

# 一种 Sagnac 干涉仪结构的光子晶体光纤温度传感器

伍铁生<sup>1,2</sup> 王 丽<sup>1</sup> 王 哲<sup>1</sup> 刘玉敏<sup>2</sup> 胡署阳<sup>1</sup> 尹丽丹<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>北京工业大学应用数理学院, 北京 100124  
<sup>2</sup>北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

**摘要** 采用 Sagnac 干涉仪结构,设计了一种高双折射光子晶体光纤环境温度传感器。光子晶体光纤温度稳定性好,通过向高双折射光子晶体光纤空气孔填充热光系数高的液体材料——乙醇,从而实现温度传感的目的。采用平面波展开法,分析了高双折射光子晶体光纤的双折射与传输波长和温度的关系。理论分析表明,填充乙醇后,高双折射光子晶体光纤的双折射随着传输波长和温度的增加而增加,且双折射与温度成线性关系。实验中将一段填充乙醇的高双折射光子晶体光纤与 3 dB 耦合器熔接制作成 Sagnac 干涉仪结构的光纤环境,当温度从 45 °C 升至 80 °C 时,光谱仪上观察到凹点  $\lambda$ , 向短波方向漂移了 309.280 nm,温度灵敏度高达 8.837 nm/°C。

**关键词** 传感器;光子晶体光纤;平面波展开法;双折射;光纤温度传感器

**中图分类号** TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1114002

## A Photonic Crystal Fiber Temperature Sensor Based on Sagnac Interferometer Structure

Wu Tiesheng<sup>1,2</sup> Wang Li<sup>1</sup> Wang Zhe<sup>1</sup> Liu Yumin<sup>2</sup> Hu Shuyang<sup>1</sup> Yin Lidan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China  
<sup>2</sup>State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** A highly birefringent photonic crystal fiber loop mirror temperature sensor based on Sagnac interferometer structure is designed. As the photonic crystal fiber has good temperature stability, in order to achieve the temperature sensing, ethanol which has a high thermal coefficient is filled into the air holes of the high birefringence photonic crystal fiber. Using plane wave expansion method, the relationship between birefringence of the highly birefringent photonic crystal fiber and transmission wavelength, and that between birefringence and temperature are analyzed. Theoretical analysis shows that: filled with ethanol, the birefringence of high birefringence photonic crystal fiber increases with the increase of the transmission wavelength and temperature, besides, there is a linear relationship between birefringence and temperature. In the experiment, a piece of high birefringence photonic crystal fiber filled with ethanol is welded with a 3 dB coupler to form a fiber loop mirror. When the temperature rises from 45 °C to 80 °C, the concave point drift of 309.280 nm towards the short wavelength is observed on spectrum analyzer. The sensitivity is as high as 8.837 nm/°C.

**Key words** sensors; photonic crystal fiber; plane wave expansion method; birefringence; fiber temperature sensor

**OCIS codes** 060.2370; 280.6780; 280.4788; 060.5295

## 1 引 言

光子晶体光纤(PCF)是一种带线缺陷的二维光

子晶体,其最典型的特征是在光纤横截面有许多平行于光轴方向的空气孔<sup>[1~4]</sup>。光子晶体光纤结构灵

收稿日期: 2012-06-11; 收到修改稿日期: 2012-07-27

基金项目: 北京市教委基金(Km200910005019)和全国高等学校博士点基金(200800050013)资助课题。

作者简介: 伍铁生(1983—),男,博士研究生,主要从事光纤通信与光纤传感方面的研究。

E-mail: wts1234567890@163.com

导师简介: 王 丽(1958—),女,教授,博士生导师,主要从事激光器器件、光通信与光传感和新型光电材料等方面的研究。

E-mail: lwang.1@bjut.edu.cn

活,可以应用于光通信和光传感等领域。由光子晶体光纤制作的光纤温度传感器,目前主要有光子晶体光纤光栅温度传感器、光子晶体光纤与单模光纤熔接制作的法布里-珀罗(F-P)干涉仪、双芯光子晶体光纤以及填充液体或液晶材料的光子晶体光纤温度传感器<sup>[5~13]</sup>。光纤温度传感器相比传统的热电式传感器,有抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀、灵敏度高、重量轻、体积小、可弯曲、有利于构成传感网络等优点。

光子晶体光纤对温度不敏感。往高双折射光子晶体光纤空气孔填充乙醇,乙醇具有较高的热光系数,当温度变化时,乙醇折射率的变化会引起光子晶体光纤双折射的变化。本文利用这一特性,把填充了乙醇的高双折射光子晶体光纤与 3 dB 耦合器熔接起来,制作乙醇填充的高双折射光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪做温度传感器。

## 2 理论计算

目前,研究光子晶体光纤常用的方法有等效折射率法、光束传播法、平面波展开法、多极法、本地正交函数法、有限元方法和有限差分法等。本文采用的方法是平面波展开法<sup>[14]</sup>。

以 Blaze Photonics 公司生产的 PM-1550-01 型高双折射光子晶体光纤为理论计算模型。其相邻两个小空气孔的间距  $\Lambda$  为 4.4  $\mu\text{m}$ ,小空气孔的直径为 2.2  $\mu\text{m}$ ,大气孔的直径为 4.5  $\mu\text{m}$ 。在数值计算中,考虑到石英材料的色散,其不同波长条件下的折射率由 Sellmeier 方程给出<sup>[15]</sup>:

$$n(\lambda)^2 = 1 + \sum_{i=1}^M \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - B_i^2} \quad (1)$$

乙醇的折射率定义为

$$n = n_0 - \alpha(T - T_0), \quad (2)$$

式中  $n_0$ 、 $n$  分别为温度  $T_0$  和  $T$  时的折射率,这里  $T_0$  取 20  $^\circ\text{C}$ , $T$  为工作温度。温度  $T_0 = 20$   $^\circ\text{C}$  时,乙醇的折射率  $n_0 = 1.36048$ 。乙醇的热光系数  $\alpha = 3.94 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ,石英光纤的热光系数  $\alpha = 8.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,石英光纤的温度系数只有乙醇温度系数的 0.022 倍,因此填充乙醇的高双折射光子晶体光纤,在温度变化不大的情况下(温度变化 100  $^\circ\text{C}$ ),可以不考虑温度对光纤石英成分折射率的影响,只需考虑温度对乙醇折射率的影响。填充乙醇后,由于光纤两个正交方向的有效折射率不一致,高双折射光子晶体光纤仍然具有双折射效应。

### 2.1 波长对双折射的影响

单模光纤中两个模式的传播常数与偏振方向有关的这种现象,称为光纤中的双折射现象。此时两个模式并不简并,存在传播常数差。光纤双折射大小可以用  $B = |n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y|$  来表示,式中,  $n_{\text{eff}}^x$ 、 $n_{\text{eff}}^y$  分别为  $x$  偏振模和  $y$  偏振模的有效折射率。当高双折射光子晶体光纤所处的环境温度、受到的应力等条件改变时,其双折射会发生相应的改变,因此可以用高双折射光子晶体光纤来做温度和应力传感器。应用平面波展开法,在环境温度为 20  $^\circ\text{C}$  的条件下,分析填充乙醇前、后波长对双折射的影响,如图 1 所示。由图 1 可知,填充乙醇前,双折射随着波长的增加而增加;填充乙醇后,光子晶体光纤仍然具有高双折射效应,双折射仍然随着波长的增加而增加;对于相同的传输波长,填充乙醇后双折射降低了,波长越长,双折射降低就越显著。

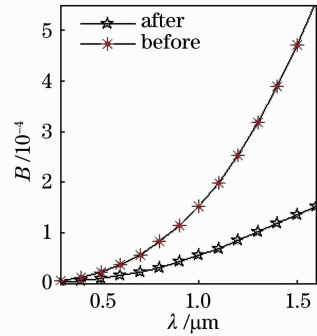


图 1 填充乙醇前后双折射与波长的关系

Fig. 1 Relationship between birefringence and wavelength before and after filling with ethanol

### 2.2 温度对双折射的影响

光子晶体光纤的温度稳定性好,其由纯二氧化硅制造,二氧化硅的热光系数与乙醇的热光系数相差两个数量级。因此,在温度变化不大的情况下(不超过 100  $^\circ\text{C}$ ),填充乙醇的高双折射光子晶体光纤双折射的改变可认为是由于乙醇折射率随温度变化造成的。常压下乙醇的熔点为 -114.3  $^\circ\text{C}$ ,沸点为 78.4  $^\circ\text{C}$ ,数值计算取温度  $T$  的变化范围为 45  $^\circ\text{C} \sim 80$   $^\circ\text{C}$ ,波长分别取 1.50、1.55、1.60  $\mu\text{m}$ ,研究填充乙醇后,温度对双折射的影响,如图 2 所示。由图 2 可知,高双折射光子晶体光纤在填充乙醇后,双折射随着温度的增加而增加,双折射与温度成线性关系;相同温度条件下,传输波长越长,双折射越高。因此,可以通过往高双折射光子晶体光纤空气孔填充乙醇,利用双折射与温度的线性关系,做成 Sagnac 干涉仪,用做低温(介于乙醇熔点和沸点之间)测量

的温度传感器。本文选择的填充液体之所以是乙醇,而不是纯净水,是因为水的热光系数很低,其折射率对温度很不灵敏;而乙醇具有较高的热光系数,无毒且实验室常用。

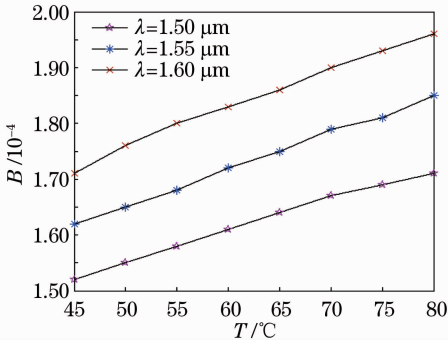


图2 双折射与温度的关系

Fig. 2 Relationship between birefringence and temperature

### 3 传感结构与原理

本文搭建的实验装置如图3所示,由宽带光源(BBS)、3 dB耦合器、填充乙醇的高双折射光子晶体光纤和光谱分析仪(OSA)构成。光源为中心波长为1550 nm的宽带光源,宽带光源发出的光经3 dB耦合器分为两束等强度的光,其中一束沿顺时针方向传播,另外一束沿逆时针方向传播。两束光经过环路的传播,返回耦合器,最后相干输出进入光谱分析仪。

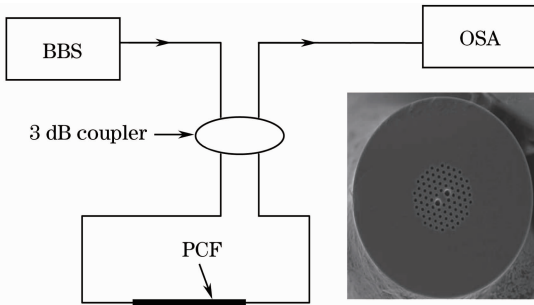


图3 实验原理图

Fig. 3 Schematic of experiment

对于高双折射光子晶体 Sagnac 干涉仪,其传输矩阵( $1 \times 1$  矩阵) $[M]$ 可以写成<sup>[16]</sup>

$$M = \frac{1}{2}(1 - \cos \delta), \quad (3)$$

式中  $\delta$  是返回耦合器中两束光产生的相位差,满足

$$\delta = \frac{2\pi BL}{\lambda}. \quad (4)$$

输出的光谱是周期性光谱,两相邻峰值之间的间距为

$$S = \lambda^2 / (BL), \quad (5)$$

式中  $B$  为高双折射光子晶体光纤的双折射, $L$  为环境中高双折射光子晶体光纤的长度。由(4)式可知,光谱分析仪上观察到的凹点  $\lambda_i$  满足  $\frac{2\pi BL}{\lambda_i} = (2\kappa + 1)\pi$ ,  $\kappa$  为常数。凹点  $\lambda_i$  也可以写成  $\lambda_i = \frac{2BL}{2\kappa + 1}$ , 当环境温度变化时,会引起双折射  $B$ 、 $L$  发生变化,从而引起凹点  $\lambda_i$  的漂移,用微分形式表示,凹点  $\lambda_i$  的漂移满足  $\Delta\lambda_i = \frac{2L\Delta B}{2\kappa + 1} + \frac{2B\Delta L}{2\kappa + 1}$ 。  $\Delta L$  是由于热膨胀引起的,因为石英的热膨胀系数只有  $0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,乙醇的热膨胀系数只有  $1.09 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ,且光子晶体空气孔极小,填充的乙醇只占光子晶体光纤极小的体积,所以在温度变化范围不大的情况下,由热膨胀引起的光子晶体光纤长度变化  $\Delta L$  可以忽略不计,则凹点  $\lambda_i$  的漂移量  $\Delta\lambda_i$  满足  $\Delta\lambda_i = \frac{2L\Delta B}{2\kappa + 1}$ 。在乙醇未沸腾的情况下,乙醇对光子晶体光纤的应力极小,应力对双折射的影响也极小,因此可以忽略受热膨胀产生的应力对双折射的影响,可认为  $\Delta B$  是由乙醇折射率变化引起的。根据平面波展开法所做的理论计算,  $\Delta B$  与温度变化成线性关系,所以凹点漂移量  $\Delta\lambda_i$  是关于温度  $T$  的线性函数。

### 4 实验与结果分析

首先把未填充的一段高双折射光子晶体光纤直接与 3 dB 耦合器熔接起来做成 Sagnac 干涉仪,然后把高双折射光子晶体光纤置于温控箱内,调整 Sagnac 干涉仪的位置,当输入光谱仪的光波峰值功率最大时固定 Sagnac 干涉仪,温控箱加热到  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ ,实验中并未观察到凹点  $\lambda_i$  的漂移,说明该高双折射光子晶体光纤温度稳定性好。为做温度传感,需要往高双折射光子晶体光纤的空气孔填充液体材料。实验中采用如图4所示的装置来填充液体。主要用到注射器、Blaze Photonics 公司生产的 PM-1550-01 型高双折射光子晶体光纤、502 胶水和乙醇。首先把一段高双折射光子晶体光纤两端切平,用蘸着酒精的药棉轻轻擦去污垢,把高双折射光子晶体光纤的一段伸入注射器的针管里面,然后用 502 胶水把针管密封。待 502 胶水干后,把用 502 胶水与高双折射光子晶体光纤粘好的针和针筒连接起来,塞紧。再把光子晶体光纤另外一端伸入装着乙醇的小瓶里面,然后用力往上拉针筒的活塞,这样针筒内部就近似为真空,乙醇在大气压强的作用下,进入高双折射

光子晶体光纤的空气孔中。判断高双折射光子晶体光纤是否填满的方法是,如果不对填充后的高双折射光子晶体光纤端面做加热处理,直接与普通单模光纤熔接,熔接面出现打结现象就说明整段光纤填充满了,否则就是没填充满。

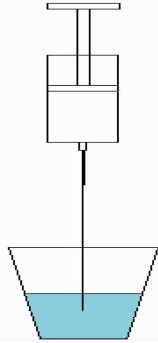


图 4 填充液体原理图

Fig. 4 Schematic of filling liquid

实验中,采用爱立信 FUs995PM 光纤熔接机对光子晶体光纤与普通单模光纤的熔接进行过多次实验。由于光子晶体光纤是特种光纤,光子晶体光纤与普通单模光纤的熔接必须在手动模式下进行。经过多次实验发现,如果光子晶体光纤和普通单模光纤的熔接端面都很平整,用蘸了酒精的药棉轻轻擦拭后,放入光纤熔接机,当熔接机的显示屏显示光子晶体光纤和普通单模光纤对接很准,并且光纤两端面的狭缝刚好不留亮线时,熔接损耗最低。

如果把空气孔充满了乙醇的光子晶体光纤直接与普通单模光纤熔接,会在熔接处产生打结现象。主要是因为光子晶体光纤熔接面附近的空气孔在高温下塌陷,位于塌陷区的液体溢出造成熔接面周围打结。打结造成光路不通。为此,需要在熔接前快速地用酒精灯烤一下光子晶体光纤的熔接端面,使得离端面毫米量级区域内的乙醇蒸发,再快速地放入熔接机与普通单模光纤熔接,如图 5 所示。光子晶体光纤在填充乙醇后,即使其他条件不变,光纤的

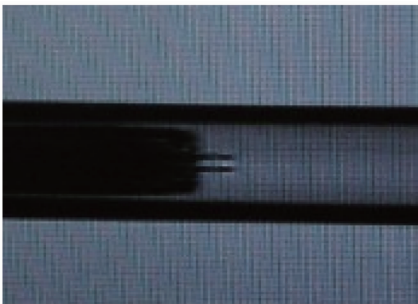


图 5 乙醇填充光子晶体光纤与单模光纤熔接实验

Fig. 5 Welding experiment of photonic crystal fiber filled with ethanol and single mode fiber

损耗也会明显增大。这主要是由于乙醇溶液中的氢氧根离子及其他杂质对光的吸收引起的。

把填充乙醇的高双折射光子晶体光纤与 3 dB 耦合器熔接,做成 Sagnac 干涉仪,如图 3 所示。经测量,干涉仪中填充了乙醇的高双折射光子晶体光纤长度为 25.4 cm。把 Sagnac 干涉仪一端与中心波长为 1550 nm 的宽带光源相连,另外一端与光谱仪相连,把填充了乙醇的高双折射光子晶体光纤那一段置于温控箱内,为了保持 Sagnac 干涉仪的偏振特性,把 Sagnac 干涉仪处于温控箱内的部分用透明胶粘在铁丝网上,Sagnac 干涉仪在温度箱外的部分,通过调整其位置,当光谱仪上观察的光谱峰值功率最大时,用透明胶粘贴在实验平台上,这样就可以保持 Sagnac 干涉仪的偏振特性。温控箱加热升温,记录温度从 45 °C 上升到 80 °C 凹点  $\lambda_i$  随温度的漂移量。温度为 45 °C 时,两相邻凹点的间距为 42.880 nm,升温过程中凹点  $\lambda_i$  向短波方向漂移。图 6 为温度在 58 °C 和 60 °C 时,光谱仪上观察到的两条对应曲线,  $L_2$  是 58 °C 时对应的凹点位置,  $L_1$  是 60 °C 时该凹点对应的位置,凹点漂移了 16.800 nm。该实验具有很好的重复性,前后做了 6 次实验,实验中取其中一个凹点  $\lambda_i$ ,观察和记录该凹点  $\lambda_i$  随温度上升的漂移量,温度每上升 1 °C 记录一次数据,为减小实验误差,使温度缓慢上升,且温度达稳定状态时记录数据,对 6 次实验数据取平均值,得到凹点漂移量与温度的关系,如图 7 所示。由图 7 可知,凹点  $\lambda_i$  漂移与温度具有非常理想的线性关系(与理论分析一致),并且凹点  $\lambda_i$  漂移对温度非常敏感,温度从 45 °C 上升到 80 °C,凹点  $\lambda_i$  漂移量为 309.280 nm,灵敏度高达 8.837 nm/°C。实验最高温度 80 °C,超过乙醇沸点 78.4 °C,在乙醇沸腾的情况下,乙醇对光子晶体光纤的应力比不沸腾情况下大很多,然而在乙醇沸腾情况下,凹点漂移并无显著突变。这说明填充乙醇的高双折射光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪,在乙醇未沸腾的情况下,热膨

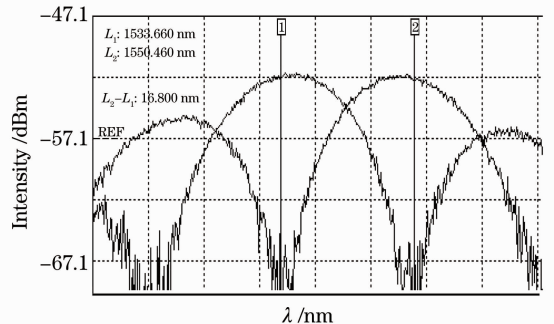


图 6 温度在 58 °C 时和 60 °C 时的光谱图

Fig. 6 Spectra with the temperature at 58 °C and 60 °C

胀产生的应力对双折射的影响可以忽略不计。由于其温度灵敏度高,稳定性好,因此填充乙醇的高双折射光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪很适合在  $-114.3\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 78.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  的范围内做温度传感。

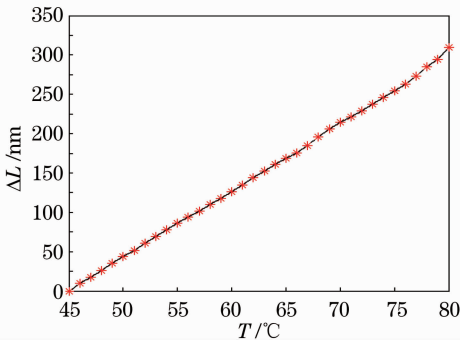


图7 凹点漂移与温度的关系

Fig. 7 Relationship between concave point drift and temperature

## 5 结 论

设计了一种填充乙醇的高双折射光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪,可以用作温度传感器。数值计算表明填充乙醇的高双折射光子晶体光纤,其双折射与温度成线性关系。实验研究了液体填充的方法以及光子晶体光纤与普通单模光纤的熔接技巧,可以通过大气压强的作用,使乙醇吸进高双折射光子晶体光纤的空气孔中。填充液体的光子晶体光纤,需要在熔接前做加热处理。乙醇填充的高双折射光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪,凹点  $\lambda_i$  随温度做线性漂移,受热膨胀产生的应力对凹点  $\lambda_i$  漂移的贡献可以忽略不计,其对温度的灵敏度高达  $8.837\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。由于其体积小、稳定性好、对温度的灵敏度高,因此很适合做低温条件下的光纤温度传感器。

## 参 考 文 献

- 1 Meng Dan, Hou Liantian, Wang Wei. Analysis on the properties of all-solid photonic crystal fiber with micro-structured core[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1205003  
孟丹,侯蓝田,王伟.混合型导光的全固态光子晶体光纤的特性分析[J].中国激光,2011, **38**(12): 1205003
- 2 Li Qianghua, Gao Shecheng, Zhang Jian. Study on the nonlinear parameter of photonic crystal fiber by empirical relations[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0105002  
励强华,高社成,张剑.用等效经验关系法研究光子晶体光纤的非线性[J].中国激光,2011, **38**(1): 0105002
- 3 Wang Dan, Zheng Yi. Numerical simulation and analysis of double cladding photonic crystal fiber with flattened dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806010  
王丹,郑义.双包层色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J].光学学报,2011, **31**(8): 0806010

- 4 Cui Liang, Li Xiaoying, Zhao Ningbo. Dispersion property measurement of photonic crystal fiber by using spontaneous four wave mixing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0119002  
崔亮,李小英,赵宁波.利用自发四波混频测量光子晶体光纤色散[J].光学学报,2012, **32**(1): 0119002
- 5 C. K. Chen, A. Laronche, G. Bouwmans *et al.*. Sensitivity of photonic crystal fiber modes to temperature, strain and external refractive index[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(13): 9645~9653
- 6 Yang Xiufeng, Zhang Chunyu, Tong Zhengrong *et al.*. Experimental research of temperature sensing properties of a novel fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405005  
杨秀峰,张春雨,童峥嵘等.一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究[J].中国激光,2011, **38**(4): 0405005
- 7 C. Wu, H. Y. Fu, K. K. Qureshi *et al.*. High-pressure and high-temperature characteristics of a Fabry-Perot interferometer based on photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(3): 412~414
- 8 Song Xiaoli, Bai Yukun, Ren Guangjun *et al.*. Analysis of temperature sensing characteristics of a long-period grating formed in a liquid-filled photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1205007  
宋晓利,白育堃,任广军等.液体填充光子晶体光纤中长周期光栅的温度传感特性分析[J].中国激光,2011, **38**(12): 1205007
- 9 H. K. Gahir, D. Khanna. Design and development of a temperature-compensated fiber optic polarimetric pressure sensor based on photonic crystal fiber at 1550 nm[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(8): 1184~1189
- 10 H. Y. Fu, H. Y. Tam, L. Y. Shao. Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(15): 2835~2839
- 11 Qian Xiangzhong. Effect of temperature on transmission properties in photonic crystal fibers infiltrated with liquid crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 988~991  
钱祥忠.温度对液晶填充光子晶体光纤传输特性的影响[J].光学学报,2008, **28**(5): 988~991
- 12 Zu Peng, Xiang Wanghua, Jin Yongxing. Fabrication of temperature-insensitive twist sensor using low birefringent photonic crystal fiber based Sagnac interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1433~1437  
祖鹏,向望华,金永兴.基于低双折射光子晶体光纤 Sagnac 干涉仪的超低温度系数扭曲传感器[J].光子学报,2011, **40**(9): 1433~1437
- 13 Wang Mingli, Zhao Yuanyuan, Li Shuguang *et al.*. Research on photonic crystal fiber characteristics with high birefringence[J]. *J. Yanshan University*, 2008, **32**(1): 41~48  
王明利,赵源源,李曙光等.高双折射光子晶体光纤的特性研究[J].燕山大学学报,2008, **32**(1): 41~48
- 14 Hu Yongjin, Wang Jingyuan, Wen Ke. Temperature sensor based on birefringent properties of photonic crystal fiber[J]. *J. Military Communications Technology*, 2008, **29**(2): 35~37  
胡永金,汪井源,文科.高双折射光子晶体光纤用于温度传感的研究[J].军事通信技术,2008, **29**(2): 35~37
- 15 Li Xuejin, Yu Yongqin, Hong Xueming *et al.*. Analysis on temperature sensing properties of photonic crystal fiber based on liquid filling[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1140~1144  
李学金,于永芹,洪学明等.基于液体填充的光子晶体光纤温度传感特性分析[J].中国激光,2009, **36**(5): 1140~1144
- 16 H. Y. Fu, A. C. L. Wong, P. A. Childs *et al.*. Multiplexing of polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometric sensors[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(21): 18501~18512

栏目编辑:何卓铭