

文章编号: 1001-3806(2012)02-0204-04

## 光子带隙型光子晶体光纤温度传感特性分析

张敏, 刘敏\*, 孙世红, 马玲芳, 贺冯良  
(重庆大学通信工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 为了提高光子带隙型光子晶体光纤的温度灵敏度, 提出了在纤芯环上并入高折射率液体圆柱的新结构, 并利用全矢量有限元法对提出的结构进行了仿真, 得到了温度对光纤有效折射率、纤芯能量和有效模面积等传输特性的影响。结果表明, 随着温度的升高, 光纤的有效折射率和有效模面积会减小, 纤芯能量会增加, 且零群速率色散点向短波长方向移动, 尤其在短波长条件下光纤传输特性随温度变化趋势更加明显。该研究提高了光子带隙型光子晶体光纤传输特性的温度灵敏度, 使其更加适合于温度传感方面的应用。

**关键词:** 光纤光学; 光子带隙型光子晶体光纤; 全矢量有限元法; 温度传感; 高折射率液体圆柱

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.02.015

### Analysis of temperature sensing characteristics of photonic bandgap photonic crystal fiber

ZHANG Min, LIU Min, SUN Shi-hong, MA Ling-fang, HE Feng-liang  
(College of Communications Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In order to improve the temperature sensitivity of photonic bandgap fiber, a new structure was proposed merging high refractive index liquid cylinders into the surround of the fiber core. By means of full-vector finite element method, the influence of temperature on the effective refractive index, core energy, effective mode area was obtained. The numerical results show that when the temperature increases, the effective refractive index and the effective mode area decrease, the core energy increases, and the zero dispersion wavelength moves towards longer wavelength. These changes are quite significant when the wavelength is short. The proposed structure improves the temperature sensitivity of the transmission characteristics, which makes photonic bandgap photonic crystal fibers more suitable for temperature sensing applications.

**Key words:** fiber optics; photonic bandgap photonic crystal fibers; full-vector finite element method; temperature sensing; high refractive index liquid cylinder

### 引言

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 是由充满空气孔的石英材料形成的周期性结构, 纤芯是通过空气孔遭到破坏或者缺失而形成的缺陷, 光能沿着光纤在晶体结构的缺陷中传输<sup>[1]</sup>。与传统光纤相比, 它具有许多无可比拟的优良特性, 因此被广泛应用于各个领域, 其中一个重要的应用就是光纤传感器。由于光子晶体光纤中可填充气体或液体来增加光与气体或液体的作用长度, 且光子晶体光纤的结构参量可根据需要自由设计, 这些重要特性决定了其在光纤传感领

域的重要应用价值和开发潜力<sup>[2-5]</sup>。

在温度传感特性方面, 由于常规光子晶体光纤的温度灵敏度小于传统光纤的温度灵敏度, 因此, 可通过填充液体来提高光子晶体光纤的温度灵敏度。参考文献 [6] ~ 参考文献 [9] 中研究了在双芯光子晶体光纤空气孔中填充高折射率液体来提高其耦合特性的温度灵敏度, 研究结果表明, 填充高折射率液体对光纤的温度传感特性有很大提高。目前通过填充液体来提高温度灵敏度的研究主要是针对双芯和实芯光子晶体光纤, 而对于光子带隙型光子晶体光纤 (photonic bandgap PCF, PBG-PCF) 的研究还很少。

作者首先提出了在 7 孔 PBG-PCF 的纤芯环上并入高折射率液体圆柱来提高其温度传感特性的新结构, 然后利用全矢量有限元法, 对并入液体圆柱前后的 7 孔 PBG-PCF 结构进行了仿真, 给出了在不同的波长下, 光纤纤芯中基模的有效折射率、有效模面积、纤芯能量和光纤群速度色散随温度变化的分布曲线图, 并

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目 (CDJXS 1116000)

作者简介: 张敏 (1987-), 女, 硕士研究生, 主要从事光子晶体光纤领域的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: liumin@cqu.edu.cn

收稿日期: 2011-06-15; 收到修改稿日期: 2011-06-29

分析了温度对光纤的传输特性产生影响的原因。

### 1 模型建立

在现实的光纤拉制过程中直接向纤芯环中填充液体很难实现,参考文献[10]中提到在 PBG-PCF 的纤芯环中并入电解质圆柱来减小光纤损耗,本文中采用类似的圆柱结构,但向其中填入折射率随温度变化的液体。分别在纤芯环上对称地并入 6 个和 12 个液体圆柱并进行仿真,结果表明,在并入 6 个圆柱时光纤的传输特性更好。因此,本文中提出在 PBG-PCF 纤芯环上并入 6 个高折射率液体圆柱,其仿真截面图如图 1a 所示,图 1b 为实际光纤拉制过程中的截面图。高折射率液体的折射率会随着温度的变化而变化,从而对纤芯环的结构参量产生影响,提高其温度传感特性。

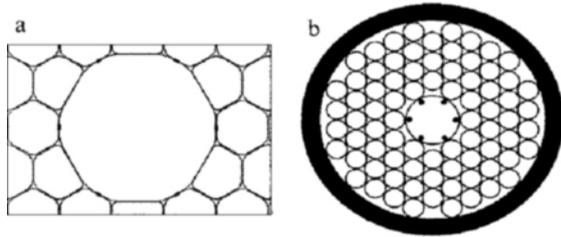


Fig. 1 Cross section of PBG-PCF

a—incorporates liquid cylinders b—in the stack-and-draw process

在光纤建模时,设定背景材料为纯石英,其折射率为 1.45,空气的折射率设为 1,包层采用三角形排列的圆化六边形结构,纤芯是去掉中心 7 个空气孔而成,其结构参量图如图 2a 所示:  $d/\Lambda = 0.98$ ,  $d_c/\Lambda = 0.44$ ,  $d_p/\Lambda = 0.2$ ,  $r_c/\Lambda = 0.6$ ,  $\Lambda = 4.7\mu\text{m}$ ,  $t_r/(\Lambda - d) = 0.5$ , 其中  $d$  为包层空气孔直径,  $\Lambda$  为相邻气孔的间距,  $d_c$  为六边形的曲化直径,  $d_p$  为纤芯周围五边形的两个角的曲化直径,  $r_c$  为中心孔的角的曲化半径,  $t_r$  为包围纤芯的石英环的实际厚度。当通过调节包围纤芯空气孔的管壁厚度来抑制表面模从而降低 PBG-PCF 的损耗时,最佳纤芯环厚度为包层中两气孔间石英支柱厚度的一半<sup>[11-12]</sup>,所以本文中规定纤芯环厚度  $t_r$  是包层中石英支柱厚度的一半。

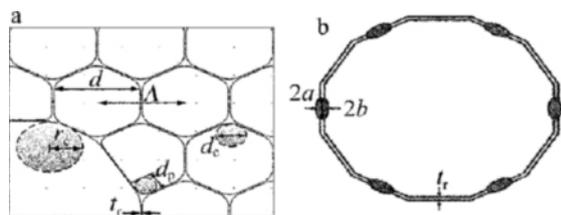


Fig. 2 a—structural map with parameters b—a core-surround geometry which incorporates cylinders

椭圆圆柱的结构如图 2b 所示,长轴  $2a = 0.1287\Lambda$ ,短轴  $2b = 0.0429\Lambda$ 。在椭圆圆柱中填充的液体为高折射率介质油,其折射率随温度变化,且为<sup>[13]</sup>  $n = n_{oil} - \alpha(T - T_0)$ 。其中,温度系数  $\alpha = 4.05 \times 10^{-3}$ ;

参考温度  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  时,介质油的折射率  $n_{oil} = 1.6327$ ;  $T$  为实际工作温度。

### 2 数值分析

在光子带隙型光子晶体光纤的带隙内,空芯光纤纤芯和包层的分界面处会出现表面模(surface mode, SM),这些模式可以把纤芯中基模(fundamental mode, FM)的能量耦合进包层中,引起纤芯模的损耗,基模和表面模的耦合是造成空芯光子带隙光纤损耗大的主要原因<sup>[14]</sup>。改变表面模在带隙中的位置可以改变表面模和基模在带隙内的耦合位置,从而会改变光子带隙型光子晶体光纤的传输特性。

随着温度的升高,高折射率液体的折射率会降低,导致纤芯环的折射率降低。当改变纤芯环的参量时,表面模比基模更容易受到影响<sup>[15]</sup>,表面模折射率会随着纤芯环折射率的变化而变化,从而改变其在带隙中的位置,即改变表面模和基模在带隙内的耦合位置,最终光子晶体光纤的纤芯中基模的有效折射率、有效模面积、纤芯的能量分布和群速度色散等传输特性会受到影响。

通过有限元软件对理论模型进行数值仿真,可以得到光纤中各个模式的有效折射率值。图 3 为光子带隙光纤在并入高折射率介质油圆柱前后有效折射率随波长的变化曲线。从图中可以看出,有效折射率随着传输波长的增加而降低,另外,在相同的温度下,由于高折射率介质油的折射率要比石英环的折射率大,PBG-PCF 并入高折射率介质油圆柱之后的有效折射率要比并入之前大。

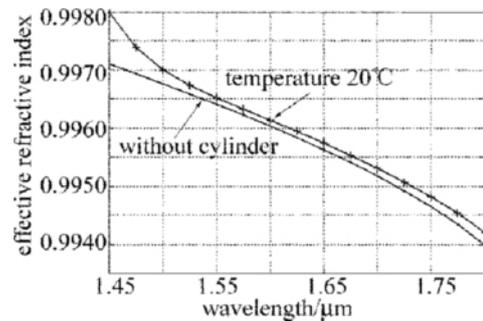


Fig. 3 Wavelength dependence of effective refractive index of FM in PBG-PCF at 20°C

当光子带隙型光纤的纤芯环中并入折射率随温度改变的液体圆柱时,PBG-PCF 的有效折射率会随着温度而改变(见图 4)。由图可见,当波长在  $1.450\mu\text{m} \sim 1.550\mu\text{m}$  之间变化时,随着波长的减小,基模的有效折射率随温度的变化越来越明显,这是由于波长越短,越靠近光纤的带隙边缘,导致光纤的模场分布面积越大,从而使有效折射率受到温度的影响更大,即其温度效应更加灵敏。

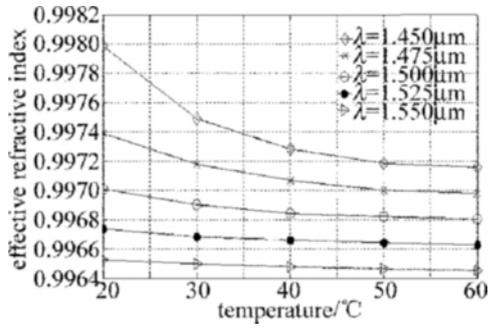


Fig. 4 Temperature dependence of effective refractive index of FM in PBG-PCF at different wavelength

纤芯中基模能量反映了光纤纤芯的限光能力,基模和表面模的耦合会导致光纤纤芯中基模能量的减少。图5为不同的波长下,PBG-PCF纤芯中基模能量分布随温度的变化曲线。由图可见,随着波长的增加,PBG-PCF的纤芯中能量呈现递增的趋势,而且在短波长处,光纤纤芯能量随温度升高而明显增加,其温度效应更加灵敏。这是由于在带隙边缘的短波长处,会有更多的纤芯能量会渗透到纤芯环和包层中,导致纤芯中的能量减少,且受温度的影响增大。

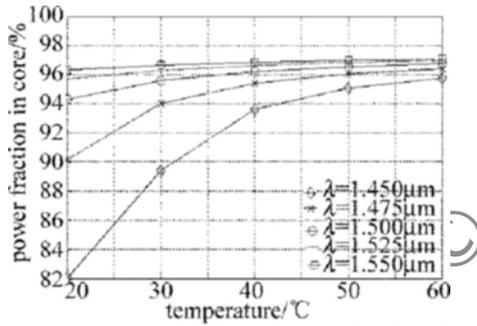


Fig. 5 Temperature dependence of core-confined power fraction of FM in PBG-PCF at different wavelength

有效模场面积是光子晶体光纤的重要参量之一,其数学表达式为<sup>[16]</sup>:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[ \iint_S |E(x,y)|^2 dx dy \right]^2}{\iint_S |E(x,y)|^4 dx dy} \quad (1)$$

式中, $E(x,y)$ 为基模的电场分布, $S$ 为光纤的横截面积。

根据上式,通过数值仿真,可得在不同的波长下PBG-PCF基模的有效模面积分布随温度的变化曲线(如图6所示)。同样,在短波长处,光纤有效模面积随温度变化明显,并且随着波长的增加,PBG-PCF的有效模面积呈现递减的趋势。这是由于波长越短,光纤的模场分布面积越大,即光纤的有效模面积越大,且更容易受到温度的影响。

波导群速度色散(group velocity dispersion, GVD)的表达式为:

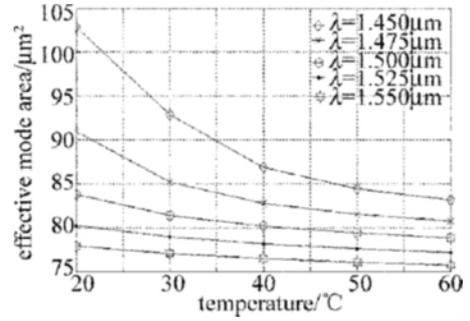


Fig. 6 Temperature dependence of effective mode area of FM in PBG-PCF at different wavelength

$$D_{\text{GVD}} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \quad (2)$$

式中  $c$  为真空中光波速率,  $n_{\text{eff}}$  为模式的有效折射率,  $\lambda$  为波长。在不同的温度下,根据上式对PBG-PCF的色散分布进行仿真计算,结果如图7所示。随着温度的降低,零群速率色散点向长波长方向移动,这是由于表面模和基模在带隙内的耦合位置的改变导致的;另外,随着温度的降低,色散会减小,使得光子晶体光纤在很宽的带隙范围内具有较低的群速度色散。当温度从60°C变化至20°C时,零色散点可以在1.485 μm ~ 1.565 μm之间漂移,零色散点漂移范围为80 nm,可见高折射率柱的温度传感特性对于群速度色散的影响很大。

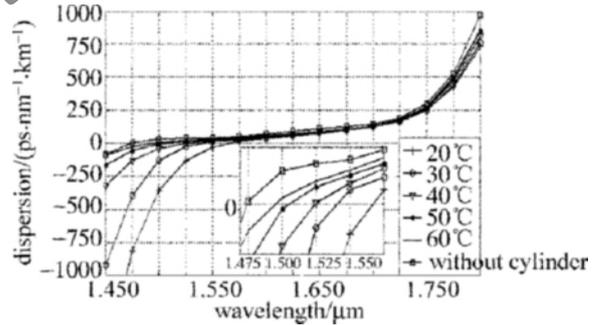


Fig. 7 Wavelength dependence of group velocity dispersion of FM in PBG-PCF at different temperature

### 3 结论

提出了一种可提高光子带隙型光子晶体光纤温度灵敏度的新结构,即在纤芯环上并入温度敏感的高折射率液体圆柱,然后利用全矢量有限元法,在不同温度及波长条件下,对提出的结构进行了仿真。结果表明,当并入液体圆柱后,随着温度的升高,光纤的有效模折射率会减小,纤芯能量呈上升趋势,有效模面积会减小,尤其在短波长条件下变化趋势更加明显,且零群速度色散点向短波长方向移动,即本文中提出的光子带隙型光子晶体光纤新结构的传输特性是对温度敏感的。综上所述,通过光子带隙型光子晶体光纤结构的合理设计和填充适当物质等方法,可改变光子带隙型光子晶体光纤的温度传感特性,提高其温度灵敏度,使

其更适合于温度传感方面的应用。本研究结果为今后深入开展研究奠定了理论基础。

### 参 考 文 献

- [1] WANG J Y, JIANG Ch, HU W Sh, *et al.* Properties of index-guided PCF with air-core [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(2): 317-321.
- [2] PALKA N. Sensing properties of photonic crystal fibers [J]. *Journal de Physique IV France*, 2005, 129: 143-145.
- [3] SU H X, WANG K, CUI J H, *et al.* Research progress of photonic crystal fiber sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2008, 2(2): 6-8 (in Chinese).
- [4] YAN P G, XING F F, RUAN Sh Ch, *et al.* Microstructured-optical-fiber surface-plasmon-resonance sensor [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2009, 26(1): 16-19 (in Chinese).
- [5] LI X J, YU Y Q, HONG X M, *et al.* Analysis on temperature sensing properties of photonic crystal fiber based on liquid filling [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2009 36(5): 1140-1144 (in Chinese).
- [6] NASFLOWSKI T, MARTYNKIEN T, STATKIEWICZ G, *et al.* Temperature and pressure sensitivities of the highly birefringent photonic crystal fiber with core asymmetry [J]. *Applied Physics*, 2005, 81(2/3): 325-331.
- [7] DU J B, LIU Y G, WANG Zh, *et al.* Thermally tunable dual-core photonic bandgap fiber based on the infusion of a temperature-responsive liquid [J]. *Optics Express*, 2008, 16(6): 4263-4269.
- [8] YU C P, LIOU J H, HUANG Sh Sh, *et al.* Tunable dual-core liquid filled photonic crystal fibers for dispersion compensation [J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4443-4451.
- [9] ZHANG R, TEIPEL J, GIESSEN H. Theoretical design of a liquid-core photonic crystal fiber for supercontinuum generation [J]. *Optics Express*, 2006, 14(15): 6800-6812.
- [10] ROBERTS P J, WILLIAMS D P, SABERT H, *et al.* Design of low-loss and highly birefringent hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2006, 14(16): 7329-7341.
- [11] ZHANG H, WANG Q G, YANG B J. Research progress of photonic bandgap photonic crystal fibers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(3): 301-311 (in Chinese).
- [12] ROBERTS P J, COUNY F, SABERT H, *et al.* Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 236-244.
- [13] ZHANG H, WAN B H. Measuring the change of the index of refraction of liquid varying with temperatures [J]. *Physical Experiment of College*, 1998, 11(1): 1-3 (in Chinese).
- [14] WANG R X. Number study on the coupling loss of the photonic crystal fiber [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(5): 493-495 (in Chinese).
- [15] LI H, MAFI A, SCHULZGEN A, *et al.* Analysis and design of photonic crystal fibers based on an improved effective-index method [J]. *IEEE Lightwave Technology*, 2007, 25(5): 1224-1230.
- [16] ZHANG Y, LI X Z, ZHENG Y. Analysis of dispersion characteristics of photonic crystal fiber [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(1): 24-26 (in Chinese).

(上接第199页)

实验中用光谱仪扫描不同体积分数下  $\text{NO}_2$  气体的透射光谱并作平滑处理,得到谱线如图4所示。利用光谱仪在光源中心波长处定点扫描,取高纯氮气检测光强作为初始光强  $I_0$  与参考光强,运用最小二乘法将吸光度  $A$  取近似与体积分数  $C$  进行线性拟合,得到结果如图5所示。由图4和图5可知,不同情况下透射光谱分布基本相同,这与前面的(3)式分析相符;且吸光度  $A$  与体积分数  $C$  之间线性关系较好,符合气体吸收规律。

### 3 结 论

研究和设计了利用半导体激光器作为光源的  $\text{NO}_2$  气体检测系统,通过不同体积分数待测  $\text{NO}_2$  气体的透射光谱采集、分析,中心波长定点扫描、数据拟合等对实验系统的可行性进行了验证。分析结果表明,该系统可以实现对  $\text{NO}_2$  气体的在线实时检测,检测灵敏度为  $10^{-4}$  量级。通过采用增加气体吸收池有效长度、对光学系统优化设计、引入参考光路等方式可有效提高实验精度与灵敏度。基于激光  $\text{NO}_2$  气体检测方法操作简单、方便,具有研究与应用价值。

### 参 考 文 献

- [1] CAI X Sh, LI Sh R, FU J Y, *et al.* Study on measuring concentration of  $\text{NO}_2$  with DOAS method [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* 2003 24(2): 351-353 (in Chinese).
- [2] WANG D D, ZHU B, WANG J. Observational analysis of  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ , and  $\text{NO}_2$ , with DOAS system [J]. *Research of Environmental Sciences* 2009 22(6): 650-655 (in Chinese).
- [3] RAO G N, KARPFA. High sensitivity detection of  $\text{NO}_2$  employing cavity ringdown spectroscopy and an external cavity continuously tunable quantum cascade laser [J]. *Applied Optics* 2010 49(26): 4906-4914.
- [4] KARPFA, RAO G N. Enhanced sensitivity for the detection of trace gases using multiple line integrated absorption spectroscopy [J]. *Applied Optics* 2009 48(27): 5061-5066.
- [5] ZHENG L J, LI P, QIN R F, *et al.* Research situation and developing tendency for optical measurement technology of gas density [J]. *Laser and Optoelectronics Progress* 2008(8): 24-30 (in Chinese).
- [6] CHEN H, ZHOU F X, XU Zh, *et al.* An integrated control system for carbon monoxide detection, emission and recycling [J]. *Laser Technology* 2011 35(3): 360-363 (in Chinese).
- [7] SUN X P, ZHANG X H, WANG D Ch, *et al.* LED illuminant-based detection of trace  $\text{NO}_2$  gases [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009 29(6): 1672-1674 (in Chinese).
- [8] ZHANG G Y, MA J Y, JIN Y D. Investigation on internal energy transfer and relaxation kinetics of  $\text{NO}_2$  by photoacoustic and fluorescence emission spectra [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011 31(3): 742-745 (in Chinese).