

# 基于小圆孔结构纤芯的高双折射光子晶体光纤

何忠蛟

(浙江工商大学 信息与电子工程学院, 杭州 310035)

**摘要:**为了实现高双折射光子晶体光纤,提出了一种在纤芯中引入微小圆孔的方法.利用全矢量有限元方法和完美匹配层条件研究了基于圆孔微细结构纤芯的光子晶体光纤的双折射特性.讨论了纤芯圆孔数量、孔径、间隔距离对光纤双折射特性的影响;设计了一种双折射达到  $10^{-2}$  量级的光子晶体光纤.模拟结果表明采用三个以上圆孔可以获得较大的双折射,增大外包层数目可以有效减小约束损耗.

**关键词:**光子晶体光纤;双折射;约束损耗;有限元方法

**中图分类号:** TN25

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2008)11-2217-5

## 0 引言

光子晶体光纤的出现引起了人们极大的研究热情<sup>[1-7]</sup>.特别是,在光子晶体光纤被发明之后,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纤的性能得到了很大的提高<sup>[8-10]</sup>.目前,实现高双折射光子晶体光纤的多种方法<sup>[11-16]</sup>已经被相继报道.已报道的高双折射光子晶体光纤基本上可以分为两大类.一种是基于非对称的光纤纤芯,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>[11-13]</sup>,一般只能获得  $10^{-3}$  量级的双折射.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<sup>[14-16]</sup>,目前已经有从纤芯设计椭圆小孔来获得高双折射的方法<sup>[17-18]</sup>,然而这种光纤的椭圆小孔在制造工艺上有很大的难度.

本文提出一种基于纤芯小圆孔结构的高双折射光子晶体光纤的设计方法,利用在纤芯中的小圆孔造成光纤模式的不对称性,从而获得了较高的双折射.采用有限元方法并结合完美匹配层技术对这种光纤的特性进行研究.本文提出的新型光子晶体光纤设计,在保持高双折射的同时,有效地避免了采用椭圆小孔可能带来的制作工艺难点.

## 1 双小孔结构的光了了晶体光纤

### 1.1 光纤结构

双孔光子晶体光纤结构见图 1.包层仍然由圆形气孔成六边形阵列排列,纤芯则设置一排小气孔来破坏结构的对称性,以获得较强的双折射.其中小气孔的位置关于  $x$  轴对称,包层的参量则固定不

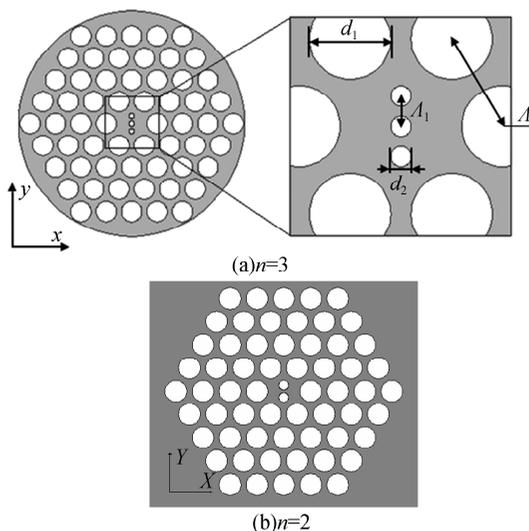


图 1 双孔结构纤芯的光子晶体光纤

Fig. 1 Photonic crystal fiber with two-hole fiber core

变,具体设置:设包层大气孔间距为  $\Lambda$ ,大气孔直径  $d_1 = 0.8\Lambda$ ,包层大气孔共有 4 层.另外,光纤的性质也会随纤芯小气孔数目  $n$  的不同而变化.在后面的论述中,定义纤芯小气孔的间距为  $\Lambda_1$ ,纤芯小气孔直径为  $d_2$ ,小孔半径定义为  $r_2$ .首先针对在  $n=2$  的情况研究小孔半径、小孔间距以及大气孔层数对于光纤性质的影响,并研究光纤性质随归一化频率的变化特性.当  $n=2$  时,光纤的结构如图 1(b).两个小孔对称的排列在纤芯中央.影响光纤性质的主要有以下两个参量:小孔间距  $\Lambda_1$  和小孔直径  $d_2$ .通过合理的变化这两个参量可以得到一个比较理想的结构,以实现尽可能大的双折射.由于大孔间距  $\Lambda$  固定,故可以将其作为度量其它所有尺寸的单位.当小孔间距  $\Lambda_1$  和小孔直径  $d_2$  相对于大孔间距  $\Lambda$  的大小确定以后,整个结构相对于工作波长的大小同样也会影响到光纤的性质,即光纤的性质会随着  $\Lambda/\lambda$  的变化而变化.其中  $\nu = \Lambda/\lambda$  ( $\lambda$  为工作波长)称为归一化频率.另外,包层大孔的层数  $N$  可能也会影响

到光纤的性质,也需要进行研究.本文提到的光纤双折射定义为

$$B = n_y - n_x \quad (1)$$

式中,  $n_i (i = x, y)$  为对于  $x$  或  $y$  偏振的有效折射率(也称模式折射率).

### 1.2 小孔间距

取小孔半径  $r_2 = 0.1\Lambda$  保持不变,工作波长  $\lambda = \Lambda$ , 然后令  $\Lambda_1$  从  $0.2\Lambda$  变化到  $0.5\Lambda$ , 观察光纤双折射的变化趋势. 从图 2 中可以看出, 当  $\Lambda_1/\Lambda$  从  $0.2$  增大到  $0.5$  时, 双折射呈现出明显的下降趋势. 在  $\Lambda_1/\Lambda = 0.46$  的时候  $B$  已经降至  $10^{-3}$  数量级以下. 当  $\Lambda_1 = 0.2\Lambda$  时光纤的模双折射达到较大的数值, 接近于  $5 \times 10^{-3}$ . 注意到此时有  $\Lambda_1 = d_2$ , 即两个小气孔处于相切状态. 从直观上来理解, 由于在光纤中能量主要集中在纤芯部分, 当两个小气孔也集中在纤芯部分的时候, 它们对于光纤结构对称性的破坏最严重, 对光波模场分布造成的影响最大; 而当两个小气孔相互远离的同时它们也离纤芯越来越远, 从而造成的不对称性也越来越弱, 使得双折射也随之变小.

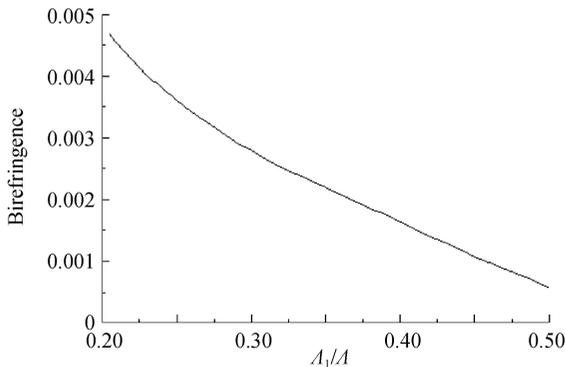


图 2 作为归一化小孔间距函数的双折射  
Fig. 2 Birefringence as a function of normalized distance of the small holes

### 1.3 小孔半径

取小孔间距  $\Lambda_1 = 0.4\Lambda$  并固定不变, 工作波长  $\lambda = \Lambda$ , 令小孔半径  $r_2$  从  $0.05\Lambda$  变化到  $0.2\Lambda$ , 得到光纤双折射的变化曲线如图 3. 从图中可以看出, 在小

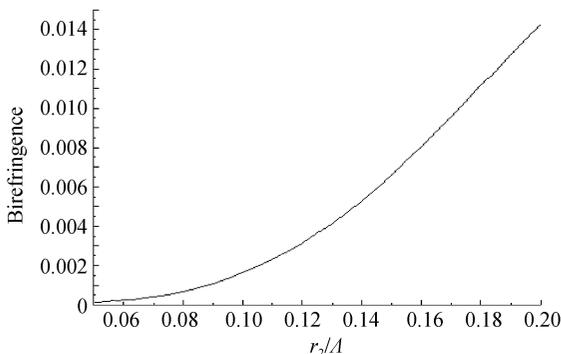


图 3 作为归一化小孔半径函数的双折射  
Fig. 3 Birefringence as a function of normalized radius of the small holes

孔间距一定的情况下, 随着小孔半径的增大, 光纤的双折射呈现出明显的上升趋势. 在图中, 当  $r_2/\Lambda$  很小的时候光纤的双折射也非常小; 当  $r_2/\Lambda = 0.2$  的时候双折射取到最大值, 此时有  $\Lambda_1 = d_2 = 2r_2$ , 两小孔相切. 因为当小孔半径很小时, 两个小孔所带来的不对称性对于光纤中能量的分布产生不了太大的影响; 只有当小孔的半径足够大的时候, 这种影响才能明显的表现出来, 从而造成很强的双折射.

### 1.4 最优结构

研究发现, 当纤芯的两个小孔相切并且小孔半径足够大时光纤会有较强的双折射. 取小孔半径  $r_2 = \Lambda_1/2$  以保证两小孔相切, 工作波长  $\lambda = \Lambda$ , 令  $\Lambda_1$  从  $0.1\Lambda$  变化到  $0.5\Lambda$ , 见图 4. 由图中可以看出, 在两小孔相切的情况下, 随着小孔半径的增大, 光纤的双折射也随之增大, 但是同时光纤的约束损耗[定义为  $\frac{10^7}{\ln(10)} \frac{4\pi}{\lambda} \text{Im}[n_i]$  dB/m,  $i = (x, y)$ ]也急剧增加. 双折射  $B$  的曲线在  $\Lambda_1/\Lambda = 0.46$  附近取到最大值, 之后随着小孔半径的增加, 光纤的双折射开始随之变小, 而两个模式的约束损耗仍然随之急剧增加. 事实上, 当光纤的半径变大时, 光纤束缚能量的能力开始变弱, 光纤的半径越大, 这种影响就越明显. 当  $\Lambda_1/\Lambda = 0.5$  的时候  $x$  偏振模已经向包层扩散的非常严重.

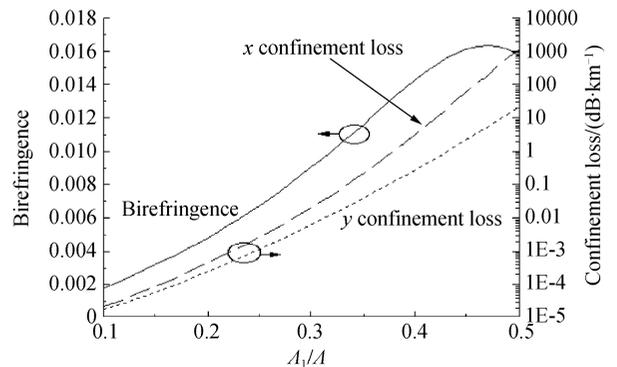


图 4 当小孔相切时, 作为归一化小孔半径函数的双折射和约束损耗

Fig. 4 Birefringence and confinement loss as a function of normalized radius of the small holes when the small holes are tangent

### 1.5 工作波长

取  $\Lambda_1/\Lambda = 0.46$  时两小孔相切的结构为最优结构, 研究光纤性质随归一化频率  $\nu = \Lambda/\lambda$  的变化特性, 以确定在给定的工作波长上光纤取什么样的尺寸可以获得比较优良的性质. 图 5 的是光纤的  $x$  极化和  $y$  极化基本模式的有效折射率. 可以看出, 两个偏振模的有效折射率都随  $\Lambda/\lambda$  的增加而增大, 而且由于受到纤芯小圆孔的影响, 使得  $y$  偏振模的折射率高于  $x$  偏振模. 由于高双折射光纤在使用中主

要应用折射率相对较高的偏振模,所以在对这种光纤性质的研究中本文更加关注于  $y$  偏振模的约束损耗以及模场分布等性质.

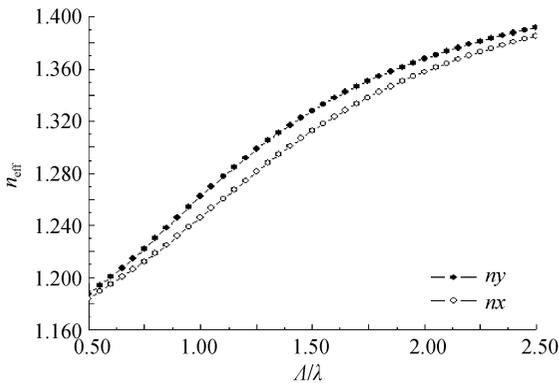


图 5 基于圆孔微细结构纤芯的光子晶体光纤基模有效折射率  
Fig. 5 Effective indices of the fundamental modes of the photonic crystal fiber based on circular-hole fiber core

由图 6 可以看出,由于受到纤芯小气孔的影响,  $y$  偏振模的约束损耗低于  $x$  偏振模的约束损耗,而且两者都随归一化频率的增加急剧下降;光纤双折射在  $\nu=1.18$  附近有一明显的峰值,模双折射高达 0.017 以上.图 6 中的插图示出了  $\nu=1$  时  $y$  极化基本模式的  $y$  分量的电场分布.进一步研究表明,对于这种结构的光纤,  $\nu=\Delta/\lambda$  越大,模式的受限程度越强,能量被更好的约束在纤芯中,但受到高阶模的严重影响,当  $\Delta/\lambda>1$  时光纤处于多模状态;  $\nu$  越小,模式的受限程度越差,模场向包层的扩散程度会变得严重,但是随着  $\nu$  的变小,光纤对高阶模会产生较强的抑制,当  $\nu$  小到一定程度( $\Delta/\lambda<0.9$ )时,光纤处于单模传输状态.

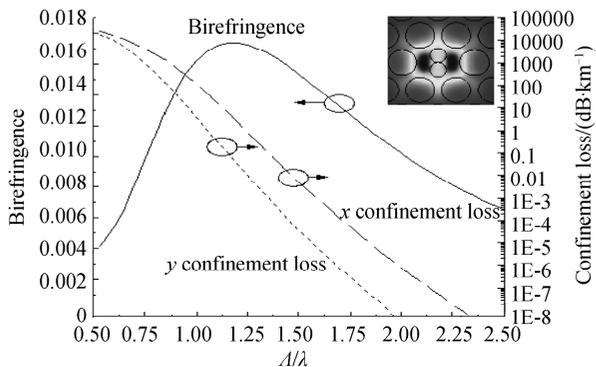


图 6 光子晶体光纤双折射和约束损耗,插图给出了模场分布  
Fig. 6 Birefringence and confinement loss of the PCF. Inset shows the mode profile

### 1.6 包层层数

对于 1.5 节中提到的结构,保持纤芯部分的结构不变,包层的大孔间距以及大孔直径都不变,将包层的大孔层数由原来 4 层增加到 8 层,观察大孔层数的变化对光纤性质的影响.

图 7 是对于 1.5 节的结构在归一化频率  $\nu=0.9$  时光纤性质随大孔层数的变化情况.当大孔层数由 4 层增加至 8 层时,可以看出光纤的双折射基本保持不变,而约束损耗则急剧下降.对于  $y$  偏振模来说,大孔层数每增加一层,其约束损耗即可降低一个数量级左右.光纤的双折射与大孔层数基本无关,而约束损耗则随着大孔层数的增加迅速减小,这一特性对于光纤的实际生产与应用有着重要的意义.

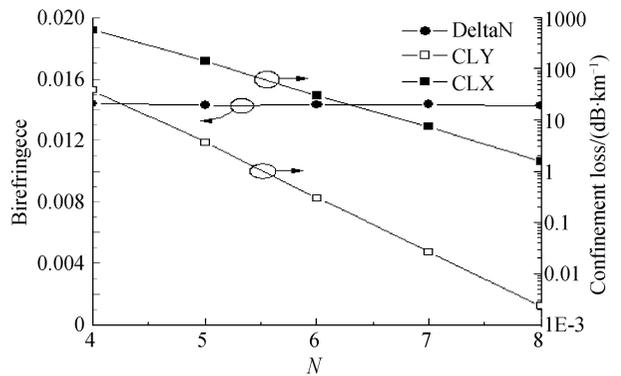


图 7 光子晶体光纤双折射和约束损耗和外包层圈数的关系  
Fig. 7 Birefringence and confinement loss of the PCF as the function of cladding ring number

## 2 多圆孔结构纤芯的光子晶体光纤

图 8 是  $n=2,3,4,5$  四种情况下光纤性质的比较图.图中空心圆标注的是二小孔结构的双折射,实心三角形标注的是三小孔结构的双折射,实心方框标注的是四小孔结构的双折射,实心五边形标注的是五小孔结构的双折射;实线标注的是二小孔结构的约束损耗(其中上面一条为  $x$  偏振模的约束损耗,下面一条为  $y$  偏振模的约束损耗,下同),划线标注的是三小孔结构的约束损耗,点线标注的是四小孔结构的约束损耗,点划线标注的是五小孔结构的约束损耗.

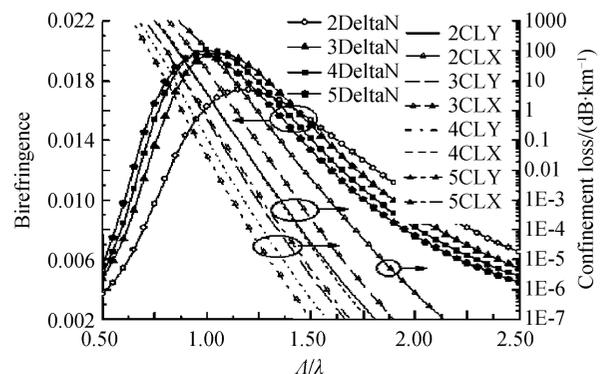


图 8 在  $n=2,3,4,5$  四种情况下光子晶体光纤双折射和约束损耗  
Fig. 8 Birefringence and confinement loss of the PCF when the number of small holes in fiber core is 2,3,4 or 5

从图 8 中可以清楚地看出,小孔数目增多时,光纤的约束损耗变小.三小孔结构、四小孔结构和五小

孔结构的模双折射曲线很接近,但是二小孔结构则与之相差较大,其双折射的最大值明显小于前面三者.五小孔与三小孔结构相比,双折射差别非常小,但是其约束损耗有了极大的改善.

前面的论述中可以看出,随着纤芯小孔数量的增加(从二孔增加至三、四、五孔),光纤的双折射并不是无限制的增大.和二小孔结构相比,三小孔结构、四小孔结构和五小孔结构的双折射性能确实有很大提高,但是后面三者的双折射曲线却非常接近,并没有因小孔数目的不同而产生太多的差异.对其可能的原因,进行分析可知:

前面提到,为了实现最大的双折射,第一要求几个小孔离得越近越好,相切时效果最好;第二要求小孔的半径要足够大,否则不足以对纤芯的场分布产生足够大的影响.由于小孔是在纤芯有限长度内成直线排列,随着小孔数量的增加,其半径势必变小,从而小孔对纤芯的场分布所产生的影响也会逐渐变小.可以推测,当小孔数目足够多的时候,小孔的半径也会变得相当小,这时候纤芯的场分布将会非常接近纤芯没有小孔时的场分布情况.

### 3 结论

本文提出了在光纤纤芯中引入微小圆孔结构的光子晶体光纤.采用全矢量有限元方法和完美匹配层条件,研究了光子晶体光纤的双折射特性.这种新型结构的光子晶体光纤,在其他条件固定不变时,令几个小孔相切才会对光纤的对称性产生最大程度的影响,从而得到最强的双折射.通过合理的设置相切小孔的半径得到一个最优的结构,获得较强的双折射.随着归一化频率的增加,光纤束缚能量的能力变强,约束损耗变小,但是会出现高阶模,导致多模传输;随着归一化频率的减小,光纤束缚能量的能力变差,能量向包层扩散的程度加剧,约束损耗变大,但是光纤会对高阶模产生抑制作用,处于单模传输状态.通过增加包层大孔的层数,可以在保持原有双折射的情况下有效的降低光纤的约束损耗,对于  $y$  偏振模,每增加一层大孔可以使其约束损耗降低一个数量级左右.

#### 参考文献

[1] 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.

[2] WU Wei-qing, CHEN Xun-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.

[3] YU Yong-qing, RUAN Shuang-chen, ZENG Jian-chun, *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.

[4] 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.

[5] RUAN Shuang-chen, YANG Bing, ZHU Chun-yan, *et al.* Yb<sup>3+</sup>-doped double cladding photonic crystal fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1):15-16.  
阮双琛,杨冰,朱春艳,等.2W掺Yb<sup>3+</sup>双包层光子晶体光纤激光器[J].光子学报,2004,**33**(1):15-16.

[6] KUBOTA H, KAWANISHI S, KOYANAGI S, *et al.* Absolutely single polarization photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, **16**(1):182-184.

[7] JU J, JIN W, 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.

[8] SANG X Z, 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.

[9] CHEN D R, 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.

[10] 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.

[11] HANSEN T P, BROENG J, LIBORI S E B, *et al.* Highly birefringent index-guiding photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, **13**(6):588-590.

[12] CHAUDHURI P R, PAULOSE V, ZHAO C, *et al.* Near-elliptical core polarization-maintaining photonic crystal fiber: modeling birefringence characteristics and realization [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, **16**(5):1301-1303.

[13] SAPULAK M, STATKIWICZ 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.

[14] STEEL M J, OSGOOD R M. Elliptical-hole photonic crystal fibers[J]. *Opt Lett*, 2001, **26**(4):229-231.

[15] 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.

[16] 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.
- [17] CHEN D R, SHEN L F. Ultrahigh birefringent photonic crystal fiber with ultralow confinement loss[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, **19**(4):185-187.
- [18] 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):1215-1128.

## Highly Birefringent Photonic Crystal Fibers Based on Micro-hole-structured Fiber Core

HE Zhong-jiao

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

Received date: 2007-08-20

**Abstract:** A method by employing circular micro holes in the fiber core was proposed to achieve highly birefringent photonic crystal fibers (PCFs). The birefringence property of highly birefringent PCFs was investigated by employing a full-vector finite-element method (FEM) and anisotropic perfectly matched layers. The relationship between the birefringence and the number, diameter and distance of the circular holes in the fiber core was discussed. A PCF with birefringence up to an order of  $10^{-2}$  was designed. Simulation results showed that larger birefringence can be achieved by employing three or more circular holes in the fiber core, and the confinement loss of the PCF can be reduced by increasing the ring number of the fiber cladding holes.

**Key words:** Photonic crystal fiber; Birefringence; Confinement loss; Finite-element method



**HE Zhong-jiao** was born in 1974, received the B. S. and M. S. degree from Department of Optical Engineering, Zhejiang University. He is now a lecturer at Information and Electronic Engineering College, Zhejiang Gongshang University. His main research interests focus on photonic crystal fibers and optical fiber communications.