

文章编号:1004-4213(2011)04-0583-4

# 矩形孔光子晶体光纤

何忠蛟

(浙江工商大学 信息与电子工程学院,杭州 310035)

**摘 要:**采用全矢量有限元方法和完美匹配层条件,研究了一种在光纤包层中引入矩形孔的光子晶体光纤,提出一种实现高双折射光子晶体光纤的方法.模拟结果表明矩形孔光子晶体光纤具有椭圆孔光子晶体光纤类似的高双折射特性,其双折射高达 0.01 的量级,两种光子晶体光纤的模场、双折射、约束损耗等特性基本类似.

**关键词:**光子晶体光纤;矩形孔;双折射;有限元方法

**中图分类号:** TN25

**文献标识码:** A

**doi:** 10. 3788/gzxb20104004. 0583

## 0 引言

光子晶体光纤由于其在光纤通信、光信息处理、光纤传感、光纤光源等方面的重要应用引起了人们的广泛关注<sup>[1-8]</sup>.特别是作为一种在光纤通信、光纤激光器、光纤滤波器及光纤传感等方面有重要应用价值的高双折射光子晶体光纤是当前研究的热点之一<sup>[9-12]</sup>.目前,国内外已经有多种实现高双折射光子晶体光纤的方法<sup>[13-18]</sup>.之前报道的高双折射光子晶体光纤均为圆孔或者椭圆孔光子晶体光纤,可以归纳为两种:一种是基于非对称的光纤纤芯结构,通常采用光子晶体结构中双缺陷或三缺陷来设计实现高双折射光子晶体光纤<sup>[13-15]</sup>;另一种是基于非对称的光纤包层结构,典型的设计是在光纤包层引入椭圆空气孔<sup>[16-18]</sup>.目前还没有文献报道高双折射的矩形孔光子晶体光纤.

在本文中,研究了在光纤包层中引入矩形孔的光子晶体光纤,同时提出了实现高双折射光子晶体光纤的方法.据我们所知,这是第一次提出具有高双折射的矩形孔结构的光子晶体光纤,为获得高双折射光子晶体光纤提供了新的方法.矩形孔光子晶体光纤由于其矩形孔长宽参量的可控性,可以灵活地实现各种特性的设计.

## 1 光子晶体光纤结构

本文提出的矩形孔光子晶体光纤,其横截面为正三角形排布的光子晶体结构,如图 1(a).组成光

子晶体光纤包层的基本单元是长度为  $D$ 、高度为  $H$  的矩形孔.相邻矩形孔之间的距离为  $\Delta$ ,即光子晶体光纤的晶格常量.为了计算方便,采用了五层矩形孔结构的光纤包层.光子晶体光纤的纤芯为实心二氧化硅.众所周知,光子晶体光纤包层结构中空气孔层数的多少仅仅影响光纤约束损耗的绝对大小,即空气孔层数越多,约束损耗越小.

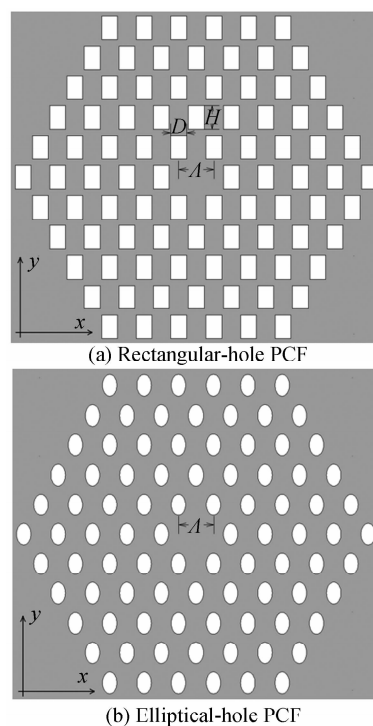


图 1 光子晶体光纤的横截面结构  
Fig. 1 Cross sections of PCFs

基金项目:浙江省教育厅项目(Y200803144)资助

第一作者:何忠蛟(1974-),男,讲师,硕士,主要研究方向为光子晶体光纤和光通信. Email:he335577@163.com

收稿日期:2010-03-18;修回日期:2010-05-11

为了更好地理解矩形孔光子晶体光纤的特性, 本文将其和椭圆孔光子晶体光纤做了对比研究. 椭圆孔光子晶体光纤的横截面结构如图 1(b). 五层椭圆孔组成了光子晶体光纤的包层, 其结构和矩形孔光子晶体光纤一样, 晶格常量为  $\Lambda$ .

在本文提到的光子晶体光纤结构中, 空气折射率假定为 1, 二氧化硅的折射率假定为 1.45. 在描述光子晶体光纤双折射特性的过程中, 就以下几个参量做说明:  $n_{\text{eff}}$  为光子晶体光纤基模的有效折射率; 光子晶体光纤的双折射定义为  $\Delta n = |n_{\text{eff}x} - n_{\text{eff}y}|$ , 其中  $n_{\text{eff}x}$ 、 $n_{\text{eff}y}$  分别为电场  $x$  方向偏振、电场  $y$  方向偏振的基模有效折射率; 定义归一化频率为  $\nu = \Lambda/\lambda$ , 其中  $\lambda$  为光子晶体光纤的工作波长.

本文采用全矢量有限元方法和完美匹配层条件<sup>[19]</sup>来计算光纤的有效折射率及双折射. 从麦克斯韦方程组可以获得以下全矢量波方程

$$\nabla \times ([p] \nabla \times \Phi) - k_0^2 [q] \Phi = 0 \quad (1)$$

式中  $k_0$  为真空波矢,  $\Phi$  为电场  $E$  或磁场  $H$

$$[p] = \begin{bmatrix} \frac{s_y s_z}{s_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{s_z s_x}{s_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{s_x s_y}{s_z} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2)$$

$$[q] = \begin{bmatrix} \frac{s_y s_z}{s_x} \epsilon_{xx} & s_z \epsilon_{xy} & s_y \epsilon_{xz} \\ s_z \epsilon_{yx} & \frac{s_z s_x}{s_y} \epsilon_{yy} & s_x \epsilon_{yz} \\ s_y \epsilon_{zx} & s_x \epsilon_{zy} & \frac{s_x s_y}{s_z} \epsilon_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3)$$

式中  $s_i$  等计算参量采用参考文献<sup>[19]</sup>中的数值.

## 2 光子晶体光纤特性

针对考虑如图 1(a) 所示的矩形孔光子晶体光纤, 作为两个实例, 我们给出参量如下: 光子晶体光纤包层相邻空气孔的中心距离为  $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$ ; 其中第一种矩形孔光子晶体光纤包层的空气孔参量为  $D = H = 1 \mu\text{m}$ , 第二种矩形孔光子晶体光纤包层的空气孔参量为  $D = 1 \mu\text{m}$  和  $H = 1.5 \mu\text{m}$ .

对于上述的参量, 计算得到的光子晶体光纤基模有效折射率如图 2 (插图给出了归一化频率为 1 情况下, 两种光子晶体光纤的  $x$  偏振基模电场主分量的分布). 其中第一种矩形孔光子晶体光纤的  $x$  偏振和  $y$  偏振的基模有效折射率曲线基本重合, 这表明采用长、高相等的正方形空气孔结构的光子晶体光纤, 两个偏振方向的基模的有效折射率基本相同. 这一特性和传统圆孔结构的光子晶体光纤相同.

第二种矩形孔光子晶体光纤  $y$  偏振和  $x$  偏振的基模有效折射率分别表示为空心孔曲线和实心点曲线. 第二种矩形孔光子晶体光纤两个偏振方向的基模有效折射率有较大的差别, 下面将详细论述这种双折射特性. 从图 2 的有效折射率曲线发现, 在归一化频率低的地方, 该矩形孔光子晶体光纤两个偏振方向的基模具有较大的折射率差. 这一特性显示该矩形孔光子晶体光纤具有和椭圆孔光子晶体光纤相类似的双折射特性.

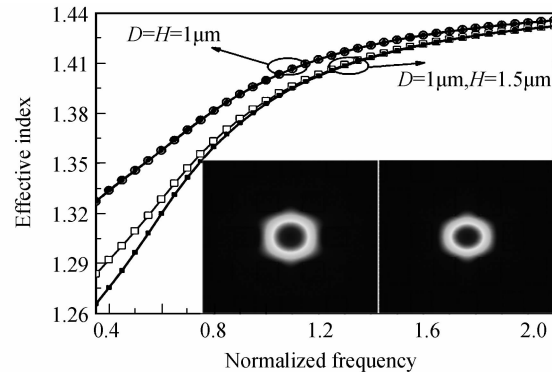


图 2 两种矩形孔光子晶体光纤的基模有效折射率  
Fig. 2 Effective indices of the fundamental modes of the two rectangular-hole PCFs

图 2 中的插图分别显示了在归一化频率为  $\nu = 1$  情况下, 第一种矩形孔光子晶体光纤和第二种矩形孔光子晶体光纤  $x$  偏振基模电场主分量的分布. 两种矩形孔光子晶体光纤对光都具有很好的约束能力. 第一种矩形孔光子晶体光纤基模模场比第二种矩形孔光子晶体光纤基模模场大, 其对应的有效折射率也大. 因此在相同的材料折射率和晶格常量情况下, 包层空气孔的尺寸决定了基模有效折射率的大小以及对光的约束能力.

图 3 给出了两种矩形孔光子晶体光纤的约束损耗特性. 可以发现第一种矩形孔光子晶体光纤的约束损耗比较大, 且两个偏振方向的基模的约束损耗是一样的. 第二种矩形孔光子晶体光纤的约束损耗相对较小,  $y$  偏振基模 (虚线) 的约束损耗要比  $x$  偏

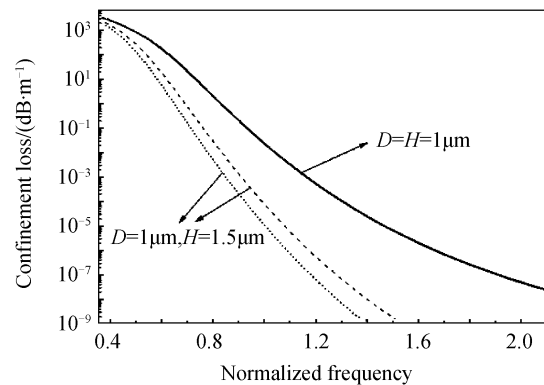


图 3 两种矩形孔光子晶体光纤的约束损耗  
Fig. 3 Confinement loss of the two rectangular-hole PCFs

振基模(点线)的大. 两个偏振方向基模约束损耗的不同说明了该矩形孔光子晶体光纤两个方向的不对称性, 也为获得偏振应用奠定了基础. 这些模拟结果显示, 当矩形孔尺寸增大, 对应光子晶体光纤的约束损耗下降.

上述研究结果表明, 当矩形孔光子晶体光纤中的空气孔长度和高度不一致的时候, 该光纤两个偏振方向的基模对应的有效折射率曲线发生分离, 从而使得该光纤表现出高双折射的特性.

在晶格常量相同的条件下, 我们分别研究了空气孔参量为  $D=0.707\ \mu\text{m}$  和  $H=1.414\ \mu\text{m}$ ,  $D=0.816\ \mu\text{m}$  和  $H=1.225\ \mu\text{m}$ ,  $D=1\ \mu\text{m}$  和  $H=1.5\ \mu\text{m}$  的三种矩形孔光子晶体光纤的双折射特性. 图 4 显示了三种矩形孔光子晶体光纤的双折射特性. 三条曲线表明: 一、在相同空气孔面积的情况下, 空气孔高度和长度的比值越大, 光子晶体光纤的双折射越大; 二、在光子晶体光纤空气孔具有相同高度和长度的比值的情况下, 空气孔面积越大, 双折射越大.

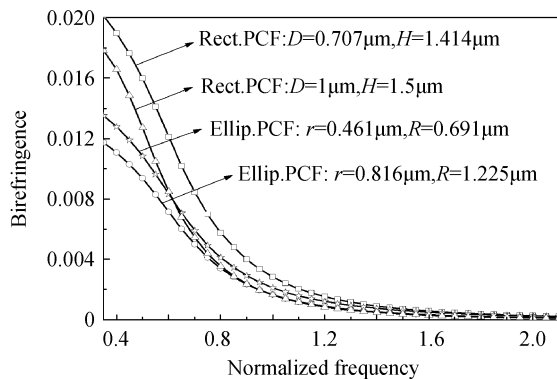


图 4 三种矩形孔光子晶体光纤和一种椭圆孔光子晶体光纤的双折射

Fig. 4 Birefringence of three types of rectangular-hole PCFs and one type of the elliptical-hole PCF

为了比较矩形孔光子晶体光纤和椭圆孔光子晶体光纤的光学特性, 在图 4 中又给出了一种椭圆孔光子晶体光纤(晶格常量与上述三种矩形孔光子晶体光纤相同)的双折射, 该椭圆孔光子晶体光纤的结构如图 1(b), 椭圆孔的短轴半径为  $r=0.461\ \mu\text{m}$ , 长轴半径为  $R=0.691\ \mu\text{m}$ , 椭圆率为 1.5. 从图 4 中可以看到, 空气孔参量为  $D=0.707\ \mu\text{m}$  和  $H=1.414\ \mu\text{m}$  的该矩形孔光子晶体光纤的双折射大于该椭圆孔光子晶体光纤的双折射. 通过对比研究, 可以看到, 矩形孔光子晶体光纤和椭圆孔光子晶体光纤具有相似的光学特性.

图 5 给出了该矩形孔光子晶体光纤(方孔线)和该椭圆孔光子晶体光纤(三角孔线)的约束损耗, 两者基本一致. 其左下角和右上角的插图分别显示了

在归一化频率为  $\nu=1$  的情况下, 该矩形孔光子晶体光纤和该椭圆孔光子晶体光纤的  $x$  偏振基模电场主分量的分布.

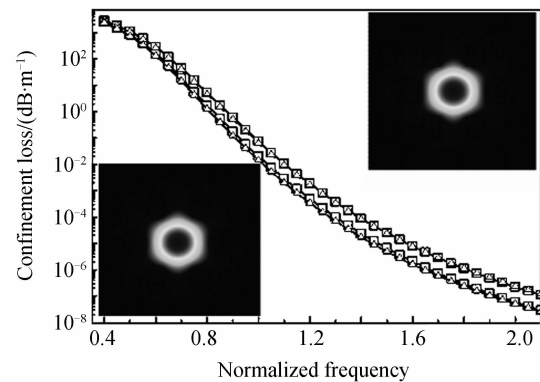


图 5 矩形孔光子晶体光纤(方孔线)和椭圆孔光子晶体光纤(三角孔线)的约束损耗

Fig. 5 Confinement loss of the rectangular-hole PCF (curves with rectangles) and the elliptical-hole PCF (curves with triangles)

### 3 讨论及结论

一般来讲, 非圆孔光子晶体光纤在制作方面有一定的困难, 然而对包括矩形孔在内的非圆孔光子晶体光纤进行超前的理论研究是有必要的. 在国外权威杂志上已经有相关的报道<sup>[20]</sup>, 其中还包括实验制作三角形孔光子晶体光纤<sup>[21]</sup>. 此外, Chen 等人报道了采用小圆孔组合成非圆孔(包括矩形孔)光子晶体光纤的方法<sup>[22]</sup>. 所以, 在现有的技术条件下也可以制作非圆孔光子晶体光纤. 因此本文提出的矩形孔光子晶体光纤, 有望在将来实现制作.

光子晶体光纤横截面的结构尤其是组成周期性结构的空气孔对光子晶体光纤的特性有重要影响. 本文采用全矢量有限元方法和完美匹配层条件研究了一种基于矩形孔结构的光子晶体光纤. 理论模拟结果表明, 矩形孔光子晶体光纤可获得较高的双折射特性. 深入的对比研究结果表明, 矩形孔光子晶体光纤具有椭圆孔光子晶体光纤的光学特性. 本文提出的矩形孔光子晶体光纤为获得高双折射提供了新途径.

#### 参考文献

- [1] 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. 基于椭圆孔微细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.
- [2] HE Zhong-jiao. Extruded elliptical-hole photonic crystal fibers with double defect[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 597-600.  
何忠蛟. 压缩型双缺陷椭圆孔光子晶体光纤[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 597-600.
- [3] YANG Guang-qiang, ZHANG Xia, LIN Jian-fei, et al. The measurement of polarization mode dispersion in highly

- birefringent photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1133-1136.
- 杨广强,张霞,林健飞,等. 高双折射光子晶体光纤偏振模色散测量[J]. *光子学报*, 2005, **34**(8): 1133-1136.
- [4] YU Yong-qin, RUAN Shuang-chen, ZENG Jian-cun, *et al.* Supercontinuum generation in photonic crystal fibers depends on pump wavelengths[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1293-1296.
- 于永芹,阮双琛,曾剑春,等. 泵浦波长对光子晶体光纤产生超连续谱的影响[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1293-1296.
- [5] LI Chun-lei, SHENG Qiu-qing. 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波长的关系[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 734-737.
- [6] SAITOH K, KOSHIBA M. Single-polarization single-mode photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2003, **15**(10): 1384-1340.
- [7] BELARDI W, BOUWMANS G, PROVINO L, *et al.* Form-induced birefringence in elliptical hollow photonics crystal fiber with large mode area[J]. *J Quantum Electron*, 2005, **41**(11): 1558-1564.
- [8] CHEN D, SHEN L. Ultrahigh birefringent photonic crystal fiber with ultralow confinement loss [J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2007, **19**(4): 185-187.
- [9] SANG X, CHU P L, YU C X. Applications of nonlinear effects in highly nonlinear photonic crystal fiber to optical communications[J]. *Opt Quantum Electron*, 2005, **37**(4): 965-994.
- [10] JU Jin, JIN Wui, DEMOKAN M S. Design of single-polarization single mode photonics crystal fibers at 1.30 and 1.55  $\mu\text{m}$ [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, **24**(2): 825-830.
- [11] CHEN Da, QIN S, SHEN L F. An all-fiber multi-wavelength Raman Laser based on a PCF Sagnac loop filter [J]. *Microw Opt Technol Lett*, 2006, **48**(12): 2416-2418.
- [12] KIM D H, KANG J U. Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(19): 4490-4495.
- [13] HANSEN T P, BROENG J, LIBORI S E, *et al.* Highly birefringent index-guiding photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, **13**(6): 588-590.
- [14] CHAUDHURI P R, PAULOSE V, ZHAO C, *et al.* Near-elliptic core polarization-maintaining photonic crystal fiber: modeling birefringence characteristics and realization [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, **16**(5): 1301-1303.
- [15] SAPULAK M, STATKIWVICZ G, OLSZEWSKI J, *et al.* Experimental and theoretical investigations of birefringent holey fibers with a triple defect[J]. *Appl Opt*, 2005, **44**(13): 2652-2658.
- [16] STEEL M J, OSGOOD R M. Elliptical-hole photonic crystal fibers[J]. *Opt Lett*, 2001, **26**(4): 229-231.
- [17] STEEL M J, OSGOOD R M. Polarization and dispersive properties of elliptical-hole photonics crystal fibers[J]. *J Lightwave Technol*, 2001, **19**(4): 495-503.
- [18] ISSA N A, EIJKELNBORG M A, FELLEW M, *et al.* Fabrication and study of microstructured optical fibers with elliptical holes[J]. *Opt Lett*, 2004, **29**(12): 1336-1338.
- [19] SAITOH K, KOSHIBA M. Full-vectorial finite element beam propagation method with perfectly matched layers for anisotropic optical waveguides[J]. *J Lightwave Technol*, 2001, **19**(3): 405-413.
- [20] YANG R, XUE W, HUANG T, *et al.* Research on the effect of air hole shape on the properties of microstructured optical fibers[J]. *Opt Eng*, 2004, **43**(11): 2701-2706.
- [21] YAN Ming, SHUM P. Air-guiding photonic bandgap fiber with improved triangular air-silica photonic crystal cladding [J]. *ECOC Proceeding*, 2005, **3**(4): 689-690.
- [22] CHEN Da, TSE M L, TAM H Y. Super-lattice structure photonic crystal fiber [J]. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2010, **11**(1): 53-64.

## Rectangular-hole Photonic Crystal Fibers

HE Zhong-jiao

(College of Information & Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310035, China)

**Abstract:** By employing a full-vector finite-element method and anisotropic perfectly matched layers, a novel rectangular-hole photonic crystal fiber is fully investigated and a method to achieve high birefringence of the photonic crystal fiber is proposed. Simulation results show that birefringence property of the rectangular-hole photonic crystal fibers is almost the same as the elliptical-hole photonic crystal fiber which can achieve the high birefringence up to the order of 0.01. Both the rectangular-hole photonic crystal fiber and the elliptical-hole photonic crystal fiber have the similar properties such as the mode profile, birefringence, confinement loss and so on.

**Key words:** Photonic crystal fiber; Rectangular hole; Birefringence; Finite-element method