure measurements of a swine model [J]. *Sens Actuators B*, 2013, 181: 172-178.
- 14 Y T Tseng, Y J Chuang, Y C Wu, *et al.*. A gold-nanoparticle-enhanced immune sensor based on fiber optic interferometry [J]. *Nanotechnology*, 2008, 19(34): 345501.
- 15 C Chen, Y S Yu, R Yang, *et al.*. Reflective optical fiber sensors based on tilted fiber Bragg gratings fabricated with femtosecond laser [J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(3): 455-460.
- 16 Li Jieyan, Zhang Dongsheng, Zhou Zude, *et al.*. High temperature resistant metal packaged multiplexed fiber-optic extrinsic Fabry-Perot interferometer and fiber Bragg grating sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s1): s106002.
李杰燕, 张东生, 周祖德, 等. 耐高温全金属化封装的光纤法布里珀罗干涉仪和光纤光栅复合传感器[J]. *光学学报*, 2013, 33(s1): s106002.
- 17 C Chen, Y S Yu, X Y Zhang, *et al.*. Compact fiber tip modal interferometer for high-temperature and transverse load measurements [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(17): 3202-3204.
- 18 Ji Yushen, Fu Guangwei, Fu Xinghu, *et al.*. Sensing characteristics of Mach-Zehnder interferometer based on the fused tapered photonic crystal fiber sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1006005.
纪玉申, 付广伟, 付兴虎, 等. 熔融拉锥型光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪传感特性[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1006005.
- 19 R Yang, Y S Yu, C Chen, *et al.*. Rapid fabrication of microhole array structured optical fibers [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(19): 3879-3881.
- 20 J C Guo, Y S Yu, X L Zhang, *et al.*. Compact long-period fiber gratings based on periodic microchannels [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(2): 111-114.
- 21 Wang Zhenbao, Yang Pengling, Shao Bibo, *et al.*. Fiber Bragg grating for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 100602.
王振宝, 杨鹏翎, 邵碧波, 等. 应力和温度同时测量的光纤布拉格光栅双参数传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 100602.