

# 高双折射光子晶体光纤研究\*

张明明<sup>1,2</sup>, 马秀荣<sup>1,2</sup>, 曹晔<sup>1,2</sup>, 岳洋<sup>3</sup>, 王力维<sup>1,2</sup>

(1 天津理工大学 电子信息与通信工程学院, 天津 300191)

(2 天津理工大学 薄膜电子与通信器件天津市重点实验室, 天津 300191)

(3 南开大学 光学所, 天津 300071)

**摘 要:**设计了一种高双折射光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF), 即增大两个与纤芯相邻的空气孔直径, 使光纤只具有二重对称性, 呈现出较高的双折射. 通过压缩  $x$  轴方向孔间距, 进一步增大双折射度. 采用全矢量有限单元法(Finite-element Method, FEM), 研究了该光子晶体光纤基模对应的相双折射和群双折射, 给出了该高双折射 PCF 双折射随输入光波长的变化曲线. 结果获得了  $10^{-3}$  量级的高双折射. 具有设计参量的该光子晶体光纤结构的相双折射在 1 550 nm 处可以达到  $5.0 \times 10^{-3}$ , 在更长的波长处, 这一值会更高.

**关键词:**光纤通信; 光子晶体光纤(PCF); 有限元法; 高双折射

**中图分类号:** TN929.11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2008)06-1126-4

## 0 引言

光子晶体光纤, 又被称为微结构光纤(Microstructured Optical Fiber, MOF)或多孔光纤(Holey Fiber, HF). 近年来, 光子晶体光纤由于其独特的光学特性如: 无尽单模; 高非线性; 可控色散; 高双折射等<sup>[1-4]</sup> 而引起了光纤研究人员的广泛关注. 折射率导模型光子晶体光纤(TIR-PCF)包层的有效折射率低于纤芯材料折射率, 其导光机制为全内反射. 包层周期性排列着空气孔, 使得包层的等效折射率比芯区低, 并且在制作过程可以灵活采用对称或非对称型结构, 为实现高双折射特性提供了新的可能. 通过改变部分周期性空气孔的形状、大小、孔间距以及孔的分布方式, 可以制作极高双折射的 PCF<sup>[4-5]</sup>. 高性能的保偏光纤在高速光通信系统、光子器件的偏振保持尾纤及光纤陀螺仪偏振保持光纤环等领域有极其广泛的应用前景.

对于光子晶体光纤人们已提出了多种理论分析方法, 目前最常用的全矢量数值方法包括平面波展开方法<sup>[6]</sup>、局域函数法<sup>[7]</sup>、多极方法<sup>[8]</sup>、有限差分法<sup>[9]</sup>及有限元方法(FEM)<sup>[10-11]</sup>等. 在众多方法中, 有限元法适用于截面是任意不规则形状、空气孔任意排布、材料折射率任意组合的情况, 计算结果也比较准确, 能够对光纤的偏振特性和色散特性进行很

好地阐述. 本文采用全矢量有限元法对 TIR-PCF 进行模拟计算, 分析在纤芯处引入两个大圆空气孔的压缩栅格结构光子晶体光纤特性. 分析结果表明, 具有设计参量的该光子晶体光纤结构的相双折射在 1 550 nm 处可以达到  $5.0 \times 10^{-3}$ .

## 1 有限元法计算原理

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;  $\epsilon_r$  和  $\mu_r$  分别是介质的介电常量和磁导率. 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量  $\beta$ . 有限元分析的基本步骤为: 1) 确定实际问题所定义的区域、激励和边界条件, 根据具体情况决定问题的描述方程, 建立正确的模型; 2) 设定子区域、激励和边界条件; 3) 对整个计算区域离散化, 即将区域用节点和有限元(通常为三角形)来表示; 4) 对方程进行求解; 5) 进行解后处理.

## 2 数值模拟

高双折射 PCF 截面结构如图 1(a). 该光纤由石英材料-空气孔包层组成, 采用等腰三角形栅格结构排列空气孔, 并增大沿  $x$  轴的两个与纤芯相邻的空气孔的直径. 由于该光纤结构具有几何对称性, 可以只对其 1/4 结构(图 1(b))进行有效的数值模拟. 其中, 小孔孔径为  $d_1$ , 大孔孔径为  $d_2$ ,  $x$  和  $y$  方向的空气孔间距分别为  $\Delta_x$  及  $\Delta_y$ . 包层中引入两种尺寸的空气孔, 降低了光纤的对称性, 使光纤只有二重对称

\*教育部重点项目(206006)、天津市自然科学基金重点项目(07JJCZDJ06000)和天津市高等学校科技发展基金(2006BA30)资助

Tel: 022-23679368 Email: zhangmm\_59@163.com

收稿日期: 2007-06-14

性. 光纤中基模的两个正交偏振模式简并被打破, 分裂成两个不简并的偏振模式, 成为双折射光纤.

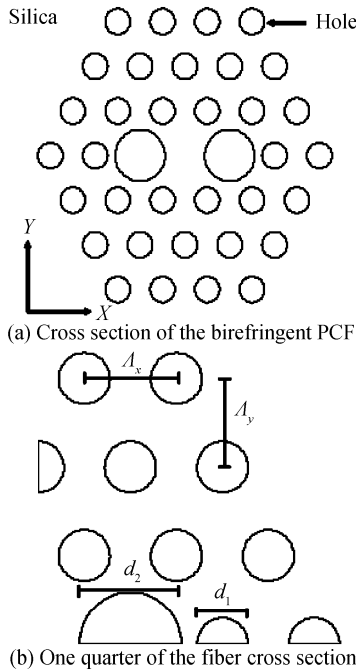


图 1 高双折射 PCF 与 1/4 光纤截面图  
Fig. 1 Cross section of birefringent PCF and one quarter of the fiber cross section

文中采用全矢量有限单元法计算所设计的 PCF 两个正交偏振方向上基模的传播常量, 并对其双折射和色散特性进行研究. 模型中石英玻璃的折射率通过 Sellmeier 公式求得<sup>[12]</sup>, 空气孔的折射率定为 1, 相双折射  $B$  和群双折射  $G$  分别为

$$B(\lambda) = \frac{\lambda}{2\pi}(\beta_y(\lambda) - \beta_x(\lambda)) \quad (2)$$

$$G(\lambda) = \frac{d\beta_y}{dk} - \frac{d\beta_x}{dk} = B(\lambda) - \lambda \frac{dB(\lambda)}{d\lambda} \quad (3)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$  是真空波数;  $\beta_x$  和  $\beta_y$  分别是两个垂直偏振方向的传播常量;  $\lambda$  是光波长. 相双折射  $B$  与拍长  $L = \lambda/B(\lambda)$  紧密相关, 群双折射  $G$  与偏振模色散 (Polarization Mode Dispersion, PMD)  $\tau$  的关系可以表示为

$$\tau = G/c \quad (4)$$

式中  $c$  为真空中光速.

PCF 中的色散系数  $D$  可以表示为

$$D = \frac{d\beta_i}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_i \quad (i = x, y) \quad (5)$$

式中  $\beta_m = (d^m \beta / d\omega^m)_{\omega=\omega_0}$ , ( $m = 0, 1, 2, \dots$ );  $\omega$  是角频率;  $\omega_0$  是中心频率;  $i$  是偏振方向. 由于本文数值模拟过程中, 石英玻璃的折射率是通过 Sellmeier 公式求得, 已经考虑到材料色散的影响, 因此式 (5) 所得色散是材料色散和波导色散之和即总色散.

### 3 光纤特性分析

文献<sup>[13]</sup>研究了增大沿  $x$  轴的两个与纤芯相

邻的空气孔对提高光子晶体光纤双折射的作用, 对栅格  $x$  方向间距的变化对压缩栅格结构光子晶体光纤双折射的影响也进行了理论分析<sup>[14]</sup>. 本文考虑上述两种因素同时作用于 PCF 时对其双折射性能的影响. 首先, 选取正三角形栅格结构排列作为参考模型. 结构参量为:  $\Delta_x = 2.2 \mu\text{m}$ ,  $\Delta_y = 3^{1/2}/2 \times 2.2 \mu\text{m}$ ,  $d_1 = 1/2 \times 2.2 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 2.2 \mu\text{m}$ . 固定空气孔尺寸, 通过改变  $x$  方向空气孔间距来观察 PCF 双折射的变化.

图 2 是不同  $\Delta_x$  ( $\Delta_y = 3^{1/2}/2 \times 2.2 \mu\text{m}$ ) 对应相双折射和群双折射随归一化波长的变化曲线. 从图 2 (a) 中可以看到, 这 5 条相双折射曲线都随着波长的增加而单调递增, 这个趋势和引入两个大圆空气孔光子晶体光纤双折射的变化趋势一致<sup>[13]</sup>. 图中点线 ( $\Delta_x = 2.2 \mu\text{m}$ ) 为常见的正三角形栅格结构排列, 虚线、实线和点划线、双点划线分别代表把  $x$  方向空气孔间距减小到  $0.95 \times 2.2 \mu\text{m}$ ,  $0.9 \times 2.2 \mu\text{m}$  和增加到  $1.05 \times 2.2 \mu\text{m}$ ,  $1.15 \times 2.2 \mu\text{m}$  时所对应的相双折射曲线. 从这 5 条曲线的变化趋势可以看出, 压缩  $x$  方向空气孔间距可以进一步增大相双折射, 相反增大  $x$  方向空气孔间距会导致相双折射的减小. 这是因为  $\Delta_x$  的减小使得  $y$  与  $x$  偏振方向的有效折射率差进一步增大, 而  $\Delta_x$  的增大使得  $y$  与  $x$  偏振方向的有效折射率差变小.

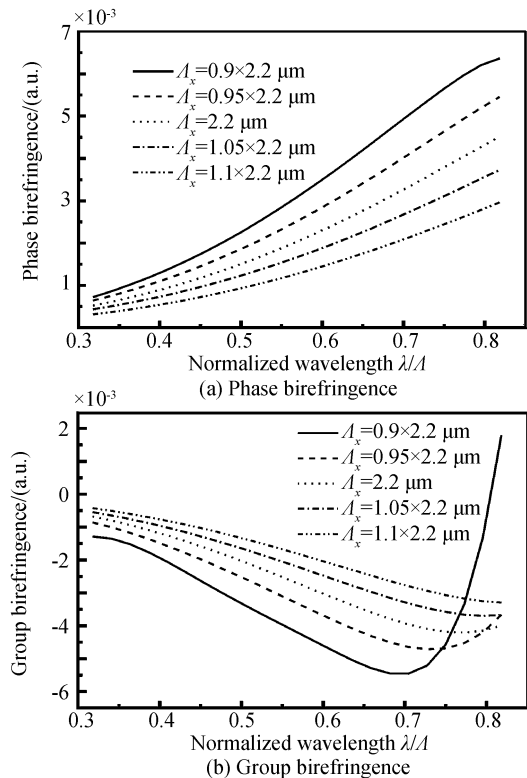


图 2 相双折射和群双折射随归一化波长的变化曲线  
Fig. 2 Phase and group birefringence as a function of normalized wavelength of the high birefringence PCF

从图 2(b)中可以看到,群双折射与相双折射同是在  $10^{-3}$  量级,但符号相反. 5 条群双折射曲线在短波长随波长的增加而递减,这个趋势和引入两个大圆空气孔光子晶体光纤双折射的变化趋势一致<sup>[13]</sup>; 而 5 条群双折射曲线在长波长随波长的增加而递增. 从这 5 条曲线的变化趋势可以看出,在短波长处压缩  $x$  方向空气孔间距使群双折射曲线绝对值增大,而增大  $x$  方向空气孔间距使群双折射曲线绝对值减小; 在长波长处随压缩  $\Lambda_x$  群双折射出现拐点的波长越来越小,相反增大  $\Lambda_x$  群双折射出现拐点的波长越来越大. 值得关注的是,当  $\Lambda_x = 0.9 \times 2.2 \mu\text{m}$  时,在归一化波长接近 0.8 处该 PCF 群双折射为 0. 根据式(4),群双折射与 PMD 成正比关系,可以利用这个特性来设计 PCF 的结构参量,以达到减小甚至消除 PMD 的目的.

此外,当压缩  $\Lambda_x$  为原空气孔间距 0.9 倍时,发现该结构的光纤在色散上表现出了一些特殊的性质.

图 3 是不同  $\Lambda_x$  ( $\Lambda_y = 3^{1/2}/2 \times 2.2 \mu\text{m}$ ) 对应  $x$  偏振方向与  $y$  偏振方向的色散随归一化波长的变化曲线. 当  $\Lambda_x = 2.2 \mu\text{m}$  时,在波长较短时, $x$  偏振方向与  $y$  偏振方向的色散随归一化波长的变化曲线基本重合,这是由于光纤的基模模场主要局域在纤芯中. 随着波长的增大,模场逐渐向包层扩散,越来越多地受到最内层空气孔的影响,两个偏振方向上的色散差距逐渐增大. 可见内层空气孔对色散起主要

作用. 在归一化波长小于 0.65 范围内, $x$  偏振方向的 5 条色散曲线与  $y$  偏振方向的 5 条色散曲线均随着波长的增加而单调递增; 归一化波长大于 0.65, $x$  偏振方向与  $y$  偏振方向压缩  $\Lambda_x$  的 2 条曲线随波长的增加而单调递减,且随着  $\Lambda_x$  的压缩色散变小. 从图 3 中还可以看出,在长波长处  $x$  偏振方向出现大的负色散,而相同波长处  $y$  偏振方向为正色散,这样的色散特性可用于单一偏振方向上的色散补偿.

## 4 结论

本文提出了一种在纤芯处引入两个大圆空气孔的压缩栅格结构高双折射光子晶体光纤,并利用全矢量有限单元法对该光纤的双折射及色散特性进行了分析. 数值分析结果表明,选取  $\Lambda_x = 0.9 \times 2.2 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_y = 3^{1/2}/2 \times 2.2 \mu\text{m}$ ,  $d_1 = 1/2 \times 2.2 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 2.2 \mu\text{m}$  的该结构光子晶体光纤具有以下特性: 1) 该 PCF 在 1550 nm 可以获得  $5.0 \times 10^{-3}$  的相双折射,在更长的波长,这一值将进一步增大; 2) 利用在归一化波长接近 0.8 处该 PCF 群双折射为 0 的特性,设计 PCF 的结构参量,可减小甚至消除 PMD; 3) 该 PCF 在长波长处  $x$  偏振方向出现大的负色散,而相同波长处  $y$  偏振方向为正色散的色散特性可用于单一偏振方向上的色散补偿.

## 参考文献

- [1] BIRKS T A, KNIGHT J C, RUSSELL P St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt Lett*, 1997, **22**(13): 961-963.
- [2] LI Chun-lei, SHENG Qiu-qin. The relation between the nonlinear coefficient of PCF and its geometry parameters and the optical wavelength[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 734-737.  
李春雷, 盛秋琴. 光子晶体光纤非线性系数与其结构参量及光波长的关系[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 734-737.
- [3] WU Wei-qing, CHEN Xiong-wen, ZHOU Hui, et al. Investigation of the ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers with hybrid cores[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 109-113.  
吴维庆, 陈雄文, 周辉, 等. 混合纤芯光子晶体光纤超平坦色散的研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 109-113.
- [4] HE Zhong-jiao. Highly birefringent photonic crystal fibers based on micro-structured fiber core of elliptical holes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1215-1218.  
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): 1215-1218.
- [5] LIU Y C, LAI Y. Optical birefringence and polarization dependent loss of square and rectangular lattice holey fibers with elliptical air holes; numerical analysis[J]. *Opt Express*, 2005, **13**(1): 225-235.
- [6] FERRANDO A, SILVESTRE E, MIRET J J, et al. Vector description of higher order modes in photonic crystal fibers[J].

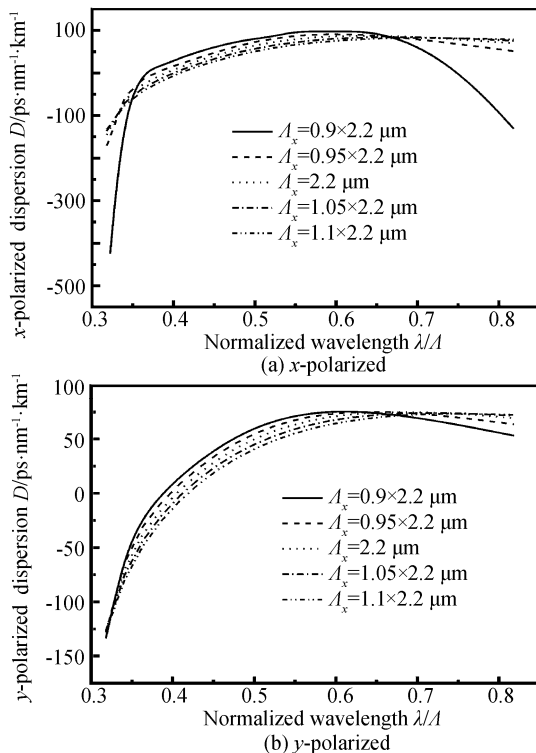


图 3  $x, y$  偏振方向色散随归一化波长的变化曲线  
Fig. 3  $x, y$ -polarized dispersion as a function of normalized wavelength of the high birefringence PCF

- J Opt Soc Am A*, 2000, **17**(7):1333-1340.
- [7] MONRO T M, RICHARDSON D J, *et al.* Hole optical fibers: an efficient modal model[J]. *Lightwave Technology*, 1999, **17**(6):1093-1102.
- [8] WHITE T P, KUHLMEY B T, PHEDRAN R C M, *et al.* Multipole method for micro-structured optical fibers. I. Formulation[J]. *J Opt Soc Am B*, 2002, **19**(10):2322-2330.
- [9] QIU M. Analysis of guided modes in photonic crystal fibers using the finite difference time domain method[J]. *Opt Technol Lett*, 2001, **30**(5):327-330.
- [10] BRECHET F, MARCOU J, PAGNOUX D, *et al.* Complete analysis of the characteristic of propagation into photonic crystal fibers by the finite element method[J]. *Opt Fiber Technol*, 2000, **6**(2):181-191.
- [11] ZHANG Fang-di, LIU Xiao-yi, 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.  
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.
- [12] AGRAWAL G P. *Nonlinear Fibre Optics* [M]. 2nd ed. London: Academic, 1995.
- [13] SUZUKI K, KUBOTA H, KAWANISHI S, *et al.* Optical properties of a low-loss polarization-maintaining photonic crystal fiber[J]. *Opt Express*, 2001, **9**(13):676-680.
- [14] ZHANG L, YANG C X. Photonic crystal fibers with squeezed hexagonal lattice[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(11):2371-2376.

## Study on High Birefringence Photonic Crystal Fiber

ZHANG Ming-ming<sup>1,2</sup>, MA Xiu-rong<sup>1,2</sup>, CAO Ye<sup>1,2</sup>, YUE Yang<sup>3</sup>, WANG Li-wei<sup>1,2</sup>

(1 College of Electronics Information and Communication Engineering,  
Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China)

(2 Tianjin Key Laboratory of Film Electronic and Communication Device, Tianjin 300191, China)

(3 Institute of Modern Optics of Nankai University, Tianjin 300071, China)

Received date: 2007-06-14

**Abstract:** A kind of high birefringence photonic crystal fiber (PCF) was proposed. Enlarging two of the central air holes, the fiber has twofold symmetry and appears the high birefringence. By squeezing the air hole lattice, the modal birefringence of such a PCF can be further enhanced. The phase and group birefringence of the fundamental mode in such a PCF are studied by using a full-vector finite-element method, and the curves showing the relation between the birefringence of this PCF and the wavelength of the input light are given. The high modal birefringence with magnitude of order of  $10^{-3}$  has been obtained. The phase modal birefringence of such a PCF with the parameters calculated can reach  $5.0 \times 10^{-3}$  at 1 550 nm and even higher at longer wavelength.

**Key words:** Fiber communication; Photonic crystal fiber (PCF); Finite-element method; High birefringence



**ZHANG Ming-ming** was born in 1983. She received the B. S. degree from College of Electronics Information and Communication Engineering, Tianjin University of Technology in 2005. Now she is pursuing her M. S. degree. Her research interest is the optical passive devices in optical fiber communication system.