

文章编号:1001-5078(2011)02-0206-06

· 光学材料器件与薄膜 ·

椭圆孔微纤芯光子晶体光纤的数值模拟

赵强¹, 丁春峰¹, 郑义^{1,2}, 江容容¹

(1. 郑州大学河南省激光与光电信息技术重点实验室, 河南 郑州 450052; 2. 北京交通大学理学院, 北京 100044)

摘要:提出了一种在纤芯引入四个近矩形排列的椭圆空气孔, 包层空气孔呈阶梯结构的高双折射光子晶体光纤, 采用全矢量有限元方法, 对光纤基模的模场分布、双折射、色散、限制损耗、有效模面积及非线性系数等特性进行了数值模拟。这种设计为获得高双折射光子晶体光纤提供了一种新的方法, 为改善光子晶体光纤其他性能(如色散、非线性特性)提供了一种新的途径。

关键词:光子晶体光纤; 双折射; 有限元法; 椭圆孔

中图分类号: TN253

文献标识码: A

Numerical simulation of high birefringent photonic crystal fiber based on micro-structured fiber core with elliptical holes

ZHAO Qiang¹, DING Chen-feng¹, ZHENG Yi^{1,2}, JIANG Rong-rong¹

(1. Henan Key Laboratory of Laser and Opto-electric Information Technology of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China;

2. Institute of Science; Beijing Jiaotong University; Beijing 100044, China)

Abstract: In this paper a high birefringent photonic crystal fiber employing nearly rectangular arrangement of four elliptical air holes in the fiber core and cladding air holes has been put forward for the first time. Using a full-vector finite element method, we simulate the mode field, birefringence, dispersion, confinement loss, effective mode area and nonlinear coefficient of the fiber fundamental mode. Such design provides a new approach to get high birefringence photonic crystal fiber and a new way to improve other properties (such as dispersion and nonlinearity) of photonic crystal fiber.

Key words: photonic crystal fiber; birefringence; finite element method; elliptical hole

1 引言

利用光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 高度可调的结构设计实现零色散波长向短波方向移动、色散平坦、色散补偿、高非线性以及双折射等被广泛地研究。PCF 的波导双折射主要来源于光纤的几何结构, 通过在包层中引入大小不一的空气孔、改变纤芯或者包层空气孔的形状^[1-12], 都可以得到性能优异的高双折射 PCF。高双折射 PCF 可以用于光纤通信、光纤激光器、光纤滤波器、光纤传感和干涉仪, 在光电子器件中也有很多应用, 比如偏振分束器等^[2,11]。目前, 已报道的高双折射光子

晶体光纤基本上可以分为两大类^[3]: 一种是基于非对称的光纤纤芯^[13], 通常采用光子晶体结构中双缺陷或三缺陷来实现高双折射光子晶体光纤, 可以获得 10^{-3} 量级的双折射, 存在着模斑质量不好(甚至模斑分裂)的缺点; 另一种是基于非对称的光纤包层, 典型的设计是在光纤包层引入椭圆空气孔^[14],

基金项目:国家自然科学基金重点项目 (No. 60637010); 国家自然科学基金面上项目 (No. 60978028); 北京市自然科学基金 (No. 4092032) 资助。

作者简介: 赵强 (1984 -), 男, 硕士研究生, 主要从事光电子学方面的研究。E-mail: zhaoliang19840000@163.com

收稿日期: 2010-09-26; **修订日期:** 2010-11-29

理论上可以获得 10^{-2} 量级的双折射,但是该光纤对光能量约束很差,导致不可接受的传输损耗。

本文提出了一种在纤芯引入四个近矩形排列的椭圆空气孔,包层空气孔呈阶梯结构的双折射 PCF 结构,利用有限元法 (finite element method) 进行数值模拟,研究了基于椭圆孔微结构纤芯光子晶体光纤基模的模场分布、双折射、色散、限制损耗、有效模面积及非线性系数等特性。模拟发现,该 PCF 结构既保留了传统光子晶体光纤良好的光约束特性,又具有利用空气孔尺度递增的包层达到低限制损耗和利用纤芯的椭圆微孔获得高双折射的优点。这种设计为获得高双折射光子晶体光纤提供了一种新的方法,为改善光子晶体光纤其他性能(如色散、非线性特性)提供了一种新的途径。

2 基本理论

2.1 有限元法计算原理^[15-16]

从麦克斯韦基本方程出发,能够导出光子晶体光纤中的电磁波方程应为:

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

式中, $H = H(x, y) \exp(-j\beta z)$ 是磁场强度; ϵ_r 和 μ_r 分别是介质的介电常数和磁导率。用有限元法建立适当的模型,可以直接计算其特征值传播常数 β 和模式有效折射率 n_{eff} 。

通过模式有效折射率 n_{eff} 的虚部可以得到该模式所对应的光纤的限制损耗(其单位为 dB/km):

$$L = \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^9 \quad (2)$$

式中, λ 的单位是 μm , 可以由 n_{eff} 的实部得到色散系数:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2} \quad (3)$$

光纤的归一化双折射率 B 为:

$$B = n_{\text{eff}}^s - n_{\text{eff}}^f \quad (4)$$

其中, n_{eff}^s 和 n_{eff}^f 分别是基膜的两个正交偏振态慢轴和快轴所对应的模式有效折射率,两个正交偏振模之间的偏振拍长度 L_B 为:

$$L_B = \frac{\lambda}{B} \quad (5)$$

对于模场面积,可以通过求解有效模面积求得,有效模面积的公式为:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint |E(x, y)|^2 dx dy \right)^2}{\iint |E(x, y)|^4 dx dy} \quad (6)$$

式中, $E(x, y)$ 是光传播时的横向电场分布。

在分析光子晶体光纤的非线性效应时,非线性系数 γ 的计算公式为:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (7)$$

其中, n_2 是石英的非线性折射率系数,大气填充时取值为 $2.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。

3 数值模拟结果与分析

本文设计的光纤是一种中心去掉一个空气孔而形成纤芯,在纤芯引入四个呈类矩形排列的微小椭圆孔结构,光纤的外包层与传统光纤相同仍然为圆形,基质仍为石英。空气孔节距(在水平或竖直方向上相邻两个空气孔中心的距离) $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$, 外包层由 4 层空气孔构成,呈阶梯结构排列,内两层空气孔直径为 d_1 , 外两层空气孔直径 d_2 , 空气孔节距都为 Λ 。光纤截面如图 1 所示,光纤参数分别为 $a = 0.45 \Lambda, b = 0.20 \Lambda, \Lambda_1 = 0.55 \Lambda, \Lambda_2 = 0.65 \Lambda, d_1/\Lambda = 0.76, d_2/\Lambda = 0.91$ 。为了便于标注将此光纤定义为 PCF。

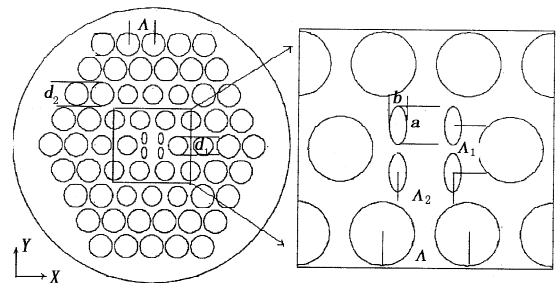


图 1 高双折射 PCF 的截面设计(放大部分为 PCF 中心区域)
Fig. 1 A design of cross section of high birefringence PCF
(the local enlargement is the central area of PCF)

本文采用有限元方法对所设计的 PCF 的模式有效折射率、色散、双折射等特性进行数值模拟。图 2 给出了 PCF 在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处的基模模场分布图,图 2(a) ~ 图 2(c) 分别为慢轴所对应的 $|E_x|, |H_y|, |S_z|$ 的模场分布;图 2(d) ~ 图 2(f) 分别为快轴所对应的 $|E_y|, |H_x|, |S_z|$ 的模场分布。从图 2(c) 和图 2(f) 可以看出,由于纤芯引入的四个呈近矩形排列的椭圆空气孔的长轴位于 y 轴方向,不管是慢轴模还是快轴模所对应的坡印亭矢量的 z 分量 $|S_z|$ 的分布均表现出了沿 y 轴方向的模场扩展,同时也显示出了在纤芯引入近矩形排列的四个椭圆空气孔结构的模场特点,即其模场的坡印亭矢量也成近似矩形分布。

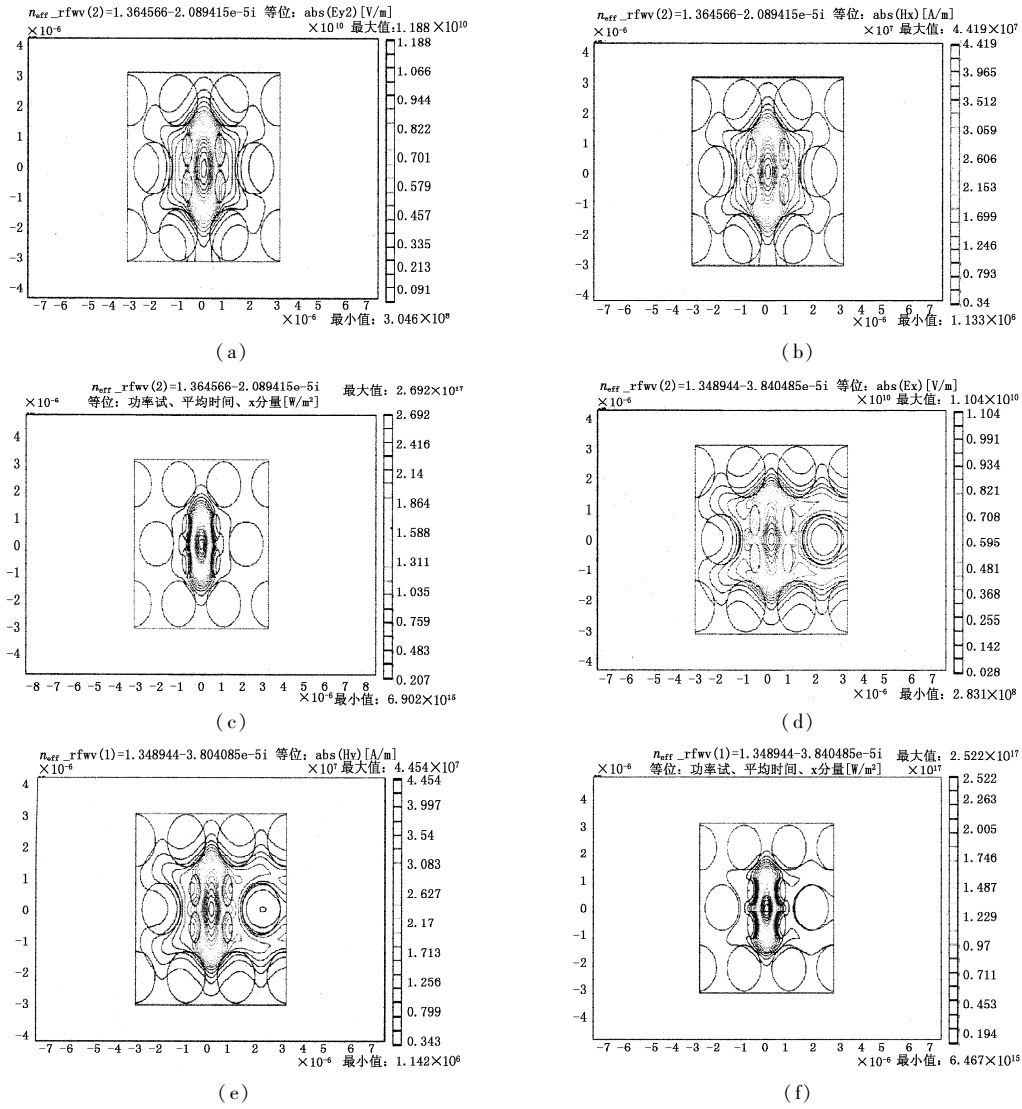


图2 PCF在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处的基模模场分布图

(a), (b), (c)分别为慢轴所对应的 $|E_y|$, $|H_x|$, $|S_z|$ 的模场分布; (d), (e), (f)分别为快轴所对应的 $|E_x|$, $|H_y|$, $|S_z|$ 的模场分布。

Fig.2 mode field distributions of fundamental mode for $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ of PCF, (a), (b) and (c) are $|E_y|$, $|H_x|$, $|S_z|$ of slow-axis modes respectively, (d), (e) and (f) are $|E_x|$, $|H_y|$, $|S_z|$ of fast-axis modes respectively

图3给出了PCF芯区中传播的导波模式所对应的横向电场矢量方向,对于快轴模, $E_y = 0, H_x = 0$,所以电场沿x方向线偏振,对于慢轴模, $E_x = 0, H_y = 0$,所以电场沿y方向线偏振。从电场矢量分布方向可以看出,快轴模和慢轴模分别对应的 HE_{11}^x 模式和 HE_{11}^y 模式两个偏振态相互正交。

图3给出了PCF芯区中传播的导波模式所对应的横向电场矢量方向,对于快轴模, $E_y = 0, H_x = 0$,所以电场沿x方向线偏振,对于慢轴模, $E_x = 0, H_y = 0$,所以电场沿y方向线偏振。从电场矢量分布方向可以看出,快轴模和慢轴模分别对应的 HE_{11}^x 模式和 HE_{11}^y 模式两个偏振态相互正交。

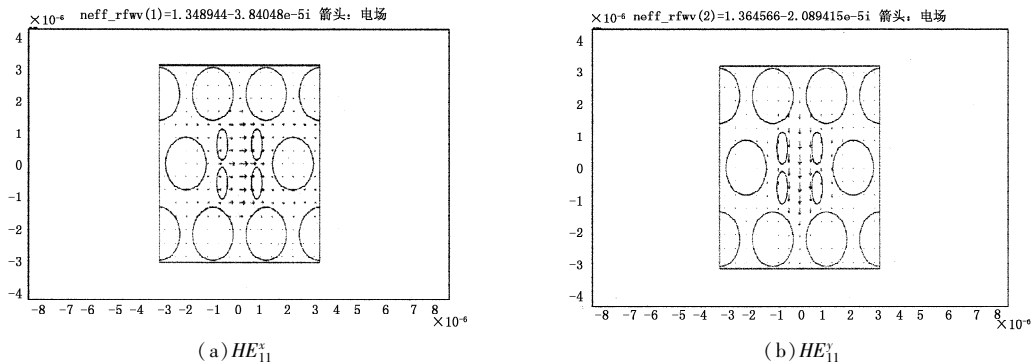
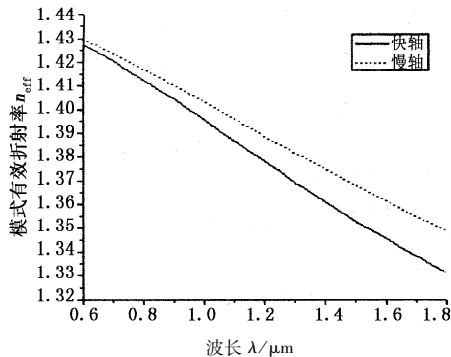


图3 横向电场矢量分布

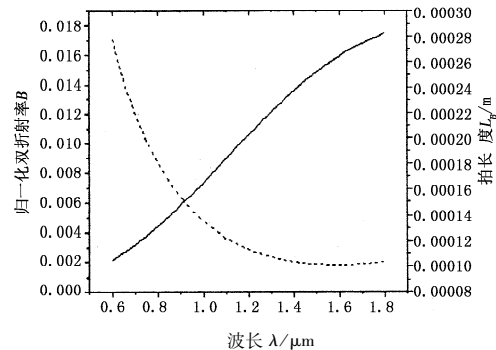
Fig.3 transverse-electric-field vector distributions of HE_{11}^x and HE_{11}^y modes

图4给出了PCF的模式有效折射率 n_{eff} 、归一化双折射率 B 、拍长度 L_B 随波长 λ 的变化关系。从图4(a)、图4(b)可以看出随着波长 λ 的增大,PCF的模式有效折射率 n_{eff} (无论是快轴还是慢轴)减小、

归一化双折射率 B 增大、拍长度 L_B 减小,在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长处PCF的归一化双折射率 $B = 1.5 \times 10^{-2}$,属于超高双折射光纤。



(a) PCF的模式有效折射率 n_{eff} 随波长 λ 的变化关系
(a) mode effective refractive index n_{eff} as a function of wavelength λ

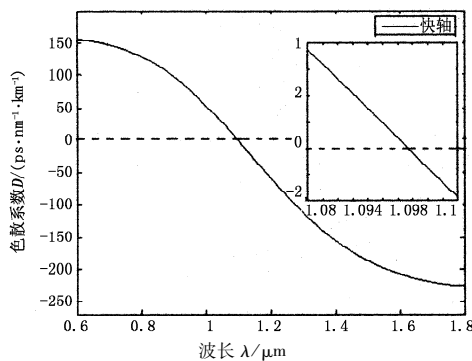


(b) 归一化双折射率 B 和拍长度 L_B 随波长 λ 的变化关系
(b) normalized birefringence B and beat length L_B as a function of wavelength λ

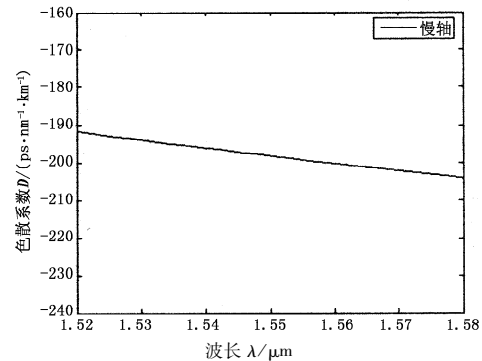
图4 PCF的模式有效折射率 n_{eff} ,归一化双折射率 B 和拍长度 L_B 随波长 λ 的变化关系
Fig.4 n_{eff}, B and L_B as a function of λ

图5给出了PCF色散系数 D 随波长 λ 的变化关系,由于光纤的基模模场主要局限在纤芯中,而内层空气孔对光纤的色散起主要作用^[11],从图5(a)、图5(c)可以看出,PCF的快轴模和慢轴模对应的色散曲线走向趋势一致,随着波长 λ 的增大,不管是快轴模还是慢轴模,色散系数 D 逐渐减小,

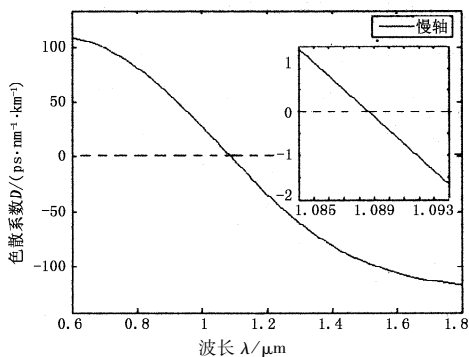
PCF的快轴模和慢轴模的零色散点对应的波长分别为 $1.096\ \mu\text{m}$ 和 $1.089\ \mu\text{m}$,这一点也说明了该PCF具有明显的双折射特性。从图5(b)、图5(d)可以看出在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长低损耗窗口附近($1.52\ \mu\text{m} \sim 1.58\ \mu\text{m}$)色散曲线呈现良好的色散平坦特性。



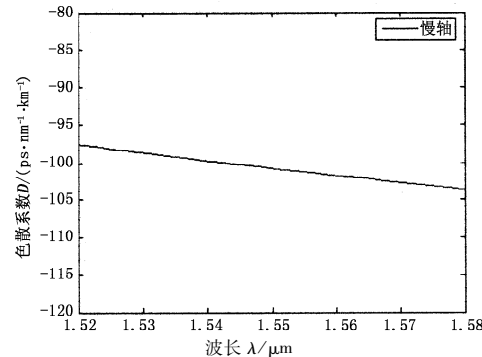
(a) PCF快轴模色散系数 D 随波长 λ 的变化关系



(b) 图(a)的局部放大



(c) PCF慢轴模色散系数 D 随波长 λ 的变化关系



(d) 图(c)的局部放大

图5 PCF快轴模和慢轴模色散系数 D 随波长 λ 的变化关系

Fig.5 GVD coefficient D as a function of wavelength λ of (a) fast-axis modes and (c) slow-axis modes, and the local enlargement of (a) and (c) are (b) and (d) respectively

图6给出了PCF限制损耗 L 随波长 λ 的变化关系,从图6(a)、图6(c)可以看出,随着波长 λ 的增大,不管是快轴模还是慢轴模,限制损耗 L 逐渐增大,PCF慢轴模的限制损耗要比快轴模的限制损耗小 10^{-4} 量级,在各自的零色散点波长处分别为 2.42×10^{-4} dB/km和 2.34×10^{-8} dB/km,从图6

(b)、图6(d)可以看出,该PCF的快轴模和慢轴模在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处限制损耗分别为 4.23×10^{-1} dB/km和 3.96×10^{-5} dB/km,可见该PCF结构具有极低的限制损耗,即这种结构的光纤可以在空气孔层数较少的情况下,实现极低的限制损耗。

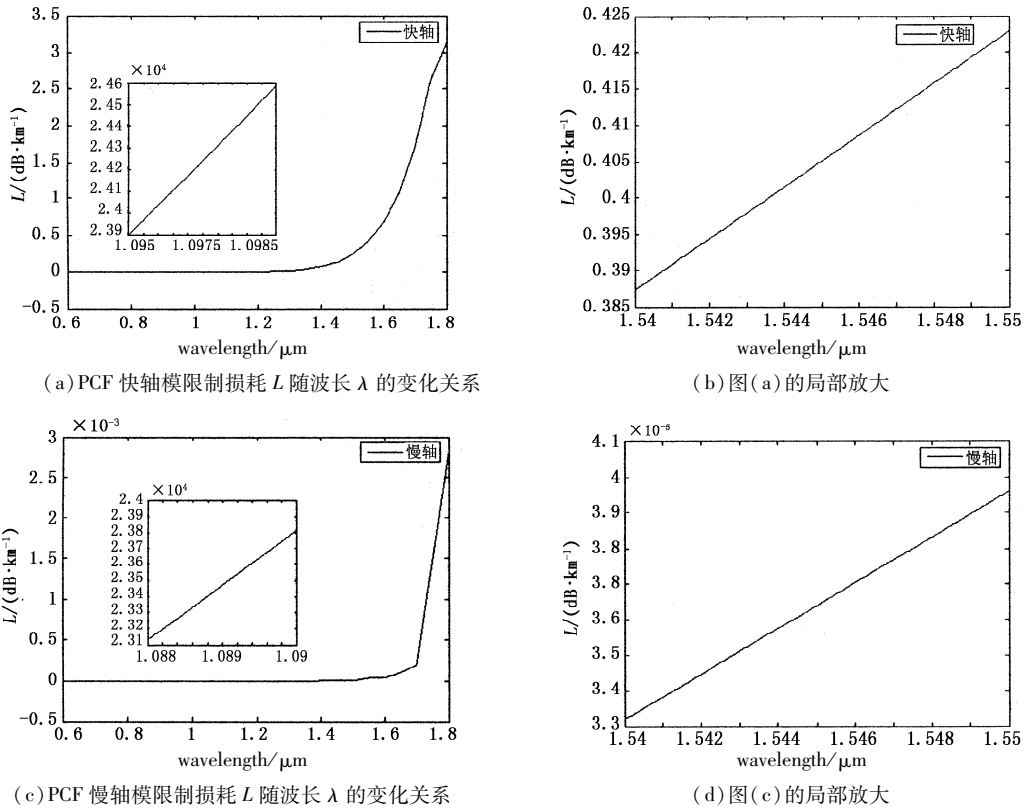
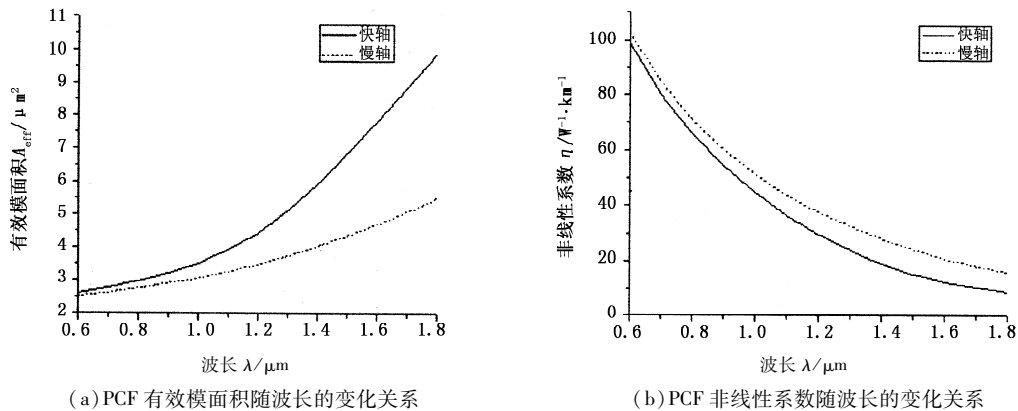


图6 PCF快轴模和慢轴模限制损耗 L 随波长 λ 的变化关系

Fig. 6 confinement loss L as a function of wavelength λ of (a) fast-axis modes and (c) slow-axis modes, and the local enlargement of (a) and (c) are (b) and (d) respectively

图7给出了PCF有效模面积 A_{eff} 和非线性系数 γ 随波长 λ 的变化关系,从图中可以看出,该PCF的快轴模和慢轴模在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处有效模面积 A_{eff} 分别为 $7.34 \mu\text{m}^2$ 和 $4.53 \mu\text{m}^2$,非线性系数 γ 分

别为 $13.9 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ 和 $22.4 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$,可见该PCF结构具有较高的非线性系数,另外,利用一些具有高非线性效应的材料(例如 Bi_2O_3 glass)代替石英作为基质,可实现更高的非线性系数。



(a) PCF有效模面积随波长的变化关系

(b) PCF非线性系数随波长的变化关系

图7 PCF有效模面积 A_{eff} 和非线性系数 γ 随波长 λ 的变化关系

Fig. 7 effective mode area A_{eff} and nonlinear coefficient γ as a function of wavelength λ

4 结 论

本文提出了一种在纤芯引入四个近矩形排列的椭圆空气孔,包层空气孔呈阶梯结构的高双折射光子晶体光纤,并利用全矢量有限元方法,对光纤基模的模场分布、双折射、色散、限制损耗、有效模面积及非线性系数等特性进行了数值模拟。高双折射光子晶体光纤在高速通信领域将扮演重要角色,本文的计算和分析为获得高双折射光子晶体光纤提供了一种新的方法,对设计高双折射光子晶体光纤具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] J C Knight, T A Birks, P S J Russell, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21(19):1547 - 1549.
- [2] A Ortigosa-Blanch, J C Knight, W J Wadsworth, et al. Highly birefringent photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25(18):1325 - 1327.
- [3] He Zhongjiao. Highly birefringent photonic crystal fibers based on micro-structured fiber core of elliptical holes [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(7):1216 - 1218. (in Chinese)
何忠蛟. 基于椭圆孔微结构纤芯的高双折射光子晶体光纤[J]. *光子学报*, 2007, 36(7):1216 - 1218.
- [4] Zhang Mingming, Ma Xiurong, Cao Ye. Study on high birefringence photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(6):1127 - 1129. (in Chinese)
张明明, 马秀荣, 曹晔, 等. 高双折射光子晶体光纤研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(6):1127 - 1129.
- [5] Yue Yang, Kai Guiyun, Wang Zhi, et al. Highly birefringent elliptical-hole photonic crystal fiber with squeezed hexagonal lattice [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(5):469 - 471.
- [6] Ju Jian, Jin Wei, M Suleyman Demokan. Design of single-polarization single-mode photonic crystal fiber at 1.30 and 1.55 μm [J]. *Journal of lightwave technology*, 2006, 24(2):825 - 830.
- [7] An Lin, Zheng Zheng, Li Zheng, et al. Ultrahigh birefringent photonic crystal fiber with ultralow confinement loss using four airholes in the core [J]. *Journal of lightwave technology*, 2009, 27(15):3175 - 3180.
- [8] W Belardi, G Bouwmans, L Provino, et al. Form-induced birefringence in elliptical hollow photonic crystal fiber with large mode area [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, 41(12):1558 - 1564.
- [9] N A Issa, M A van Eijkelenborg, M Fellow, et al. Fabrication and study of microstructured optical fibers with elliptical holes [J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29(12):1336 - 1338.
- [10] Lou Shuqin, Ren Guobin, Yan Fengping, et al. Dispersion and polarization properties of near-rectangle core photonic crystal fibers [J]. *Chin. Phys. Soc.*, 2005, 54(3):1229 - 1234. (in Chinese)
娄淑琴, 任国斌, 延凤平, 等. 类矩形芯光子晶体光纤的色散与偏振特性 [J]. *物理学报*, 2005, 54(3):1229 - 1234.
- [11] Li Shuguang, Xing Guanglong, Zhou Guiyao, et al. Numerical simulation of square-lattice photonic crystal fiber with high birefringence and low confinement loss [J]. *Chin. Phys. Soc.*, 2006, 55(1):238 - 243. (in Chinese)
李曙光, 邢光龙, 周桂耀, 等. 空气孔正方形排列的低损耗高双折射光子晶体光纤的数值模拟 [J]. *物理学报*, 2006, 55(1):238 - 243.
- [12] Zhou Guiyao, Hou Zhiyun, Li Shuguang, et al. Fabrication of glass photonic crystal fibers with a die-cast process [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(18):4433 - 4436.
- [13] M Szpulak, G Statkiewicz, J Olszewski, et al. Experimental and theoretical investigations of birefringent holey fibers with a triple defect [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(13):2652 - 2658.
- [14] Na Issa, Ma van Eijkelenborg, M Fellow, et al. Fabrication and study of microstructured optical fibers with elliptical holes [J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29(12):1336 - 1338.
- [15] Masanori Koshiba, Kunimasa Saitoh. Finite-element analysis of birefringence and dispersion properties in actual and idealized holey-fiber structures [J]. *Appl. Opt.*, 2003, 42(31):6267 - 6275.
- [16] Zhang Fangdi, Liu Xiaoyi, Zhang Min, et al. A full-vector FEM model and its application to optical waveguides and photonic crystal fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(2):209 - 215. (in Chinese)
张方迪, 刘小毅, 张民, 等. 全矢量有限元模型及其在光波导和光子晶体光纤中的应用 [J]. *光子学报*, 2007, 36(2):209 - 215.