

近零超平坦色散填充光子晶体光纤的温度特性

雷景丽, 晏祖勇, 李晓晓, 刘延君, 武刚, 侯尚林

(兰州理工大学理学院, 甘肃兰州 730050)

摘要: 利用矢量光束传输法研究了温度对填充乙醇六边形折射率引导型光子晶体光纤色散、有效面积和非线性的影响。结果表明: 温度对色散平坦区域内的色散影响比较大, 而且温度越高, 色散平坦区间变宽; 在平坦区域的短波长范围, 温度对色散的影响变化更大, 曲线更平坦; 温度在长波长比短波长处对光模场面积和非线性系数影响更大; 在平坦区域某一波长处, 随温度的增加, 色散和非线性系数随着升高。研究结果为设计新型光通信和光传感器件提供了理论参考。

关键词: 光子晶体光纤; 色散平坦; 非线性; 温度

中图分类号: TN252 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3740-04

Temperature characteristic of liquid-filled photonic crystal fibers with nearly zero ultra-flattened dispersion

Lei Jingli, Yan Zuyong, Li Xiaoxiao, Liu Yanjun, Wu Gang, Hou Shanglin

(School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The effects of temperature on dispersion, mode effective area and nonlinearity of an ethanol-filled index-guiding hexagon photonic crystal fiber were investigated using the vectorial beam propagation method. The results indicate that temperature has a significant influence on dispersion at the wavelengths of flattened dispersion, the bandwidth of flattened dispersion increases with temperature increasing. At the short wavelengths of flattened dispersion, the temperature has greater influence on the dispersion and the dispersion becomes more flattened. The impact of temperature on the mode effective area and the nonlinearity is larger at long wavelengths than at short wavelengths of flattened dispersion. At a given wavelength of flattened dispersion, dispersion and nonlinearity increase with temperature increasing. The result provides theoretical reference for designing novel optical communication components or optical sensors.

Key words: photonic crystal fiber; flattened dispersion; nonlinearity; temperature

收稿日期: 2015-04-11; 修订日期: 2015-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(61167005, 61367007); 甘肃省自然科学基金(1112RJZA018, 1112RJZA017); 留学人员科技活动项目择优资助项目

作者简介: 雷景丽(1977-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事新型光纤与光传感技术、光子晶体光纤技术和光纤光栅技术的研究。

Email: lejingli70@gmail.com

0 引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fibers, PCFs)也叫微结构光纤(Microstructured Fibers, MFs),为二维周期性排列空气孔的单晶石英材料构成。由于空气孔的微排列和大小、介质种类可以灵活设计,因此可以获得许多独特的性能,如无波长截止的单模传输,色散可调^[1],非线性可控^[2]等特性,因而在光通信领域具有广泛的应用前景。

多信道波分复用系统中需要低色散,宽带宽的传输窗口。优化设计光子晶体光纤结构,选择适当的结构参数,可以实现近零超平坦色散。已有学者在这方面做了不少工作^[3-5],课题组优化设计了一种在 1.46~1.65 μm 波长范围内色散系数介于 $0 \pm 0.5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 之间的近零超平坦色散光子晶体光纤^[6]。

另外可以在空气孔内填充水、乙醇、聚合物、液晶等液体来改变光纤传输特性^[7]。由于外界温度对填充物的光学性质有影响,进而影响 PCF 的传输性能,因此利用填充可增加 PCF 的温度敏感,改变色散特性,也可实现光纤传感。如 Jiang 等^[8]和 Wei 等^[9]分别从实验和理论模拟研究了温度对光子晶体光纤的色散影响,钱祥忠^[10]报导了温度对液晶填充光子晶体光纤传输特性的影响,表明液晶填充使光子晶体光纤的色散减小,温度升高使光纤的色散值增大,零色散波长向短波长方向移动。据我们所知,目前还没有报道温度对填充乙醇光子晶体光纤的色散影响的有关文献。

文中采用矢量光束传输法(Vectorial Beam Propagation Method, VBPM)^[11],研究了参考文献[6]设计的包层空气孔内填充乙醇的近零超平坦色散光子晶体光纤的色散和外界温度的关系,分析了温度对色散、模场面积和非线性等的影响,得出温度对色散平坦区域内的色散影响比较大,而且温度越高,色散平坦区间变宽等一系列有意义的结论。研究结果对利用液体填充的光子晶体光纤制作光通信和传感器件提供了理论参考。

1 理论分析

由六边形分布的四层空气孔组成的光子晶体光

纤的截面图如图 1 所示,图中 d_1-d_4 依次是由纤芯向外 1~4 层空气孔直径,是孔节距。在选择填充时,可以选择填充全部的空气孔或者某些特定的空气孔。文中研究将乙醇填充到全部的空气孔中的情况。由于乙醇的折射率小于石英的折射率,因此光纤传导仍然是全内反射型。

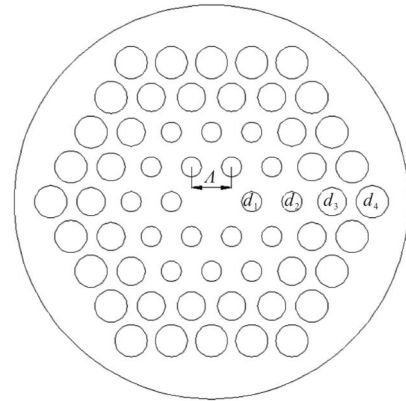


图 1 近零超平坦色散光子晶体光纤截面图

Fig.1 Cross profile of the ultra-flattened dispersion photonic crystal fiber

光子晶体光纤的总色散为^[12]:

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} + D_M(\lambda) \quad (1)$$

式中: λ 为真空中波长; c 为真空中光速; n_{eff} 为有效折射率; $D_M(\lambda)$ 为材料色散。

光子晶体光纤的非线性系数为:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (2)$$

式中: $n_2 = 2.76 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 为石英的非线性折射率, ω_0 为角频率。基模模场有效面积 A_{eff} 为:

$$A_{\text{eff}} = \left(\int_s |E_r|^2 dx dy \right)^2 / \left(\int_s |E_r|^4 dx dy \right) \quad (3)$$

式中: E_r 为横电场矢量; s 为光子晶体光纤的横截面。

材料的折射率温度系数定义为^[13]:

$$\alpha = (n_0 - n) / (T - T_0) \quad (4)$$

式中: T 为工作温度; T_0 取 20°C ; n 和 n_0 分别是温度为 T 和 T_0 时的折射率。乙醇的折射率在 20°C 时等于 1.36048。由于乙醇的折射率小于石英的折射率,因此光纤传导模式是全内反射型。

空气孔中填充的乙醇是高折射率温度系数液体,温度系数 α_{ethanol} 为 $3.94 \times 10^{-4}/\text{K}$,而石英的温度系

数为 $\alpha_{\text{SiO}_2} = 8.6 \times 10^{-6} / \text{K}$, 石英的温度系数比乙醇的温度系数低两个数量级。

2 模拟结果及分析

由于填充的乙醇是高折射率温度系数液体, 石英的温度系数比乙醇的温度系数低两个数量级, 图 2 为石英和乙醇折射率随温度变化曲线。可以看出, 相对于乙醇, 石英折射率随温度的变化非常小, 可以被忽略。

取温度为 20°C 时, $d_1 = 0.53\Lambda$, $d_2 = 0.52\Lambda$, $d_3 = 0.7\Lambda$, $d_4 = 0.8\Lambda$, $\Lambda = 2.75 \mu\text{m}$, 未填充的光子晶体光纤色散曲线如图 3 所示。可以看出: 在 $1.46 \sim 1.65 \mu\text{m}$ 波长范围内色散绝对值小于 $0.5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 在这个波长范围内色散很小, 而且曲线很平坦, 可以实现宽带近零低色散传输。在此基础上, 研究空气孔内填充乙醇时, 由于乙醇对温度的敏感性, 导致 PCF 包层内有效折射率的变化, 进而影响其传输性能。下面分别研究了温度对色散、模场面积和非线性的影响。

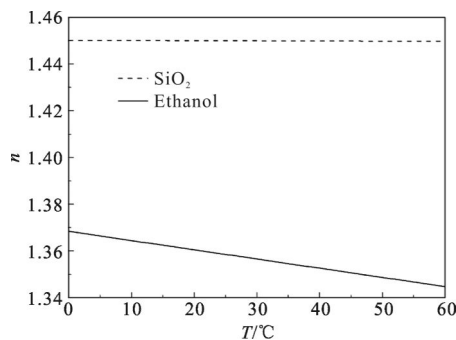


图 2 石英和乙醇的折射率随温度的变化

Fig.2 Refractive indices of SiO_2 and ethanol vary with temperature

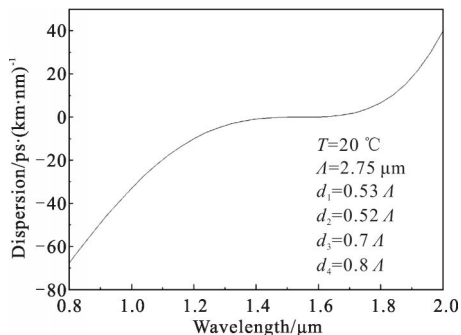


图 3 未填充的光子晶体光纤色散曲线

Fig.3 Dispersion curves of PCF with air holes

当 PCF 的结构参数保持不变, 温度分别取 0°C 、 20°C 、 40°C 、 60°C 时, 温度对色散的影响如图 4 所示。

可见在色散平坦区域色散变化比较大, 温度越高, 平坦区间越大。在平坦区域的短波长范围, 温度越高, 色散变化更大, 曲线更平坦; 而波长大于 $1.8 \mu\text{m}$ 长波长范围内, 色散值随着温度的升高而减小。这是由于温度改变以后, 液体的折射率也发生了改变, 光子晶体光纤的模式有效折射率发生改变而影响色散的分布。在平坦区域的同一波长, 色散随温度的升高而非线性增大, 如在 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 0°C 时的色散比 20°C 的小 $1.9036 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 20°C 时的色散比 40°C 的小 $2.2895 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 40°C 时的色散比 60°C 的小 $2.4943 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。

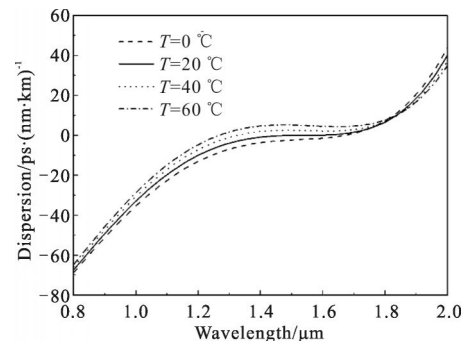


图 4 乙醇填充 PCF 在不同温度下的色散曲线

Fig.4 Dispersion curves of ethanol-filled PCF at different temperatures

图 5 为该光纤模场有效面积随温度变化的曲线。由图可见模场有效面积随着波长增大而增大, 在长波长处温度的影响更大; 在同一波长处, 模场有效面积随着温度升高而减小, 长波长处比短波长处的变化明显。这是因为长波光场渗透到包层孔中的能力比短波长强。在短波长处, 光能量容易集中限制在纤芯中, 因此模场有效面积小; 在长波长处, 光能量逐渐往外渗透, 因此模场有效面积大。随着温度升高, 乙醇的折射率变小, 光子晶体光纤的等效折射率减

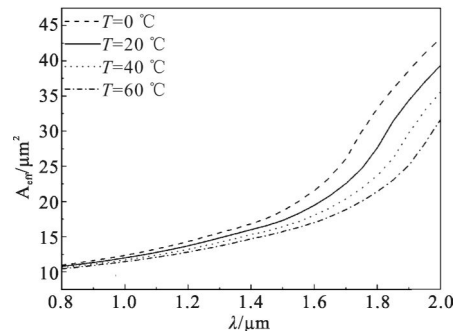


图 5 乙醇填充 PCF 不同温度下有效面积的曲线

Fig.5 Effective area of ethanol-filled PCF at different temperatures

小,与纤芯折射率差变大,对光的限制能力增强,因此模场有效面积减小。随着温度的升高,相同的温度间隔,有效面积的差值越来越小,在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处, $0\ ^\circ\text{C}$ 时有效面积比 $20\ ^\circ\text{C}$ 大 $1.6868\ \mu\text{m}^2$, $20\ ^\circ\text{C}$ 时有效面积比 $40\ ^\circ\text{C}$ 大 $1.1734\ \mu\text{m}^2$, $40\ ^\circ\text{C}$ 时有效面积比 $60\ ^\circ\text{C}$ 大 $0.8007\ \mu\text{m}^2$ 。这是由于随着温度的升高,模场有效面积减小,光场便集中到纤芯而逐渐远离包层,使得外面包层孔中液体折射率的影响对它越来越小。

图 6 所示为在不同温度下,非线性系数和波长的变化关系。可以看出:非线性系数随着波长增大而减小,在长波长处温度对非线性系数的影响比短波长处大。在某一波长处,非线性系数随着温度的升高而升高。如波长为 $1.55\ \mu\text{m}$, $0\ ^\circ\text{C}$ 时的非线性系数比 $20\ ^\circ\text{C}$ 的小 $0.2339\ \text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$, $20\ ^\circ\text{C}$ 时的非线性系数比 $40\ ^\circ\text{C}$ 的小 $0.1899\ \text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$, $40\ ^\circ\text{C}$ 时的非线性系数比 $60\ ^\circ\text{C}$ 的小 $0.1453\ \text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 。由公式(2)可以看出:非线性系数与模场有效面积成反比,由于长波长处光场比较分散,模场面积变大,光能量密度减小,造成非线性系数降低。

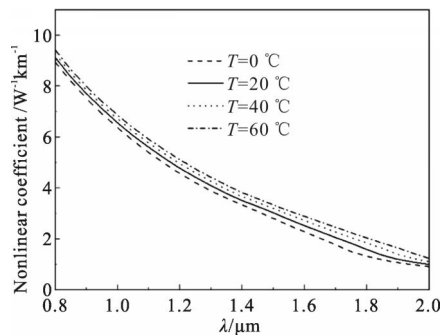


图 6 乙醇填充 PCF 不同温度下非线性系数曲线

Fig.6 Nonlinearity of ethanol-filled PCF at different temperatures

3 结论

采用 VBPM 对乙醇填充的全内反射型六边形分布的四层空气孔组成的光子晶体光纤进行了数值分析,研究了填充乙醇温度对 PCF 色散,模场面积和非线性等的影响。结果表明:温度对色散、有效面积和非线性系数有明显的影 响,可以利用温度的连续可调来改变 PCF 的传输特性,为设计连续、动态可调光通信和光传感器件提供了理论参考。

参考文献:

- [1] William Reeves, Knight J, Russell P, et al. Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers [J]. *Opt Express*, 2002, 10(14): 609-613.
- [2] Hilligsøe K M, Andersen T, Paulsen H, et al. Supercontinuum generation in a photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths[J]. *Opt Express*, 2004, 12(6): 1045-1054.
- [3] Feroza Begum, Yoshinori Namihira. Highly nonlinear dispersion-flattened square photonic crystal fibers with low confinement losses[J]. *Optical Review*, 2007, 14(3):120-124.
- [4] Chen Ming, Xie Shizhong. New nonlinear and dispersion flattened photonic crystal fiber with low confinement loss[J]. *Optics Communications*, 2008, 281: 2073-2076.
- [5] Feroza Begum, Yoshinori Namihira. Design and analysis of novel highly nonlinear photonic crystal fibers with ultra-flattened chromatic dispersion [J]. *Optics Communications*, 2009, 282: 1416-1421.
- [6] Hou Shanglin, Yan Zuyong, Li Suoping, et al. Design of photonic crystal fiber liquid-with nearly zero ultra-flattened dispersion[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2011, 37(2): 89-93. (in Chinese)
- [7] Lin W, Miao Y, Song B, et al. Multimodal transmission property in a liquid-filled photonic crystal fiber [J]. *Optics Communications*, 2015, 336: 14-19.
- [8] Jiang Y Q, Chen X N, Howley B, et al. Effect of temperature fluctuation on highly dispersive photonic crystal fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88: 011108.
- [9] Wei Yan, Chang Deyuan, Zheng Kai, et al. Numerical Simulation of temperature properties of photonic crystal fibers [J]. *Chin J Lasers*, 2007, 34(7): 945-951. (in Chinese)
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] Saitoh K, Koshiba M. Full-vectorial imaginary-distance beam propagation method based on a finite element scheme: application to photonic crystal fibers [J]. *Quant Electron*, 2002, 38(7): 927-933.
- [12] Shen L P, Huang W P, Chen G X, et al. Design and optimization of photonic crystal fibers for broad-band dispersion compensation [J]. *Photon Tech Lett*, 2003, 15(4): 540-542.
- [13] Barnes N P, Piltch M S. Temperature-dependent sellmeier coefficient and coherent length for cadmium telluride[J]. *Opt Soc A*, 1977, 67(5): 628-629.