

文章编号: 0258-7025(2009)05-1140-05

基于液体填充的光子晶体光纤温度传感特性分析

李学金¹ 于永芹¹ 洪学明² 宋奎岩² 朱 莉¹

(¹ 深圳大学物理科学与技术学院, 广东 深圳 518060; ² 深圳大学电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

摘要 提出了一种基于在折射率引导型光子晶体光纤(PCF)中填充高折射率温度系数液体的新型折射率型光纤温度传感器。通过建立理论模型,设定入射波长和材料参数及完美匹配层边界条件,采用全矢量有限元法对六角形结构排列的折射率引导型光子晶体光纤的温度特性进行了分析。研究表明,在空气孔中填充液体乙醇,PCF 模场分布随着温度变化明显,其有效折射率和限制损耗都随着温度升高而减小。相同的孔间距,占空比越大,输入波长越长,有效折射率和限制损耗受温度影响越大。当波长为 1500 nm,占空比为 0.7,温度从 -20 ℃ 升至 70 ℃ 时,限制损耗从 3.5×10^2 dB/m 减小到 22 dB/m。

关键词 光纤光学; 光纤传感; 光子晶体光纤; 温度传感器

中图分类号 TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093605.1140

Analysis on Temperature Sensing Properties of Photonic Crystal Fiber Based on Liquid Filling

Li Xuejin¹ Yu Yongqin¹ Hong Xueming² Song Kuiyan² Zhu Li¹

(¹ College of Physics Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)
(² College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract A novel temperature sensor of photonic crystal fibers (PCF) based on liquid ethanol filling with refractive index sensitive to temperature is proposed. The temperature properties of the sensor were investigated by the full-vector finite element method with a perfectly matched layer. Theoretical calculations show that filling the air-holes of a PCF with ethanol will enhance the temperature influence on the mode field. Both the effective refractive index and the confinement loss decrease with increase of temperature. After filling the liquid ethanol, the mode field infiltrates more through the cladding of fiber as the wavelength increases, and becomes more sensitive to temperature. Under the condition of the same hole spacing, the larger the duty ratio and the longer the input wavelength are, the stronger are the dependence of the effective refractive index and the confinement loss on temperature. The effective refractive index basically reduces linearly when temperature increases. When the wavelength $\lambda = 1550$ nm, hole to hole spacing $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$ and duty ratio $d/\Lambda = 0.7$ (d represents the hole radius), the confinement loss reduces from 3.5×10^2 dB/m to 22 dB/m as the temperature changes from -20 ℃ to 70 ℃.

Key words fiber optics; optical fiber sensor; photonic crystal fiber; temperature sensor

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)是一种带有线缺陷的二维光子晶体,由于其有着许多在传统光纤中难以实现的特性,受到了人们的广泛关注,已成为光学与光电子学领域研究的一个热点^[1]。根据光的传导机制,PCF 可分为两类:一类是与传统光纤类似,利用纤芯折射率比包层等效折射率略高来形成全内反射,被称为全内反射型光子晶体光纤(TIR-PCF);另一类是利用光子带隙效应进行导光的称为光子带隙型

光子晶体光纤(PBG-PCF)。与传统光纤相比,光子晶体光纤中可增加传输光与气体或液体的作用长度,并可根据需要通过调整结构参数进行自由设计,在传感领域有着重要的应用价值和开发潜力。随着光子晶体光纤制造技术的日趋成熟,以及人们对其特性逐渐深入的了解,光子晶体光纤的传感特性已引起科学工作者的广泛关注,并已展开了一些初步的研究工作^[2~5]。

相对传统光纤而言,光子晶体光纤对温度不敏

收稿日期: 2008-08-03; 收到修改稿日期: 2008-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(60777036)和广东省自然科学基金(7009419)资助课题。

作者简介: 李学金(1966-),男,博士,教授,主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail: lixuejin@szu.edu.cn

感^[2]。在光子晶体光纤中填充高折射率温度系数的液体材料后,通过温度调节来改变填充材料的折射率,从而改变光纤包层的等效折射率,影响和改变光的传输特性,构成折射率型光纤温度传感器。2001年, Eggleton 等^[6]首次进行液体填充 PCF 的实验研究。他们将一种丙烯酸盐的单体混合物填充到纤芯写有长周期光栅的全反型 PCF 中,制成了可调光栅滤波器。目前,关于在 PCF 空气孔中填充材料的一些实验报道,如填充液晶的电控光开关^[7,8],填充热敏材料通过温度控制的可调节滤波器^[9]等都是在 PCF 空气孔中填充高折射率材料,使其成为 PBG-PCF,通过温度调节改变带隙宽度和带隙间距来实现温度传感。本文采用在空气孔中填充液体材料(乙醇),其折射率小于石英光纤的折射率,填充后仍属于全内反射型导光机制。利用全矢量有限元法对六角形结构的光子晶体光纤填充前后的温度特性进行模拟和分析,主要研究光子晶体光纤在填充高温系数的折射率敏感介质后,温度对其有效折射率、模场和损耗等的影响。

2 数值模型

对于光子晶体光纤中的传输特性分析,Maxwell 方程仍然适用。从 Maxwell 方程出发可得到光子晶体光纤所遵循的本征值方程:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times \mathbf{H} \right) = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \mu_r \mathbf{H}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \epsilon_r \mathbf{E}, \quad (2)$$

其中, $\mathbf{H} = \mathbf{H}(x, y) \exp(-j\beta z)$ 是磁场强度, $\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y) \exp(-j\beta z)$ 是电场强度, ϵ_r 和 μ_r 分别是介质的介电常数和磁导率, c 为真空中光速, ω 为光波角频率, β 为模式传输常数。利用全矢量有限元方法计算光子晶体光纤传输特性时,建立理论模型,采用正交混合波模型,设定入射波长和材料参数及完美匹配层边界条件,计算出 PCF 的模场分布及基模有效折射率。采用三层空气孔的六角形排列结构来建立模型,构建 TIR-PCF 几何结构模型的截面如图 1 所示。基质是纯石英光纤材料,光纤空气孔的半径为 d ,孔间距为 $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$,设定占空比 $d/\Lambda = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$,分析结构参数对 PCF 传输特性的影响。

填充材料的折射率温度系数定义为:

$$n = n_0 - \alpha(T - T_0), \quad (3)$$

其中 T 为工作温度, $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。 n 和 n_0 分别是温

度为 T 和 T_0 时的折射率。乙醇的温度系数 $\alpha = 3.94 \times 10^{-4} / \text{K}$,石英光纤的温度系数为 $\alpha = 8.6 \times 10^{-6} / \text{K}$ 。因为石英光纤的温度系数比填充材料低两个数量级,在分析中,近似认为石英光纤的折射率不随温度变化。当波长为 589.3 nm ,温度 $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,取乙醇的折射率 $n_0 = 1.36048$,在模拟过程中,考虑石英介质的材料色散,其不同波长下的折射率由 Sellmeier 方程给出。由于乙醇的折射率低于石英光纤基质的折射率,所以 PCF 填充乙醇前后仍然属于全内反射型导光机制。

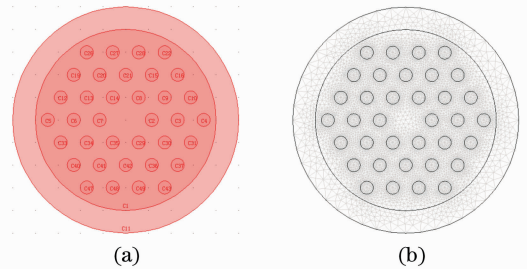


图 1 PCF 模型图。(a)有限元方法建立的六角形结构折射率引导型 PCF 截面图;(b)计算区域的有限元离散网格

Fig. 1 Illustration of PCF model. (a) cross section of refractive index guiding PCF with finite element methods; (b) discrete mesh of PCF

3 模场分布

图 2 是波长为 1550 nm , $d/\Lambda = 0.5$ 时,PCF 在填充前后的模场分布图。其中,图 2(a)和图 2(b)为光子晶体光纤在填充前,温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的模场分布图;图 2(c)和图 2(d)为光子晶体光纤在填充乙醇后,在温度为 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的模场分布图。图 2(e)和图 2(f)为光子晶体光纤在填充乙醇后,在温度为 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的模场分布图。从图 2 可以看出,填充前后,PCF 的模场分布改变明显;PCF 填充乙醇后,模场分布随着温度的变化更明显,温度对 PCF 的传输特性影响很大,也即 PCF 的传输特性对温度是敏感的,这是构成折射率型光纤温度传感器的基础。从图 2 可以看出,因为填充前空气孔的折射率 $n = 1$,当填充乙醇后,折射率增大,也即包层模的等效折射率增大,使得限制光的能力减弱,所以填充乙醇后模场分布面积增大。根据(3)式,乙醇的折射率随着温度升高而减小,所以填充乙醇的 PCF 在 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 的模场分布面积要大于 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 的模场分布面积。

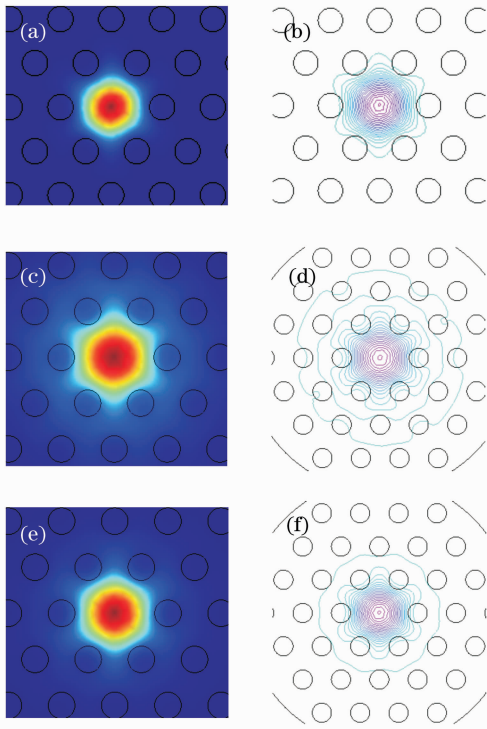


图 2 波长为 1550 nm 时光子晶体光纤在填充前后不同温度下的模场分布图及等位线分布。(a)和(b): 20 °C 时 PCF 填充乙醇前; (c)和(d): -20 °C 时 PCF 填充乙醇后; (e)和(f) 70 °C 时填充乙醇后

Fig. 2 Mode field and contour line of PCF at 1550 nm. (a) and (b) 20 °C, before filling ethanol; (c) and (d) -20 °C, after filling ethanol; (e) and (f) 70 °C, after filling ethanol

4 温度对有效折射率的影响

改变光纤结构参数, 占空比分别为 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 和 0.7, 保持孔间距 $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$, 分析填充前后有效折射率随占空比的变化情况, 以及不同结

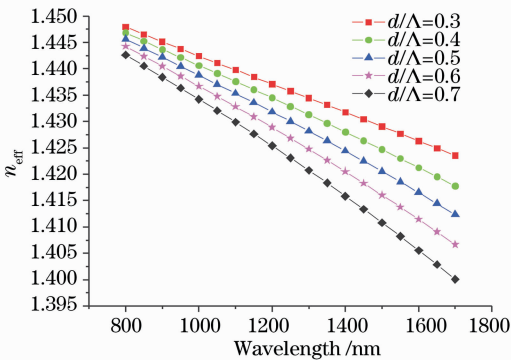


图 3 不同占空比的光子晶体光纤填充前的有效折射率与传输波长的关系

Fig. 3 Relationship between the effective index and wavelength with different duty ratios of PCF before filling

构参数和不同波长对 PCF 基模的模式有效折射率的影响。图 3 和图 4 分别为不同占空比的光子晶体光纤在填充前和填充后的有效折射率随波长的变化曲线; 从图中可以看出, 填充前后有效折射率随着传输波长的增加而降低, 这是因为由于长波光场渗透到空气孔包层中的能力比短波强, 导致有效折射率随着波长的增加而减小; 同时在短波处, 由于模场集中限制于光纤纤芯部分, 模式有效折射率受空气孔分布以及直径大小影响较小, 逐渐趋于纯石英基质的折射率。而在长波方向, 由于模场渗透到分布有空气孔的包层中, 空气孔分布及直径对模式有效折射率的影响将增大。空气填充系数越高, 折射率随波长的变化越快。在保持孔间距一致的情况下, 其模式有效折射率随着占空比 d/Λ 增大而减小。图 5 是在相同的占空比和温度下, PCF 填充乙醇前后的有效折射率的对比, 由于乙醇的折射率比空气的折射率大, 所以在同一波长下, 填充后的模式有效折射率要比填充前的大。

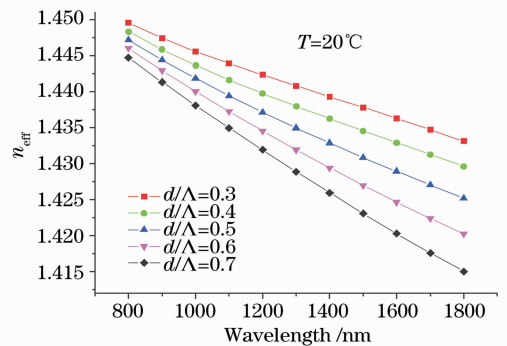


图 4 不同占空比的光子晶体光纤填充后的有效折射率与传输波长的关系

Fig. 4 Relationship between the effective index and wavelength with different duty ratios of PCF after filling

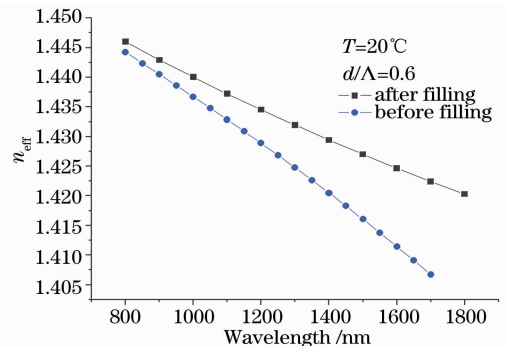


图 5 占空比为 0.6 时 PCF 填充乙醇前后的有效折射率的比较

Fig. 5 Comparison of the effective index of PCF before and after filling ethanol ($d/\Lambda = 0.6$)

当空气孔中填入折射率随温度改变介质时, PCF 的传输特性会随着温度而改变, 图 6 是在波长为 1500 nm 时, PCF 填充乙醇后, 随着温度的改变, 其模式有效折射率也会改变。从图中可以看出, 随着温度的升高, n_{eff} 减小, 基本呈线性关系。而且相同的孔间距, 占空比 d/Λ 越大, n_{eff} 受温度的影响越大,

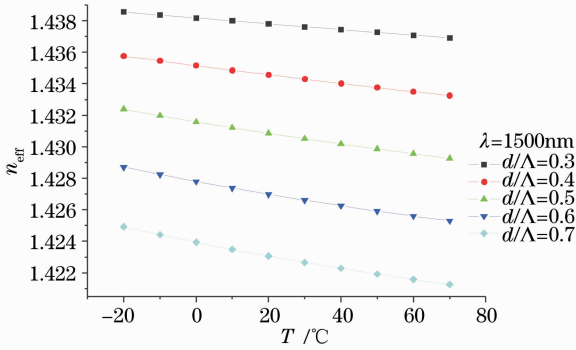


图 6 不同占空比的光子晶体光纤填充乙醇后有效折射率与温度的关系图

Fig. 6 Relation between the effective index and temperature with different duty ratios of PCF after filling ethanol

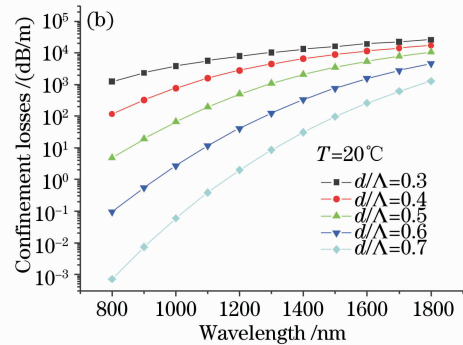
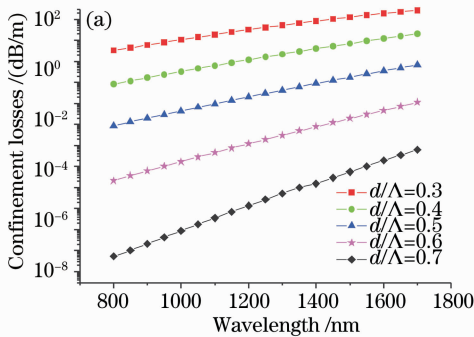


图 7 不同占空比的光子晶体光纤填充乙醇前后的限制损耗与传输波长的关系。(a) 填充前; (b) 填充后

Fig. 7 Relation between the confinement loss and wavelength with different duty ratios of PCF. (a) before filling ethanol; (b) after filling ethanol

图 8 是波长为 1500 nm 时不同占空比的 PCF 填充乙醇后限制损耗随温度的变化曲线。可看出, 当 PCF 填充乙醇后, 限制损耗随温度增大而减小。这是因为填充介质折射率和纤芯折射率差越大, PCF 束缚光的能力就越大, 使模式损耗变小。当 $d/\Lambda=0.3$, 温度从 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 限制损耗从 $1.9\times 10^4\text{ dB/m}$ 减小到 $1.3\times 10^4\text{ dB/m}$, 减小幅度不到一个数量级; 而当 $d/\Lambda=0.7$, 温度从 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 限制损耗从 $3.5\times 10^2\text{ dB/m}$ 减小到 22 dB/m , 减小了两个数量级。所以相同的孔间距,

这说明占空比大的 PCF 填充后对温度更敏感。因此当入射波长越长时, 模场分布面积越大, 有效折射率受温度的影响变化越大, 其温度效应更加灵敏。

5 温度对限制损耗的影响

光纤的相对限制损耗可通过计算有效折射率的虚部得到, 表示为

$$P_L = 20\lg(e)\text{Im}[k_0 n_{\text{eff}}]L, \quad (4)$$

L 为光纤长度, $n_{\text{eff}} = \beta/(\omega\mu_0)$, β 为传播常数。图 7 是在相同的孔间距、不同占空比的光子晶体光纤填充前后的限制损耗随着传输波长的变化关系。由图 7 可知, 随着波长的增大, 限制损耗增大, 由于波长越长, 其向包层的渗透能力越强, 使 PCF 的限制损耗增加。随着 d/Λ 增大, 限制损耗减小, 由于 d/Λ 增大时, PCF 纤芯与包层有效折射率差增大, 对光的限制能力增强, 模式限制损耗因此随之减小。对于 PCF 填充前, 当波长为 1500 nm, d/Λ 从 0.3 增大到 0.7 时, 限制损耗从 $1.2\times 10^3\text{ dB/m}$ 减小到 $5.5\times 10^{-5}\text{ dB/m}$ 。由于填充后, PCF 模场分布面积增大, 限制损耗受空气孔分布以及直径大小的影响较大。

占空比越大, 限制损耗受温度的影响越大, 也说明占空比大的 PCF 填充后对温度更敏感。图 9 给出了波长为 1500 nm 和 800 nm, 占空比为 0.7 时 PCF 填充乙醇后限制损耗随温度的变化曲线。从图中可明显看出, 当波长为 800 nm 时, PCF 限制损耗随温度变化很小, 但当波长为 1500 nm 时, 限制损耗随着温度变化明显减小。当入射波长越长时, 模场分布向包层渗透越大, 限制损耗受温度的影响变化越大, 其温度效应也更加灵敏, 这为后续实验采用大占空比的 PCF 进行填充以及选择长波长的入射光作为

光源用来进行温度传感提供了理论依据。

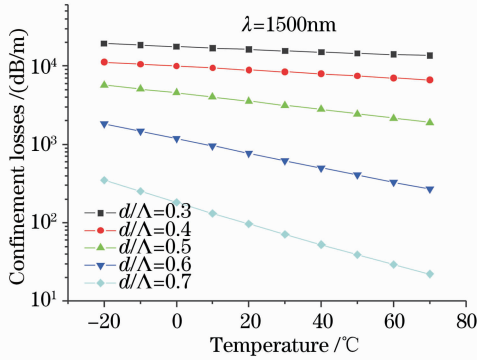


图 8 波长为 1500 nm 时不同占空比的 PCF 填充乙醇后限制损耗随温度的变化曲线

Fig. 8 Confinement loss versus temperature with different duty ratios of PCF after filling ethanol when the wavelength is 1500 nm

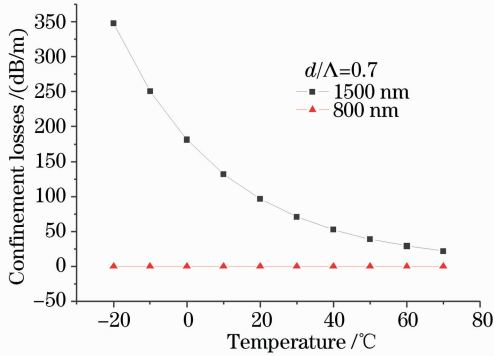


图 9 波长为 1500 nm 和 800 nm, 占空比为 0.7 时, PCF 填充乙醇后限制损耗随温度的变化曲线

Fig. 9 Confinement loss versus temperature after filling ethanol when the duty ratio is 0.7 with the wavelength of 1500 nm and 80 nm

6 结 论

采用全矢量有限元法对六角形结构排列的折射

率引导型光子晶体光纤的温度特性进行了分析。在空气孔中填充液体乙醇, 其折射率小于石英光纤的折射率, 填充后仍然属于折射率引导型导光机制。研究了不同结构的光子晶体光纤在填充乙醇前后, 模式有效折射率、模场分布和限制损耗随着温度变化的关系。发现通过填充温度敏感的液体乙醇材料, 模场分布随着温度变化很明显, 温度对 PCF 的传输特性影响很大。相同的孔间距, 占空比越大, 输入波长越长, 有效折射率和限制损耗受温度的影响越大。因此, 通过在光子晶体光纤中填充高温度系数折射率敏感的介质构建折射率型光纤温度传感器是可行的。

参 考 文 献

- 1 T. R. Wolinski, K. Szaniawska, S. Ertman *et al.*. Influence of temperature and electrical fields on propagation properties of photonic liquid-crystal fibres [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**(5): 985~991
- 2 N. Palka. Sensing properties of photonic crystal fibers [J]. *J. Phys. IV France*, 2005, **129**: 143~145
- 3 M. Szustakowski, N. Palka. Comparative study of phase sensitivity of conventional and index-guiding photonic crystal fibres [C]. Proc. Transparent Optical Networks International Conference, 2005, **2**(3~7): 319~321
- 4 T. Nasilowski, P. Lesiak *et al.*. Birefringent photonic crystal fiber as multi-parameter sensor [C]. Proc. Annual Symposium of the IEEE/LEOS Benelux Chapter, 2003, 29~32
- 5 J. B. Jensen, J. Riishede, J. Broengex *et al.*. Photonic crystal fibers: fundamental properties and applications within sensors [C]. Proc. IEEE, 2003, **1**(22~24): 269~278
- 6 B. J. Eggleton, C. Kerbage, P. S. Westbrook *et al.*. Microstructure optical fiber devices [J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 698~713
- 7 F. Du, Y. Lu, S. Wu. Electrically tunable liquid-crystal photonic crystal fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(12): 2181~2183
- 8 M. Haakestad. Electrically tunable photonic bandgap guidance in a liquid-filled photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(4): 819~821
- 9 P. Steinvurzel, B. Eggleton, C. D. Sterke *et al.*. Continuously tunable bandpass filtering using high-index inclusion microstructured optical fiber [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(8): 463~464