

高对称性模场分布的高双折射光子晶体光纤

黎 薇 陈 辉 陈 明

(桂林电子科技大学信息与通信学院光电技术研究所, 广西 桂林 541004)

摘要 设计了一种具有高对称性模场分布的高双折射光子晶体光纤(PCF)结构,由尺寸相同的椭圆空气孔菱形排列组成。利用全矢量有限元法对该种结构光子晶体光纤的基模场分布、有效模场面积、双折射和色散进行数值分析,所得结果与相同结构参数的圆形空气孔光子晶体光纤进行比较。这两种光纤的模场均具有高对称性,近似圆形,并且易于与光器件中其他光纤耦合。椭圆空气孔光子晶体光纤的双折射可达 10^{-3} 。

关键词 光纤光学;全矢量有限元;光子晶体光纤;模场;高双折射

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0205002

High Symmetry of the Mode Field Distribution Photonic Crystal Fiber with High Birefringence

Li Wei Chen Hui Chen Ming

(Photoelectric Technology Research Institute and School of Information and Communication,
Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract A high symmetry of the mode field distribution and high birefringent photonic crystal fiber (PCF) is presented, with uniform size of ellipse air holes arranging like diamond. A full-vector finite element method is used to simulate the fundamental mode field distribution, effective mode area, birefringence and dispersion. Circle air-holes PCF with the same parameters are also computed to compare with it. Both of the fibers have high symmetry mode field and nearly circular, which makes it couple with other fibers in optical devices easily. It achieves high birefringence of elliptical air-holes PCF up to 10^{-3} .

Key words fiber optics; full-vector finite element method; photonic crystal fiber; mode area; high birefringence

OCIS codes 060.2280; 060.2310; 060.5295; 000.4430

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)又叫微结构光纤,是一种包层由介质中周期排列的波长量级微小空气孔构成的新型光纤,因其比较容易利用上述结构实现对光纤的模式、色散、双折射及非线性进行设计和优化而引起研究者的广泛关注。PCF包层中周期排列着空气孔,利用光纤的几何结构的不对称性可形成高双折射PCF,即通过破坏PCF纤芯或包层结构的几

何对称性在光纤中产生双折射,如改变空气孔的形状、大小或位置^[1]。但是,使用不同大小的空气孔或者多边形纤芯PCF实现PCF的高双折射时,往往导致其模场不规则,与高对称性模场相比减小同普通光纤的耦合效率^[2~11]。

针对以上问题,本文设计了一种高对称模场分布的PCF,将尺寸相同的椭圆空气孔排列成菱形实现包层的不对称性达到高双折射。采用全矢量有限

收稿日期: 2011-09-06; **收到修改稿日期**: 2011-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(61077036)、广西自然科学基金青年基金(2011GXNSFB018069)和广西研究生教育创新计划(2010105950810M13)资助课题。

作者简介: 黎 薇(1986—),女,硕士研究生,主要从事光通信以及光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: liwei2041@163.com

导师简介: 陈 明(1979—),男,博士后,教授,主要从事光子晶体及功能器件、THz技术及微波光子技术等方面的研究。

E-mail: mchen@guet.edu.cn(通信联系人)

元法对该光纤结构的模场分布、双折射及色散特性进行数值模拟。同时设计一种相同排列的圆形空气孔 PCF 与其比较。

2 理论方法与模型

目前有很多方法设计光子晶体光纤,如多极法^[6,9,12]、全矢量频域有限差分法^[7]、频域有限差分法^[8]、时域有限差分法^[13]等。由于折射率导光型光子晶体光纤为阵列分布的空气孔洞分布在纤芯周围,相比于光子带隙型,设计更加灵活。因此,本文采用全矢量有限元法^[10,14~16],以折射率导光型 PCF 为基础进行数值分析。

有限元法是利用场函数的分段多项式近似模型,实现了从连续域到离散域的划分。这种方法对各种不同形状的区域都有较好的适应性,而且也是一种十分常见的解决复杂边界值问题的数值分析方法^[5,17,18]。利用有限元法来分析这种复杂结构的光子晶体光纤可以得到更好的结果。

由 Maxwell 方程,可以推导出全矢量电磁波方程为

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times E \right) - k_0^2 \epsilon_r E = 0, \quad (1)$$

式中 E 为电场强度, μ_r 和 ϵ_r 分别为介质相对磁导率和相对介电常数。为了获得更好的吸收并消除边界反射对结果的影响,采用各向异性完全匹配层作为边界条件^[3,18]。

椭圆空气孔 PCF 的结构设计如图 1 所示, a 和 b 分别为椭圆形空气孔的长短轴尺寸, $a=0.4 \mu\text{m}$, $b=1.2 \mu\text{m}$, Λ_a 和 Λ_b 分别为组成的单元菱形结构的空气孔间距, $\Lambda_a=1 \mu\text{m}$, $\Lambda_b=3 \mu\text{m}$, Λ_x 和 Λ_y 分别为

所组成单元菱形结构在 x, y 方向的间距, $\Lambda_x=2 \mu\text{m}$, $\Lambda_y=4 \mu\text{m}$ 。采用相同的方法设计圆形空气孔 PCF 的结构,为了更接近椭圆空气孔的面积,取圆形空气孔的直径为 $d=0.8 \mu\text{m}$,其他参数不变。 $\Lambda_a=1 \mu\text{m}$, $\Lambda_b=3 \mu\text{m}$, $\Lambda_x=2 \mu\text{m}$, $\Lambda_y=4 \mu\text{m}$ 。

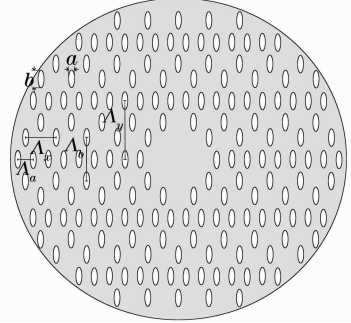


图 1 椭圆形空气孔 PCF 结构图

Fig. 1 Structural design of PCF with ellipse air-holes

3 PCF 特性分析

利用有限元法建立适当的模型,可以得到特征值传播常数 β 和有效折射率 n_{eff} ,进而得到光子晶体光纤的模场分布、有效模场面积、双折射特性以及色散等特性。

3.1 模场分布

图 2 所示为所设计的 PCF 在波长 $\lambda=1550 \text{ nm}$ 时基模电场等位线分布图,箭头表示电场的方向。图 2(a)~(d) 分别表示椭圆和圆形空气孔 PCF 分别在 x, y 两个偏振方向的模场分布。这两种 PCF 的模场均近似圆形,与其他形状的模场相比,更易于耦合。比较这两种结构的 PCF,椭圆形空气孔 PCF 对光的束缚能力弱于圆形空气孔 PCF。

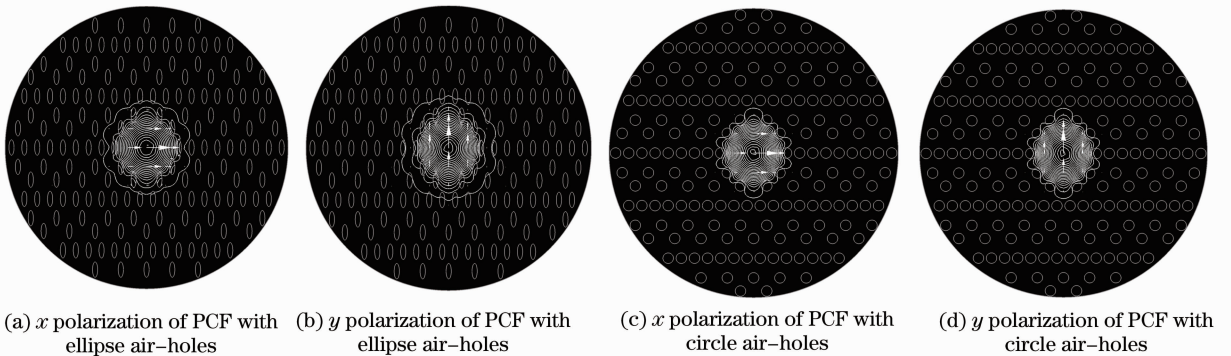


图 2 PCF 的模场分布

Fig. 2 Mode field distribution of PCF

3.2 有效模场面积

有效模场面积 A_{eff} 是光子晶体光纤的一个重要参数,定义为

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

式中 $F(x,y)$ 是光纤基模的模分布函数^[19]。根据(2)式计算,得到图3所示有效模场面积随波长的变化曲线。同一波长处,椭圆形空气孔 PCF 的有效模场面积较大。例如,对于波长 1550 nm,两种 PCF 的有效模场面积分别为 $6.92 \mu\text{m}^2$ 和 $6.39 \mu\text{m}^2$ 。圆形空气孔 PCF 相较于椭圆形空气孔更易于与其他光纤耦合。

3.3 双折射特性

高双折射光纤广泛用于偏振控制、精密的光纤传感器和光纤通信系统。与普通的保偏光纤相比,光子晶体光纤由于其设计的灵活性及结构的不对称性,可以得到更高的双折射^[5]。通常用模式双折射和拍长来表征其双折射特性。

模式双折射决定于两个本征偏振模的有效折射率之差^[5],即

$$B = |n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y|, \quad (3)$$

这两个正交偏振模之间的偏振拍长度为 $L_B = \lambda/B$ 。

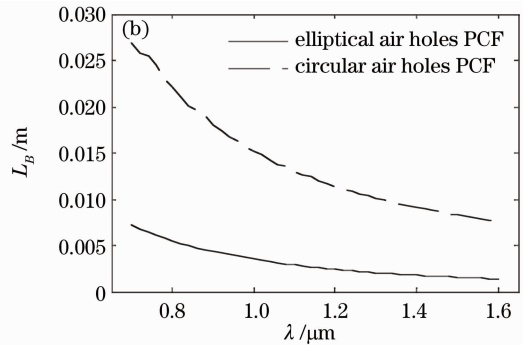
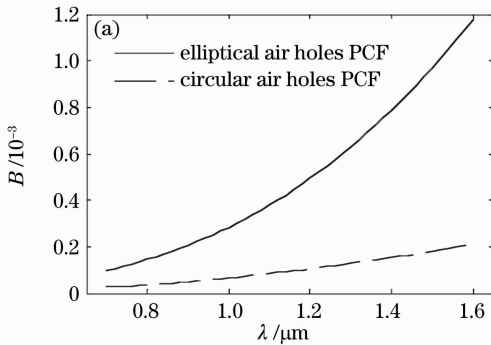


图4 两种 PCF 的双折射(a)和拍长(b)随波长的变化关系

Fig. 4 Birefringence (a) and beat length (b) of two PCFs versus wavelength

3.4 色散

色散是光纤的一个重要性能参数,也是光脉冲展宽的主要因素。在光纤通信系统、色散补偿以及非线性光学中,光子晶体光纤的色散控制也是十分重要的。

材料色散 D_m 是由光纤材料自身特性造成的。光纤通常采用纯石英材料,所以光子晶体光纤的材料色散 D_m 是相同的, D_m 可表示为

$$D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}, \quad (4)$$

严格来说,石英玻璃的折射率并不是一个固定的常数,而是不同的传输波长有不同的值。式中 c 是光在真空中的传播速度, λ 为光波长, n 可由 Sellmeier

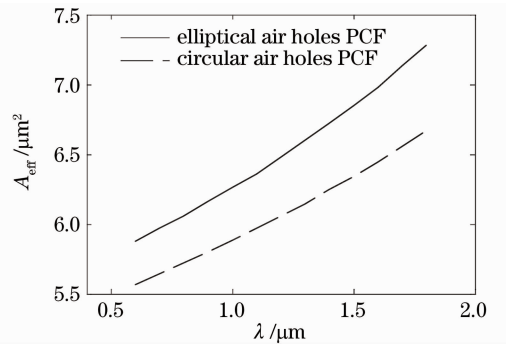


图3 有效模场面积与波长的关系曲线

Fig. 3 Relationship between the effective mode area and wavelength

图4所示为所设计的 PCF 的模式双折射和拍长随波长变化的关系曲线。由图4(a)可以看出,模式双折射随着波长的增大而增大;椭圆空气孔 PCF 的模式双折射明显比圆形空气孔 PCF 增长快,在波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 处两者的双折射分别为 1.07×10^{-3} 和 1.96×10^{-4} ,相差 1 个数量级。同时,由图4(b)可见,两者的拍长都是随着波长的增大而减小,但椭圆空气孔 PCF 的拍长较小。

公式来计算^[20]:

$$n^2 = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2}, \quad (5)$$

式中 Sellmeier 系数: $A_1 = 0.6961663$, $A_2 = 0.4079426$, $A_3 = 0.8974794$, $l_1 = 0.0684043$, $l_2 = 0.11622414$, $l_3 = 9.896161$ 。

色散 D 一般由基模的有效折射率与波长计算得到:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2}, \quad (6)$$

式中 n_{eff} 为不同波长对应光纤的有效折射率。根据(6)式可作色散关于波长的特性曲线如图5所示。

圆形空气孔 PCF 的色散较大,同一波长处,这

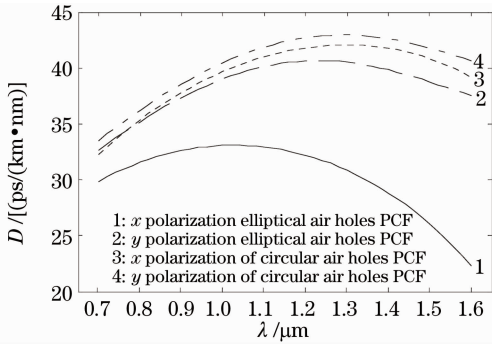


图 5 PCF 色散特性曲线

Fig. 5 Dispersion characteristic versus wavelength

两种 PCF 对应 y 偏振方向的色散均大于 x 方向。椭圆空气孔 PCF 的两偏振方向对应的色散差大于圆形空气孔,这也体现出椭圆空气孔 PCF 的高双折射特性。

4 结 论

提出一种相同尺寸空气孔菱形排列的 PCF 结构,利用全矢量有限元法分别对椭圆、圆形空气孔 PCF 进行数值模拟。分析表明,椭圆空气孔 PCF 与圆形空气孔 PCF 的模场均近似圆形,使其在和其他光纤连接时,可以降低由于模式不匹配引起的损耗。虽然前者对光的限制能力较弱,但是前者的双折射远大于后者,可达 10^{-3} 。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhi. Study on Photonic Crystal Fibers and Their Functional Devices[D]. Tianjin: Nankai University, 2005. 52~55
- 王 志. 光子晶体光纤及其功能器件的研究[D]. 天津: 南开大学, 2005. 52~55
- 2 Wang Dan, Zheng Yi. Numerical simulation and analysis of double cladding photonic crystal fiber with flattened dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806010
- 王 丹, 郑 义. 双包层色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806010
- 3 T. Yang, L. Shen, Y. Chau *et al.*. Highly birefringent and low loss circular air-holes photonic crystal fiber using complex unit cells in cladding[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**: 4334~4338
- 4 Lin An, Zheng Zheng, Zheng Li *et al.*. Ultrahigh birefringent photonic crystal fiber with ultralow confinement loss using four airholes in the core[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(15): 3175~3180
- 5 H. Ademgil, S. Haxha. Highly birefringent photonic crystal fibers with ultralow chromatic dispersion and low confinement losses[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(4): 441~448
- 6 Yang Qianqian, Hou Lantian. Octagonal photonic crystal fiber of birefringence [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58** (12): 8345~8351
- 杨倩倩, 侯蓝田. 八边形结构的双折射光子晶体光纤[J]. *物理学报*, 2009, **58**(12): 8345~8351
- 7 Zhang Xiaojuan, Zhao Jianlin, Hou Jianping. A novel photonic crystal fiber with high birefringence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(8): 4668~4676

- 张晓娟, 赵建林, 侯建平. 一种新型高双折射光子晶体光纤[J]. *物理学报*, 2007, **56**(8): 4668~4676
- 8 M. Chen, S. Yang, F. Yin *et al.*. Design of new type high birefringence photonic crystal fiber[J]. *Optoelectronics Letters*, 2008, **4**(1): 19~22
- 9 Li Shuguang, Xing Guanglong, Zhou Guiyao *et al.*. Numerical simulation of square-lattice photonic crystal fiber with high birefringence and low confinement loss[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(1): 238~243
- 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
- 10 Y. Yue, G. Kai, Z. Wang *et al.*. Highly birefringent elliptical-hole photonic crystal fiber with two big circular air holes adjacent to the core[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(24): 2638~2640
- 11 Y. Chau, C. Liu. Ultrahigh birefringence with ultralow confinement loss of photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photonic and Optoelectronic.*, 2010, **7**(8): 1~4
- 12 Hou Yu, Zhou Guiyao, Hou Lantian *et al.*. Analysis of dispersion properties of octagonal structural photonic crystal fiber with double cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37** (4): 1068~1072
- 侯 宇, 周桂耀, 侯蓝田 等. 八边形双包层光子晶体光纤色散特性分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1068~1072
- 13 Ritu Sharma, Vijay Janyani, Anuradha Sharma. Design of elliptical air hole PCF with hybrid square lattice for high birefringence and a lower zero dispersion wavelength [J]. *International Journal of Computer Science & Emerging Technologies*, 2011, **2**(2): 238~241
- 14 Yang Yue, Guiyun Kai, Zhi Wang *et al.*. Highly birefringent elliptical-hole photonic crystal fiber with squeezed hexagonal lattice[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(5): 469~471
- 15 Geng Pengcheng, Zhang Weigang, Zhang Shanshan *et al.*. Design of new type single-polarization single-mode photonic crystal fiber with wide bandwidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0706001
- 耿鹏程, 张伟刚, 张珊珊 等. 新型宽带单偏振单模光子晶体光纤的设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0706001
- 16 Zhou Qinling, Lu Xingqiang, Zhang Guang *et al.*. Mode characteristics of a large mode area flattened-mode photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1497~1500
- 周秦岭, 卢兴强, 张 光 等. 大模面积平顶模场光子晶体光纤模式分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1497~1500
- 17 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
- 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
- 18 K. Saitoh, M. Koshiba. Numerical modeling of photonic crystal fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(11): 3580~3590
- 19 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*, Fourth Edition & Application of Nonlinear Fiber Optics[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong Transl.. Second Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 25~28
- Govind P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 贾东方, 余震虹 译. 第三版. 北京: 电子工业出版社, 2010. 25~28
- 20 T. X. Guofen. *Waves Engineering*[M]. Wang Yougong Transl. Beijing: Science Press, 2002. 186~187
- 国分泰雄. *光波工程*[M]. 王友功 译. 北京: 科学出版社, 2002. 186~187