

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-07

填充液体与方式对光子晶体光纤温敏特性的影响

陈鹤鸣^{1*}, 吴唯冉², 汪静丽¹

(1. 南京邮电大学 光电工程学院, 江苏 南京 210023;
2. 南京中新赛克科技有限责任公司, 江苏 南京 211100)

摘要:通过改变温敏液体种类和液体填充方式,研究了基于混合晶格的高双折射光子晶体光纤(PCF)的温敏特性。使用基于有限元法的 Comsol 软件仿真分析了光纤双折射特性随温度的变化关系。研究表明,选择不同的温敏液体和采用不同的液体填充方式都会对 PCF 的温敏特性产生不同程度的影响。若使用乙醇液体进行纤芯区域圆形空气孔填充,当空气孔间距 Λ 为 $1\ \mu\text{m}$,圆形空气孔直径 D 为 $0.96\ \mu\text{m}$,矩形空气孔长宽比 a/b 为 4 时,工作在 $1\ 550\ \text{nm}$ 的 PCF 的温度灵敏度可达 $2.5 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。与相关的 PCF 结构相比,本文提出的 PCF 结构和新的温敏液体填充方式可以更好地提升 PCF 的温度灵敏度,在 PCF 温度传感领域很有应用前景。

关键词:光子晶体光纤;混合晶格;填充方式;温敏液体;温度传感

中图分类号:TN253 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152313.0000

Effect of different liquid and filling modes on thermo sensitive characteristics of photonic crystal fibers

CHEN He-ming^{1*}, WU Wei-ran², WANG Jing-li¹

(1. College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Communications, Nanjing 210023, China;
2. Sinovatlo Technology, Nanjing 211100, China)
* Corresponding author, E-mail: chhm@njupt.edu.cn

Abstract: By using different methods to fill different types of thermo sensitive liquids, the thermo sensitive characteristics of a high birefringent Photonic Crystal Fiber (PCF) based on hybrid lattices was researched. The relationship of birefringence properties and temperature was investigated using Comsol software in finite element method. The numerical results show that the thermo sensitive characteristics of the PCF are influenced by liquid types and filling methods. When the ethanol is filled in the circular air holes in a core area, the sensitivity of the PCF worked at an excitation wavelength of $1\ 550\ \text{nm}$ is up to $2.5 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ with pitch of holes in $1\ \mu\text{m}$, the diameter of a circular air hole in $0.96\ \mu\text{m}$ and the aspect ratio of rectangular air holes in 4. As compared with that of corresponding PCF structures, the fiber proposed and liquid filling method have higher thermo sensitivity and broader application prospects for high sensitivity temperature sensors.

Key words: photonic crystal fiber; hybrid lattice; filling mode; thermo sensitive liquid; temperature sensing

收稿日期:2015-06-15;修订日期:2015-07-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61077084)

1 引言

温度是一种最基本的环境参数,其传感器技术被广泛应用于农业、工业等诸多领域^[1]。灵敏度是温度传感技术的研究重点之一^[2]。基于光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)的温度传感器依靠其电绝缘、耐高压、耐腐蚀的特点近年来得到了广泛研究。2013年,伍铁生提出了 Sagnac 干涉仪结构 PCF 温度传感器^[3],Hao Sun 等人提出了混合干涉仪结构的 PCF 温度传感器^[4],Ran Wang 等人提出了填充混合液体的反射型 PCF 温度传感器^[5]。PCF 是 PCF 温度传感器的重要组成部分,其性能决定了温度传感器的灵敏度。PCF 的温敏特性可以通过改变填充的温敏液体的种类以及填充方式来改善^[6-7]。

Qian 等人使用乙醇填充 PCF 芯区大孔,并基于此设计了一种新型温度传感器,仿真表明该传感器的温度灵敏度约为 $1.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ^[8]。Erick Reyes-Vera 等人设计了一种填充钢的 PCF,其灵敏度达到 $7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ^[9]。Wang 等人设计了一种高双折射 PCF,并将乙醇作为温敏液体,分别分析了填充全部空气孔和填充纤芯区大孔时光纤的温敏特性,结果表明工作波长 $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ 时, η 分别为 $7 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 和 $7.25 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ ^[10]。文献[8-10]实现了 PCF 特性随温度的改变,但其灵敏度不高,这会增大实际温度传感时的探测难度。

参考文献[11]提出了一种新型混合晶格结构的 PCF,并利用基于有限元法的 Comsol 软件研究了在空气孔填充温敏液体时该 PCF 的双折射特性随温度的变化关系。本文在此基础上对不同温敏液体及不同填充方式 PCF 的温度灵敏度对 PCF 的温敏特性进行分析。结果表明,温敏液体种类和填充方式的改变都会对 PCF 的温度灵敏度产生较大影响。为了提高 PCF 的温度灵敏度,对 PCF 结构参数、填充液体及填充方式进行了优化。与已有研究成果相比,本文提出的填充液体和填充方式使得 PCF 的温敏灵敏度获得了较大的提升,基于此 PCF 的温度传感器在对温度变化

的实时性和准确性要求较高的领域中有一定的应用价值。

2 高灵敏 PCF 结构与理论基础

文献[11]中提出的新型混合晶格的 PCF 光纤结构如图 1 所示。整个光纤以石英为背景材料,PCF 截面中同时使用了矩形和圆形空气孔,两种不同形状空气孔的间隔排列可诱导纤芯和包层出现全局双折射。图 1 中, Λ 为相邻两个空气孔中心之间的距离, $\Delta = \sqrt{3}\Lambda/2$ 为 y 方向上相邻空气孔中心之间的距离, a 和 b 分别为矩形空气孔的长和宽, D 为圆形空气孔的直径。

模式双折射大小 B 可表示为:

$$B = |n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y|, \quad (1)$$

其中: n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别表示两个正交偏振模的有效折射率。公式(1)表明模式双折射的大小取决于两个正交偏振模的有效折射率之差,而温度的改变导致折射率变化,因此,温度对 PCF 的影响最终使得双折射 B 发生改变。PCF 的温敏特性可根据温度变化时模式双折射的变化量与温度变化量的比值 $\eta = \Delta\beta/\Delta T$ 来分析。

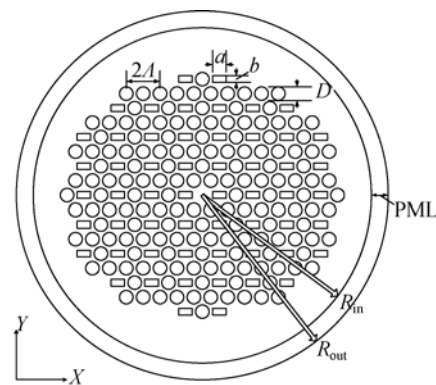


图 1 PCF 截面结构^[11]

Fig. 1 Cross section of PCF^[11]

截面结构参数发生改变时,PCF 的温敏特性会发生变化^[11]。此外,填充液体和填充方式的不同也会对光纤的温敏特性造成影响。温度对光纤本身折射率的影响通常是可以忽略的^[11],通过在

PCF 的空气孔中填充温敏液体可以提高光纤整体的温度灵敏度。对于注入温敏液体的部分空气孔来说,其折射率随温度的改变会发生明显的变化;而没有填充温敏液体的部分空气孔则对温度变化不敏感,因此采用不同的温敏液体填充方式使得不同位置的空气孔折射率发生变化,PCF 中两个正交偏振模的有效折射率之差也随之改变,进而影响 η 的大小。

不同的温敏液体具有不同的温敏系数,温敏系数决定了填充温敏液体后的空气孔折射率随温度变化的幅度,从而决定了 PCF 中两个正交偏振模的有效折射率随温度变化的幅度,最终影响 η 的大小^[6]。此外,填充液体的折射率也会影响 η ,这是因为当液体的折射率随温度在石英的折射率附近改变时,存在一点 T_0 使得光纤两个正交方向的偏振模的有效折射率之差最小,这将导致光纤截面结构的各向异性减小,从而使得在 T_0 附近,双折射 B 与温度 T 的变化关系不再接近线性。

3 PCF 温敏特性的仿真与分析

3.1 填充方式对温敏特性的影响

不同的液体填充方式会改变 PCF 整体的有效折射率并导致 PCF 温敏特性的改变,本文使用乙醇液体对所提出的 PCF 结构进行填充,选择的 4 种液体填充方式分别如图 2(a)~(d) 所示,其中实心孔表示空气孔中填充了乙醇液体。在工作波长、PCF 结构参数和环境温度变化范围均相同的条件下做出图 2 中各方式对应的双折射随温度的变化曲线进行比较分析。

这里工作波长 $\lambda = 1\ 550\ \text{nm}$; PCF 的结构参数为:相邻空气孔间距 $\Lambda = 1\ \mu\text{m}$,圆形空气孔直径 $D = 0.96\ \mu\text{m}$,矩形空气孔的长 $a = 1\ \mu\text{m}$,宽 $b = 0.1\ \mu\text{m}$;环境温度为 $-40 \sim 80\ ^\circ\text{C}$ 。几种填充方式下模式双折射随温度的变化趋势如图 3 所示。

在所有空气孔中填充温敏液体的方式记作填充方式 I,如图 2(a) 所示。使用这种填充方式时,PCF 的双折射随温度变化曲线对应图 3 中的曲线 I。可以看出,双折射随温度的变化近似为线性变化。在 $-40 \sim 80\ ^\circ\text{C}$ 的温度内,PCF 的双折

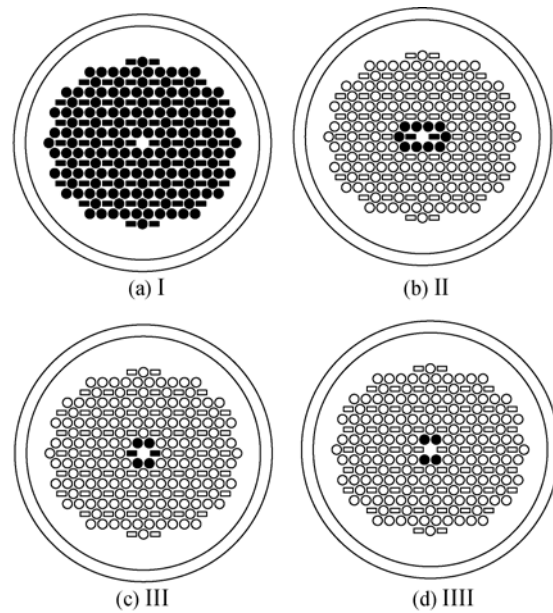


图 2 液体填充方式

Fig. 2 Liquid filling methods

射由 4.86×10^{-4} 增加到 2.107×10^{-3} ,其温度灵敏度 $\eta \approx 1.35 \times 10^{-5}$ 。

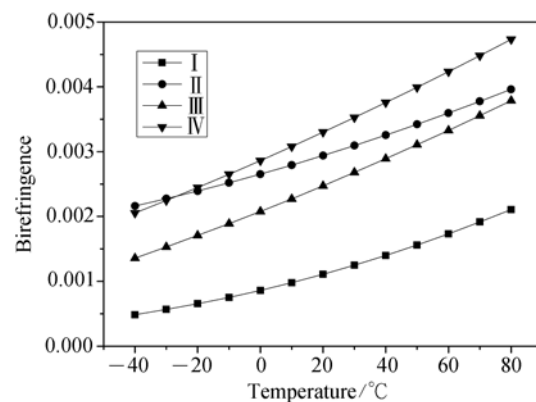


图 3 不同填充方式时双折射随温度的变化曲线

Fig. 3 Mode birefringence versus temperature with different liquid filling methods

在纤芯周围最近的一层圆形空气孔以及纤芯两侧的两个矩形空气孔中填充温敏液体的方式记作填充方式 II,如图 2(b) 所示。使用这种方式时,PCF 的双折射随温度变化曲线对应图 3 中的曲线 II,其双折射随温度的变化可同样近似为线性变化。在 $-40 \sim 80\ ^\circ\text{C}$ 的温度内,PCF 的双折射由 2.162×10^{-3} 增加到 3.963×10^{-3} , $\eta \approx 1.50 \times 10^{-5}$ 。

在纤芯周围的 4 个圆形空气孔和两个矩形空

气孔中填充温敏液体的填充方式记为填充方式Ⅲ,如图 2(c)所示。PCF 的双折射随温度变化曲线对应图 3 中的曲线Ⅲ,其曲线变化近似为一阶线性函数。在 $-40 \sim 80$ °C 的温度内,PCF 的双折射由 1.357×10^{-3} 增加到 3.788×10^{-3} , $\eta \approx 2.03 \times 10^{-5}$ 。

在纤芯上下的 4 个圆形空气孔中填充温敏液体的填充方式记为填充方式Ⅳ,如图 2(d)所示。PCF 的双折射随温度变化曲线对应图 3 中的曲线Ⅳ,其曲线变化近似为一阶线性函数。在 $-40 \sim 80$ °C 的温度内,PCF 的双折射由 4.959×10^{-3} 增加到 7.449×10^{-3} , $\eta \approx 2.08 \times 10^{-5}$ 。

为了更加直观地将 4 种填充方式下 PCF 的温敏特性进行比较,将不同填充方式时的温度变

化范围、PCF 模式双折射变化范围以及温度灵敏度汇总于表 1。

上述 4 种方式中有 3 种都考虑在纤芯区域的空气孔中注入乙醇,由局部引入非对称性,因此这几种填充方式所获得的双折射值比较接近。其中填充方式Ⅳ,即在纤芯上下的 4 个圆形空气孔中填充温敏液体时,PCF 产生的双折射略高于其他两种,这说明了此种方式可以有效地维持填充液体前两个正交偏振模式的差异。在所有空气孔中填充温敏液体的填充方式Ⅰ所产生的双折射最低,因为乙醇溶液的折射率大于空气,当所有空气孔都被灌注了乙醇后,相当于降低了纤芯与包层的折射率之差,从而减小了 PCF 的模式双折射。

表 1 不同液体填充方式下 PCF 的温敏特性

Tab.1 Thermo sensitive characteristics of PCF with different liquid filling methods

填充液体	温度近似线性变化范围/°C	双折射变化范围	温度灵敏度 $\eta/10^{-5}$
填充方式Ⅰ	$-40 \sim 78.4$	$4.86 \times 10^{-4} \sim 2.107 \times 10^{-3}$	1.35
填充方式Ⅱ	$-40 \sim 78.4$	$2.162 \times 10^{-3} \sim 3.963 \times 10^{-3}$	1.50
填充方式Ⅲ	$-40 \sim 78.4$	$1.357 \times 10^{-3} \sim 3.788 \times 10^{-3}$	2.03
填充方式Ⅳ	$-40 \sim 78.4$	$4.959 \times 10^{-3} \sim 7.449 \times 10^{-3}$	2.08

表 2 填充不同温敏液体时光纤的温敏特性

Tab.2 Thermo sensitive characteristics of PCF with different filling liquids

填充液体	温度近似线性变化范围/°C	双折射变化范围	温度灵敏度 $\eta/10^{-5}$
乙醇(Alcohol)	$-40 \sim 78.4$	$4.96 \times 10^{-3} \sim 7.45 \times 10^{-3}$	2.075
甲醇(Methanol)	$-40 \sim 60$	$6.54 \times 10^{-3} \sim 9.0 \times 10^{-3}$	2.157
甲苯(Toluene)	—	—	—
甘油(Glycerol)	$20 \sim 120$	$2.72 \times 10^{-3} \sim 2.96 \times 10^{-3}$	1.823

3.2 填充液体对温敏特性的影响

选择表 2 中列举的 4 种温敏液体采用填充方式Ⅳ分别对提出的 PCF 结构进行填充,并对其温敏特性进行了仿真分析。当入射波长 $\lambda = 1550$ nm,矩形空气孔长 $a = 1 \mu\text{m}$,宽 $b = 0.1 \mu\text{m}$,圆形空气孔直径 $D = 0.96 \mu\text{m}$,相邻空气孔间距 $\Lambda = 1 \mu\text{m}$ 时,上述温敏液体对应的双折射随温度变化的曲线如图 4(a)~(d)所示。

为了更加直观地将 4 种液体填充时 PCF 的温敏特性进行比较,将不同填充液体时的温度变化范围、PCF 模式双折射变化范围以及温度灵敏

度汇总于表 2。

由图 4(a)~(d)可以看出,采用乙醇进行填充时,光纤模式双折射在 $-40 \sim 78$ °C 基本呈线性变化, $\eta = 2.075 \times 10^{-5}$;采用甲醇进行填充时,光纤模式双折射在 $-40 \sim 60$ °C 也呈线性变化,此时 $\eta \approx 2.157 \times 10^{-5}$,略高于乙醇;采用甲苯进行填充时图线呈非线性,这是由于甲苯的折射率在 $-40 \sim 80$ °C 中某一温度 T_0 时的折射率为 1.45,接近石英的折射率,这会导致光纤截面结构的各向异性减小,从而使得 T_0 附近的双折射与温度的变化关系不再是线性的。这也说明只有在温度变化范围内选取折射率小于或大于 1.45 的液体作为填

充物,才能通过双折射的变化反映出温度的变化;填充甘油时 PCF 的模式双折射整体较低, $\eta \approx 1.823 \times 10^{-6}$, 比乙醇和甲醇低一个数量级。综上,乙醇和甲醇填充的 PCF 具有较高的模式双折射及温度敏感度, 但将填充温敏液体的 PCF 应用于

传感时还要考虑液体的熔沸点^[11], 因为这可能影响传感器的测量范围。由于乙醇的熔点低于甲醇且沸点高于甲醇, 因此在温度敏感度相差无几的情况下, 乙醇依然是温敏液体的最佳选择。

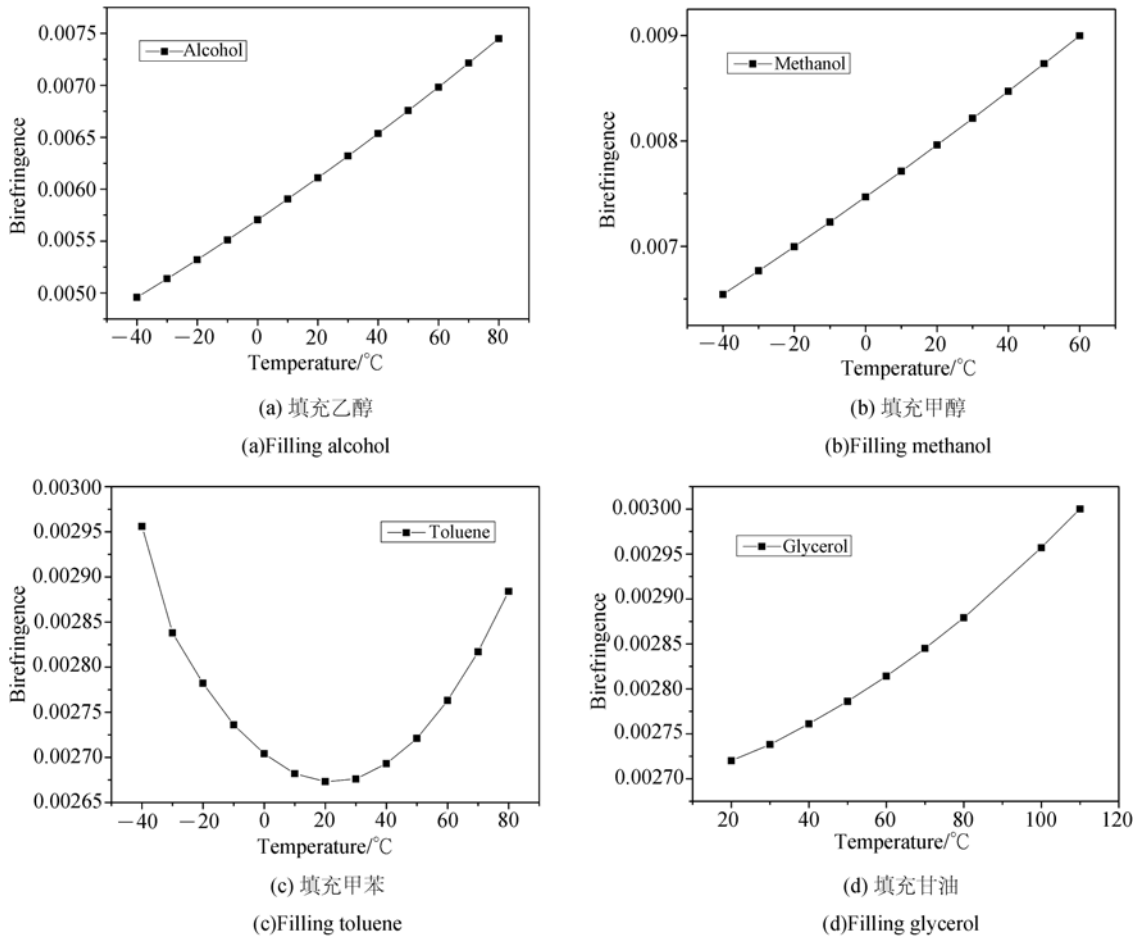


图 4 填充不同溶液时双折射随温度的变化曲线

Fig. 4 Mode birefringence versus temperature with different filling liquids

4 结 论

本文在混合晶格光子晶体光纤结构的基础上,使用基于有限元法的 Comsol 软件对填充不同温敏液体以及采用不同填充方式时 PCF 的温敏特性进行了数值仿真与分析。仿真结果表明,不同的温敏液体填充方式会对 PCF 的温敏特性产生不同程度的影响,采用纤芯区圆形空气孔的液体填充方式时,PCF 将获得较高的温度灵敏度;选

择不同的填充液体也会影响 PCF 的温敏特性,甲醇和乙醇作为填充液体时 PCF 可获得较高的温度灵敏度。当 PCF 结构参数一定,并采用纤芯区圆形空气孔的填充方式填充乙醇或者甲醇液体时,工作在 1 550 nm 的光子晶体光纤的双折射变化量与温度变化量的比值可达 $2.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。与文献[8-10]相比,本文提出的新型 PCF 结构和温敏液体填充方式可以更好地提升光子晶体光纤的温度灵敏度,因此在 PCF 温度传感等领域具有广泛的应用前景。

参考文献:

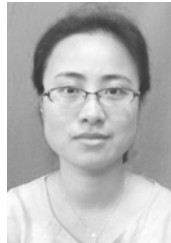
- [1] 孟光耀,杨远洪. 光纤 Sagnac 温度传感器[J]. 光学技术, 2006,31(6): 925-927.
MENG G W, YANG Y H. Sagnac fiber optic sensor for temperature measurement[J]. *Optic Technique*, 2006, 31(6): 925-927. (in Chinese)
- [2] 郑宏军,黎昕,杨恒新. 两种典型的光纤传感器研究现状与发展趋势[J]. 传感技术学报, 2001, 14(4): 281-284.
ZHENG H J, LI X, YANG H X. The studying situations and development direction of fiber-optic sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2001, 14(4): 281-284. (in Chinese)
- [3] 伍铁生,王丽,王哲,等. 一种 Sagnac 干涉仪结构的光子晶体光纤温度传感器[J]. 中国激光, 2013, 39(11): 212-216.
WU T SH, WANG L, WANG ZH, *et al.*. A photonic crystal fiber temperature sensor based on sagnac interferometer structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 39(11): 212-216. (in Chinese)
- [4] SUN H, ZHANG J, RONG Q, *et al.*. A hybrid fiber interferometer for simultaneous refractive index and temperature measurements based on Fabry-Perot/Michelson interference[J]. *Sensors Journal, IEEE*, 2013, 13(5): 2039-2044.
- [5] WANG R, YAO J, MIAO Y, *et al.*. A reflective photonic crystal fiber temperature sensor probe based on infiltration with liquid mixtures[J]. *Sensors*, 2013, 13(6): 7916-7925.
- [6] 王若琪,姚建铨,周睿,等. 填充混合液体的光子晶体光纤温度传感研究[J]. 光电子·激光, 2011, 22(11): 1609-1612.
WANG R Q, YAO J Q, ZHOU R, *et al.*. Research of photonic crystal fiber temperature sensor with mixture liquid filling[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(11): 1609-1612. (in Chinese)
- [7] 冯小刚,施伟华,谭经文. 填充温敏液体的带隙型光纤温度传感特性研究[J]. 光通信研究, 2013(4): 37-39.
FENG X G, SHI W H, TAN J W. Temperature sensing characteristics of PBG fibers with filling temperature sensitive liquid [J]. *Study of Optical Communication*, 2013(4): 37-39. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] REYES-VERA E, CHESINI G, CORDEIRO C M, *et al.*. Large temperature sensitivity of birefringent side-hole photonic crystal fiber filled with indium [C]. *Workshop on Specialty Optical Fibers and Their Applications, Optical Society of America*, 2013: W3, 16.
- [10] WANG L, WU T, WANG Z, *et al.*. Analyses of birefringence photonic crystal fiber with liquid for temperature sensor[C]. *Nano-Bio Sensing, Imaging and Spectroscopy, International Society for Optics and Photonics*, 2013: 88790K-88790K-7.
- [11] 吴唯舟,陈鹤鸣. 一种高灵敏光子晶体光纤温敏特性的研究[J]. 光通信研究, 2015, 189(3): 44-46, 70.
WU W R, CHEN H M. Research on the thermo sensitive characteristics of a PCF with high sensitivity [J]. *Study of Optical Communications*, 2015, 189(3): 44-46, 70. (in Chinese)
- [12] KUBOTA H, KAWANISHI S, KOYANGI S, *et al.*. Absolutely single polarization photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(1): 182-184.
- [13] MOUTZOURIS K, PAPAMICHAEL M, BETSIS S C, *et al.*. Refractive, dispersive and thermo-optic properties of twelve organic solvents in the visible and near-infrared[J]. *Applied Physics B*, 2013, 116(3): 617-622.
- [14] KEDENBURG S, VIEWEG M, GISSIBL T, *et al.*. Linear refractive index and absorption measurements of nonlinear optical liquids in the visible and near-infrared spectral region[J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(11): 1588-1611.
- [15] RHEIMS J, KOSER J, WRIENT T. Refractive-index measurements in the near-IR using an Abbe refractometer[J]. *Measurement Science and Technology*, 1997, 8(6): 601.
- [16] WU T, WANG L, WANG Z, *et al.*. Temperature characteristics of high birefringence photonic crystal fiber filled with liquid [C]. *SPIE/OSA/IEEE Asia Communications and Photonics, International Society*

for Optics and Photonics, 2011; 831126-831126-5.

作者简介:



陈鹤鸣(1958-),男,江苏苏州人,学士,教授,博士生导师,1982年于南京邮电学院获得学士学位,现为南京邮电大学贝尔英才学院院长,主要从事光通信与光波技术方面的研究。E-mail: chhm@njupt.edu.cn



汪静丽(1980-),女,江苏苏州人,讲师,2003年,2006年于南京邮电大学分别获得学士、硕士学位,2011年于天津大学获得博士学位,主要从事太赫兹波导、光子晶体光纤传感等方面的研究。E-mail: jlwang@njupt.edu.cn



吴唯冉(1989-),女,江苏徐州人,硕士,2012年,2015年于南京邮电大学分别获得学士、硕士学位,主要从事网络安全软件测试的工作。E-mail: calla1025@163.com