

基于乙醇填充的光子晶体光纤温度传感器

高朋¹, 赵勇^{1,2}, 李晋¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 提出一种具有独立探头的反射式高双折射光子晶体光纤环镜结构, 此结构利用乙醇的热光效应对光子晶体光纤双折射线性调制, 双折射的改变引起 Sagnac 干涉系统光程差的变化, 并导致光谱强度在某一温度区间随温度线性变化, 实现了温度的高灵敏度测量。此结构克服了传统的环内结构易受外界扰动的缺点, 并且使其在实际应用中搭建分布式传感系统成为可能。实验验证了乙醇的折射率随温度的线性变化规律, 灵敏度为 $4.45 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$; 验证了填充乙醇后光子晶体光纤双折射与温度的变化规律, 灵敏度为 $0.015625/^{\circ}\text{C}$; 验证了在 $20 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 之间, 输出光强随温度的变化规律, 灵敏度为 $0.0031 \text{ mW}/^{\circ}\text{C}$ 。利用琼斯矩阵理论论证了干涉光谱的形成机理, 得到干涉谱方程。

关键词: 光纤环镜; 光纤传感器; 温度传感器; 高双折射光子晶体光纤; 乙醇

中图分类号: TP 212.11

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)10-1369-05

Temperature Sensor with Photonic Crystal Fiber Filled with Ethanol as Probe

GAO Peng¹, ZHAO Yong^{1,2}, LI Jin¹

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: ZHAO Yong, E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn)

Abstract: A high birefringence photonic crystal fiber (HiBi-PCF) loop mirror structure was proposed with a reflective independent probe, in which the thermo-optic effect of ethanol was used to modulate linearly photonic crystal fiber birefringence. The Sagnac interference optical path difference was changed by the birefringence variations, resulting in the linearly changes of spectral intensity in a certain temperature region. Based on the above principle, high sensitive temperature measurement could be implemented. The structure improves the shortcoming of the traditional ring inner structure affected by external disturbance, and makes it possible to build a distributed sensing system in practical application. The experimental results showed that the refractive index of ethanol changes versus the measured temperature linearly with the sensitivity of $4.45 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$. The birefringence change rule of ethanol-filled HiBi-PCF with temperature was also indicated with the sensitivity of $0.015625/^{\circ}\text{C}$. In addition, the change rule of output light intensity with temperature between $20 \sim 40^{\circ}\text{C}$ was tested with the sensitivity of $0.0031 \text{ mW}/^{\circ}\text{C}$. The formation mechanism of interference spectrum was demonstrated by using the Jones matrix theory, with the interference spectrum equation obtained.

Key words: fiber loop mirror; optical fiber sensor; temperature sensor; HiBi-PCF (high birefringence photonic crystal fibers); ethanol

光子晶体光纤(PCF)是由带气孔的微结构包层和纯二氧化硅的纤芯组成^[1], 和传统的光纤相

比, 具有很多独特的性能^[2]. 例如无截止单模、不同寻常的色度色散、极好的非线性效应及优良的

收稿日期: 2014-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273059, 61203206); 辽宁省自然科学基金资助项目(2013020010).

作者简介: 高朋(1981-), 男, 辽宁盘锦人, 东北大学博士研究生, 沈阳师范大学副教授; 赵勇(1973-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

双折射效应. 光子晶体光纤的双折射特性对温度变化敏感程度小, 具有很好的稳定性. 乙醇的热光系数为常数, 即其折射率和温度呈线性关系^[3]. 本文中, 将乙醇填充在 HiBi-PCF 的气孔中, 充分利用 HiBi-PCF 的温度不敏感性和乙醇折射率与温度的线性规律, 设计出一种温度传感器结构. 光纤环境由于其结构简单、体积较小、灵敏度高, 一直是近几年来被广泛研究的传感结构^[4]. 在普通单模光纤环境的最初设计中, 采用单模光纤连接 2×2 单模光纤耦合器两个输出端口, 构成一个光纤环^[5]. 单模光纤在非挤压、弯曲、扭转的情况下, 双折射效应可以忽略. 因此, 若不考虑单模光纤的双折射效应, 并忽略诸如外界法拉第效应或陀螺旋转效应的影响, 当使用分光比 $K = 0.5$ 的 3dB 单模光纤耦合器时, 这个理想的光纤环起到了“全反射镜”的作用, 因此被称为“光纤环境”. 但是, 任何单模光纤都不可能是完美的圆对称, 即不可能没有双折射效应的存在. 文献^[6]在单模光纤环境中熔接一段高双折射光纤, 利用双折射效应, 基于光谱干涉现象检测外界物理量, 这种结构的优越性越来越突出, 基于此结构的传感器也越来越多^[7-8]. 但瑕疵依然存在, 即单纯的光纤环境的输出结果受挤压、弯曲及扭转等外界情况影响非常严重, 甚至会导致输入的结果不正确, 所以, 这种结构实用性不足.

本文提出一种基于单模光纤环长尾式高双折射光纤环境结构的温度传感器, 由于其能够将传感器探头与光纤环境独立开来, 所以在测量过程中光纤环境能够避免外界环境的扰动, 使光纤环境传感结构在实际应用中成为了可能.

光纤环境传感器通过光谱干涉效应实现被测量的解调, 目前常见的解调方式包括波长解调和光强解调^[9-11]. 单波长光强解调相对于波长解调成本更低, 因此本文采用基于单波长光强解调的方式.

1 实验原理

实验结构如图 1 所示, 传感器由单波长光源 ($1\,550\,\text{nm} \pm 0.02\,\text{nm}$)、单模光纤环 (臂长差 $10\,\text{cm}$)、HiBi-PCF、反射镜、3 dB 耦合器及光功率计组成.

光源发出的光经过 3 dB 耦合器分别进入 3 通道顺时针传输, 进入 4 通道逆时针传输, 到达耦合器 2 时被分为两束分别进入 7 通道和 8 通道, 8 通道引出的单模光纤浸入折射率匹配液中, 光被

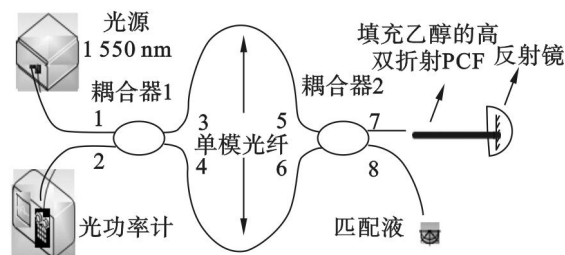


图 1 实验原理结构图

Fig. 1 Experiment principle diagram

匹配液全部吸收, 不会有光强返回, 而 7 通道的单模光纤熔接了一段 HiBi-PCF, HiBi-PCF 末端镀一层反射膜, 能够将光按原路返回, 光波两次经过 HiBi-PCF 并经过耦合器 2 将再次分为两路沿通道 5 和 6 传输. 最终所有光路的光将在耦合器 1 处发生干涉. 在到达通道 2 的光波中, 只有光路路径分别为 $3 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 4$ 和 $4 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 5 \rightarrow 3$ 的两束光波才能由高双折射光纤的作用产生周期分布的干涉输出光谱, 另外两束光波由于光程差较大而无法形成干涉输出光谱, 仅能显示平均光强. 由于仅有一半的光产生周期分布的输出光谱, 且由于存在平均光强, 输出光谱的输出功率最小值不为 0, 因此输出光谱的最大强度及强度范围均有所减小, 但输出光谱的整体周期分布基本不变. 由于此结构在单模光纤环外增加独立探头结构, 因此能够在不干扰环境正常工作的前提下实现了温度的测量.

2 填充乙醇的 HiBi-PCF 双折射热光特性

HiBi-PCF 由于具有普通保偏光纤无可比拟的优越性, 因此, 低衰减光子晶体保偏光纤的研制成功, 将被广泛应用于干涉型光纤传感器如光纤陀螺、大功率传输、高灵敏性检测、超短脉冲激光器/放大器、非线性光学开关等领域. HiBi-PCF 具有很稳定的温度特性, 其本身双折射不会随着温度的改变而发生显著变化, 也就是说, 几乎所有光的特性在其中传输时会被很好地保存, 包括偏振形式.

乙醇的热光系数是一个常数, 即其折射率会随着温度线性变化, 如图 2 所示.

由图 2 可知, 乙醇的折射率随温度的上升而降低, 且呈线性关系, 灵敏度为 $4.45 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$.

本实验中, 使用的是长飞公司的 PM-125-03 型高双折射光子晶体光纤, 小空气孔的直径为 $3.2\,\mu\text{m}$, 大空气孔的直径为 $7\,\mu\text{m}$, 孔间距为

3.2 μm . 图 3 是这种光纤的截面图.

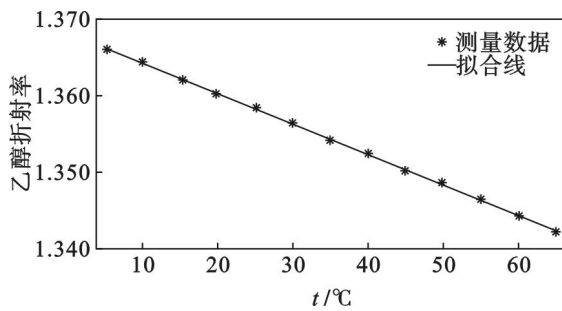


图 2 温度对乙醇折射率的影响

Fig. 2 Effect of temperature on refractive index of ethanol

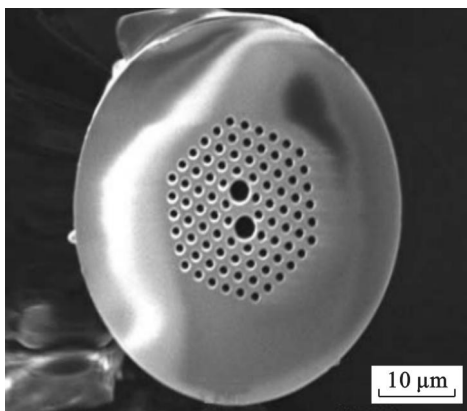


图 3 PM-125-03 截面

Fig. 3 Cross section of PM-125-03

填充高双折射光子晶体光纤主要有三种方法:毛细管法、加压注入法和低压吸入法. 本实验使用加压注入法,原理如图 4 所示.

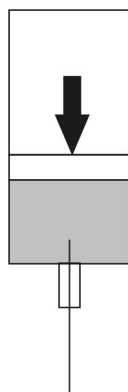


图 4 加压注入法

Fig. 4 Pressurized injection method

取 8 cm 的光子晶体光纤,并且把乙醇加压注入到空气孔中,然后将其与单模光纤熔接. 熔接机采用古河 S178,两个熔接点整体损耗为 4.9 dB. 使用 Sagnac 环境系统,通过干涉谱波峰间距来测量填充乙醇的光子晶体光纤的双折射随温度的变化情况,实验结果如图 5 所示.

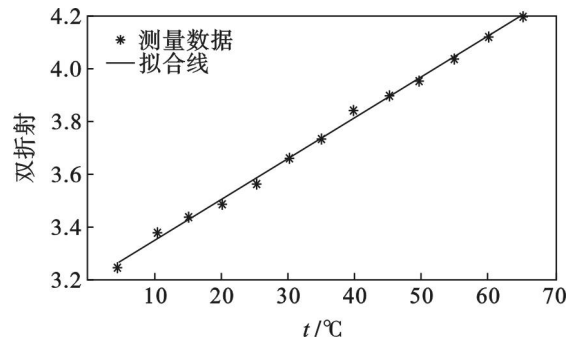


图 5 填充乙醇高双折射光子晶体光纤双折射与温度的关系

Fig. 5 Birefringence of ethanol-filled HiBi-PCF versus temperature

由图 5 可以看出,填充乙醇的 HiBi-PCF 的双折射与温度呈递增的线性关系,灵敏度为 $0.015625/^{\circ}\text{C}$.

3 基于单模光纤环长尾式 HiBi-FLM 的传输理论

单模光纤环长尾式高双折射光纤环境结构 (HiBi-FLM) 的传输过程可以通过琼斯矩阵来描述^[12]. 光纤中光矢量分布起主要作用的是 E_x 或 E_y 分量. 对一般性的完全偏振光, E_x 和 E_y 用列向量的形式可描述为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x e^{i(-kz + \varphi_x)} \\ A_y e^{i(-kz + \varphi_y)} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中: A_x, A_y 分别是 x 轴和 y 轴的振幅; φ_x, φ_y 分别是对应的相位. 式 (1) 中含有对偏振态振幅和相位的完整描述. 但在很多情况下,人们更看重振幅和相位的相对变化,分析时可不考虑共同的相位因子,列向量可简写为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x e^{i\varphi_x} \\ A_y e^{i\varphi_y} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

当在光纤中传输的光连续通过一系列光学器件时,若已知各器件的琼斯矩阵,则总的琼斯矩阵是各器件琼斯矩阵的乘积,即出射光与入射光的关系满足

$$\mathbf{E}_n = \mathbf{J} \mathbf{E}_1 = \mathbf{J}_{n-1} \mathbf{J}_{n-2} \cdots \mathbf{J}_1 \mathbf{E}_1. \quad (3)$$

若光纤中有 n 束相同频率、相同方向的偏振光叠加时,需先分析琼斯矩阵相应分量共同的振幅和相位,然后可利用琼斯矩阵进行相加运算,即

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \cdots + \mathbf{E}_n. \quad (4)$$

影响单模光纤偏振态的外界环境因素有很多,常见的是在光纤上施加如挤压、弯曲或扭转等外部应力引起偏振态改变. 这时光纤可被看成由

一系列线偏振器件和旋光器件组成,总的传输特性可用琼斯矩阵描述为

$$T_{SMF} = R_n T_n R_{n-1} T_{n-1} \cdots R_2 T_2 R_1 T_1. \quad (5)$$

式中: T_i 是长为 l_i 的光纤引起线双折射的相位延迟矩阵; R_i 是长为 l_i 的光纤引起圆双折射的旋转矩阵。

当光纤弯曲时,光纤中心平行于曲率平面的轴向,会产生横向压应力,将引起线双折射,则长为 l_i 的光纤相位延迟矩阵为

$$T_i = e^{-i\Gamma} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\delta_i} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中, Γ 和 δ_i 均为相位延迟系数。

当光纤受到各个方向均匀应力或受到拉伸时,长为 l_i 的光纤的相位延迟矩阵为

$$T_i = \begin{bmatrix} e^{-i\Gamma} & 0 \\ 0 & e^{-i\Gamma} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

当光纤受到扭转时,扭转引起的切应力会引起圆双折射效应,则长为 l_i 的光纤的旋转矩阵为

$$R_i = e^{-i\Gamma} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}. \quad (8)$$

式中, θ 为旋转角度。

当组成光纤环境的单模光纤受到外部应力作用,偏振态的改变会影响光纤环境的输出光谱,因此在实验中应适当调节单模光纤,在其达到光纤环境所需要的输出光谱时加以固定和隔离,才能尽量减小外部应力的干扰。

不考虑耦合器的插入损耗时, 2×2 光纤耦合器的传输特性可由琼斯矩阵描述为

$$E_{out} = T_c E_{in} = \begin{bmatrix} E_{out1} \\ E_{out2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in1} \\ E_{in2} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

式中:

$$T_c = \begin{bmatrix} A & B \\ B & A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-K} & i\sqrt{1-K} \\ i\sqrt{1-K} & \sqrt{1-K} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

K 是分光比,且直通臂和耦合臂的光波相位差为 $\pi/2$ 。

根据式(3)进行组合、计算、化简,最终得到

$$T = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{1}{64} (12 - 4\cos(2(\theta_1 - \theta_2))) + 2\cos\left(\Gamma - \frac{4\pi\Delta nL}{\lambda} - \varphi\right) + 2\cos\left(\Gamma + \frac{4\pi\Delta nL}{\lambda} - \varphi\right) + 16\left(-\cos(\theta_1 - \theta_2) + \cos\left(\frac{\Gamma - \varphi}{2}\right)\right)\sin(\theta_1 - \theta_2)\sin(\theta_1 + \theta_2 + 2\theta_3)\sin\frac{4\pi\Delta nL}{\lambda}\sin\left(\frac{\Gamma - \varphi}{2}\right) - 2\cos(\Gamma + 2\theta_1 - 2\theta_2 - \varphi) - 2\cos(\Gamma - 2\theta_1 + 2\theta_2 -$$

$$\varphi) - 4\cos(\Gamma - \varphi) - 4\cos\left(\frac{4\pi\Delta nL}{\lambda}\right) - \cos\left(\Gamma + 2\theta_1 - 2\theta_2 - \frac{4\pi\Delta nL}{\lambda} - \varphi\right) - \cos\left(\Gamma - 2\theta_1 + 2\theta_2 - \frac{4\pi\Delta nL}{\lambda} - \varphi\right) - \cos\left(\Gamma + 2\theta_1 - 2\theta_2 + \frac{4\pi\Delta nL}{\lambda} - \varphi\right) - \cos\left(\Gamma - 2\theta_1 + 2\theta_2 + \frac{4\pi\Delta nL}{\lambda} - \varphi\right) + 2\cos\left(2\left(\theta_1 - \theta_2 + \frac{2\pi\Delta nL}{\lambda}\right)\right) + 2\cos\left(2\left(\theta_1 - \theta_2 - \frac{2\pi\Delta nL}{\lambda}\right)\right)). \quad (11)$$

式(11)表述了系统的输出光谱方程,可以看出,它是一条正弦曲线。已知 $L, \Delta n$ 均为高双折射光纤参数; θ_1, Γ 及 θ_2, φ 分别为环内两组单模光纤本身的旋转角度和相应的相位延迟, θ_3 为高双折射光纤对应于单模光纤快(慢)轴的旋转角度,这 5 个参数均归为单模光纤的参数。固定单模光纤的参数 $\theta_1 = 30^\circ, \Gamma = 0^\circ, \theta_2 = 60^\circ, \varphi = 90^\circ, \theta_3 = 45^\circ$ 。为了便于分析,这里使用的双折射是实验中测得数据的线性拟合数据,以便得到更加流畅的曲线,然后分别代入式(11)中,在 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 的单色入射波情况下,填充了乙醇的 HiBi-PCF 光强干涉谱如图 6 所示。

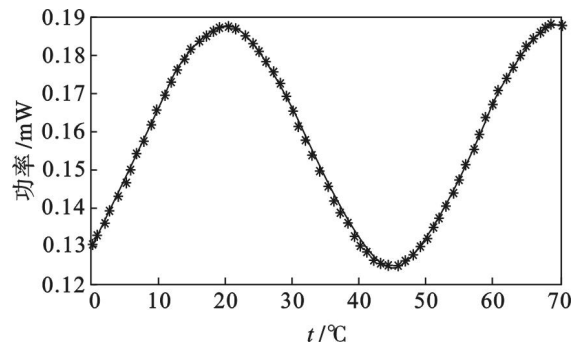


图 6 温度与相对输出光强的关系 ($L = 1 \text{ cm}$)

Fig. 6 Relationship between temperature and output light intensity at $L = 1 \text{ cm}$

由图 6 可以看出,理论上透射光谱确实不为单调函数,而是与温度呈正弦关系,但是在正弦函数的上升或者下降区间内却可以近似呈线性关系。此结构缺点是测温范围较窄,可应用于量程范围较小的场合。

4 基于单模光纤环长尾式高双折射光纤环境结构的温度传感器实验

按照图 1 搭建传感系统,将乙醇填充到光子

晶体光纤中,并将其一端与 7 通道单模光纤熔接,另一端镀银镜.光源采用窄线宽半导体激光器,波长范围为 $1\,550\text{ nm} \pm 0.02\text{ nm}$,入射光功率为 3.2 mW .改变温度并读取功率计上获得的相应数据,温度选取 $20 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,功率与温度的关系如图 7 所示.

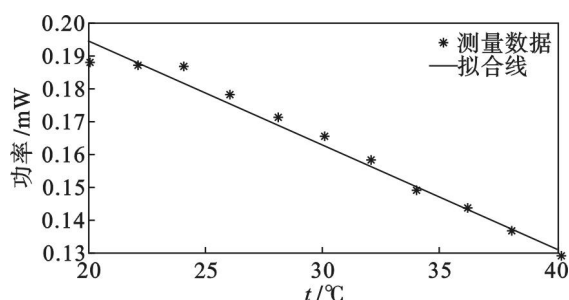


图 7 实验测得光功率与温度关系图

Fig. 7 Experimental measurement result of output power versus temperature

从图 7 中可以看出,输出光功率线性拟合度很高,测得灵敏度为 $0.003\,1\text{ mW}/^{\circ}\text{C}$.在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时测得的最小功率为 0.13 mW ,即若采用分辨率为 0.001 dB 的光功率计,此传感器最佳分辨率优于 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5 结 论

实验证明了乙醇的折射率随温度的上升而降低,且呈线性关系,灵敏度为 $4.45\text{e}^{-4}/^{\circ}\text{C}$;填充乙醇的 HiBi-PCF 的双折射与温度呈递增的线性关系,灵敏度为 $0.015\,625/^{\circ}\text{C}$;理论推导得出传感系统透射光谱不为单调函数,而是与温度呈正弦关系,但是在正弦函数的上升或者下降区间内却可以近似呈线性关系;实验证明了 HiBi 温度传感系统输出光功率线性拟合度很高,灵敏度为 $0.003\,1\text{ mW}/^{\circ}\text{C}$.

参考文献:

- [1] Knight J C, Russell P S J. New ways to guide light [J]. *Science*, 2002, 296 (5566): 276 - 277.
- [2] Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Wadsworth W J, et al. Highly birefringent photonic crystal fibers [J]. *Optics Letters*, 2000, 25 (18): 1325 - 1327.
- [3] Xin Y, Dong X, Meng Q, et al. Alcohol-filled side-hole fiber Sagnac interferometer for temperature measurement [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 193: 182 - 185.
- [4] Nagasaki A, Saitoh K, Koshiba M. Polarization characteristics of photonic crystal fibers selectively filled with metal wires into cladding air holes [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (4): 3799 - 3808.
- [5] Gouveia C, Chesini G, Cordeiro C, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using multimode interference inside a high birefringence fiber loop mirror [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 177: 717 - 723.
- [6] Qian W, Zhao C L, He S, et al. High-sensitivity temperature sensor based on an alcohol-filled photonic crystal fiber loop mirror [J]. *Optics Letters*, 2011, 36 (9): 1548 - 1550.
- [7] Wu C, Fu H Y, Au H Y, et al. High-sensitivity salinity sensor realized with photonic crystal fiber Sagnac interferometer [C]// The 21st International Conference on Optical Fibre Sensors. Ottawa: International Society for Optics and Photonics, 2011: 77531B - 4.
- [8] Roither S, Verhoef A J, Mücke O D, et al. Sagnac interferometric multipass loop amplifier [J]. *Optics Express*, 2012, 20 (22): 25121 - 25129.
- [9] Zhao Y, Song T, Wang Q. Novel pressure sensor using a HiBi photonic crystal fiber FLM and ITS demodulation method [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2012, 54 (4): 915 - 917.
- [10] Yan G, Lyu Y X, Wang Q Y, et al. Routing algorithm based on delay rate in wireless cognitive radio network [J]. *Journal of Networks*, 2014, 9 (4): 948 - 955.
- [11] Huang W H, Geng Y S. Identification method of attack path based on immune intrusion detection [J]. *Journal of Networks*, 2014, 9 (4): 964 - 971.
- [12] Zhao Y, Song T, Wu D, et al. Research on fiber optic temperature sensor using a novel high-birefringent fiber loop mirror with a reflection probe [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 184: 22 - 27.