

doi: 10.3788/gzxb20164503.0306002

椭圆高双折射光子晶体光纤的双折射及损耗研究

周铭皓, 黄勇林

(南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210046)

摘要:提出了一种椭圆型高双折射光子晶体光纤, 并采用多极法分析各结构参量对模式基模模场、双折射、损耗特性的影响. 结果表明: 改变椭圆型空气孔的椭圆率和包层椭圆率的大小, 在波长 1 550 nm 处, 该光纤可获得 2.26×10^{-3} 的双折射, 限制损耗为 2.8×10^{-3} dB/km, 且此时 x 偏振方向和 y 偏振方向相差数十倍, 有利于光信号偏振传输, 可用于制造偏振单模传输的保偏光纤; 在 1 300~1 500 nm 的波长范围内, 该光纤有稳定的大小为 10^{-6} 的低损耗.

关键词:多极法; 光子晶体光纤; 高双折射; 限制损耗

中图分类号: CN 51-1125/TN

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)03-0306002-5

Highly Birefringent Photonic Crystal Fiber Based on Lattice Structure of Elliptic Layer

ZHOU Ming-hao, HUANG Yong-lin

(College of Optoelectronic, Nanjing University of Post and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: A highly birefringent photonic crystal fiber was proposed based on lattice structure of elliptic layer. Properties such as birefringence, confinement loss, and mode area of the proposed photonic crystal fiber were simulated by the multipole method. Result shows that the birefringence of the propose photonic crystal fiber can be up to 2.26×10^{-3} at the wavelength at 1 550 nm, and the confinement loss is 2.8×10^{-3} dB/km. At the same time, the y polarization is double times of the x polarization, which can be used in manufacturing polarized polarization maintaining fiber. And the confinement loss keeps stable at the wavelength range of 1 300~1 500 nm.

Key words: Multipole method; Photonic crystal fiber; Birefringence; Confinement loss

OCIS Codes: 060.5295; 060.2310; 230.0230

0 引言

由二维光子晶体组合而成的光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF) 包层是有空气孔且对称分布的硅晶体阵列, 在包层中加入一个被破坏的缺陷构成纤芯. 根据导光原理, 光子晶体光纤可分为全内反射导光型光子晶体光纤和光子带隙导光型光子晶体光纤^[1-3]. 与普通光纤相比, 光子晶体光纤具有无截止单模传输、高双折射、高非线性、色散可调及大模面积等传统光纤不存在的独特性质^[4-6], 可以用来制作全新概念的高性能光学器件, 拓宽了光子技术的应用领域.

2000 年, 英国 Bath 大学研制出高双折射 PCF, 通过减小一排空气孔的方法, 使光纤具有二重旋转对称性^[7]; 2001 年, SUZUKI 等增大沿 x 轴的两个纤芯相邻的空气孔, 通过破坏其对称性制作具有高双折射的 PCF^[8]; 同时将常规的圆空气孔设计成椭圆孔, 在空气孔中注入液体, 也可破坏 PCF 的对称性, 提高其模式双折射.

本文优化设计了一种椭圆型的光子晶体光纤结构. 通过调整光纤结构参量实现 2.26×10^{-3} 的高双折射值和 2.8×10^{-3} dB/km 的低损耗, 且 x 偏振方向和 y 偏振方向相差数十倍, 有利于光信号偏振传输, 可用于制造偏振单模传输的保偏光纤.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61275067)和南京邮电大学孵化和培育国家级项目(No. NY213150)资助

第一作者:周铭皓(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤通信及光纤传感等. Email: alanzmh@163.com

导师(通讯作者):黄勇林(1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤通信及光纤传感等. Email: huangyl@njupt.edu.cn

收稿日期:2015-10-22; **录用日期:**2015-12-10

<http://www.photon.ac.cn>

1 基本理论

PCF 理论分析方法有有效折射率法、平面波法、时域有限差分法、多极法及有限元法^[9-10]等。多极法被广泛应用于分析包含圆柱型空气孔的光子晶体光纤,并可改进平面波在运算速度和准确度上的缺点。当空气孔数量不多时,其计算准确度高,收敛速度快,并且可以分析包层空气孔孔径变化的情况。本文使用多极法计算并分析有效折射率和波长之间的关系,并计算双折射,色散和损耗。

用多极法计算圆柱形空气孔构成的微结构光纤时,通过设定不同的波长,可求得在不同波长下的传播常量,由实部可得色散和双折射,由虚部可得有限包层情况下的限制损耗,最终得到 PCF 的模式特性及损耗。

利用多极方法,模场可以展开成柱函数(Bessel 函数)的形式^[11],在极坐标中,第 i 个空气孔的内部,其纵向电场可展开为

$$E_z = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_m^{(i)} J_m(k_{\perp}^i \gamma_i) \exp(im\varphi_i) \exp(i\beta z) \quad (1)$$

在第 i 个空气孔近邻的介质中,其纵向电场表示为

$$E_z = \sum_{m=-\infty}^{\infty} [b_m^{(i)} J_m(k_{\perp}^e \gamma_i) + c_m^{(i)} H_m^{(i)}(k_{\perp}^e \gamma_i)] \exp(im\varphi_i) \exp(i\beta z) \quad (2)$$

式中, $k_{\perp}^e = (k_0^2 n_e^2 - \beta^2)^{1/2}$, $k_{\perp}^i = (k_0^2 n_i^2 - \beta^2)^{1/2}$, n_i 表示空气的折射率,且 $n_i = 1$; n_e 是石英折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间波数^[10], H_z 是磁场分量。

在空气孔界面,利用电磁场边界条件^[12],得到 $a_m^{(i)}$, $b_m^{(i)}$, $c_m^{(i)}$ 的表达式。在具体运算中选择适当的截断值 M (取 $-M < m < M$),优化计算速度和准确度,进一步通过 $\beta = n_{\text{eff}} k_0$ 求得模式的有效折射率 n_{eff} 。最后通过模式的有效折射率推导出光纤的模式双折射、色散系数和约束损耗等特性参量。

模式的双折射^[13]表示为

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

式中 Re 表示实部, n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别表示 x 偏振方向和 y 偏振方向基模的有效折射率。

基模约束损耗^[14](dB/m)可用有效折射率的虚部表示,为

$$L_{\text{loss}} = \frac{20k_0}{\ln 10} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (4)$$

式中 n_{eff} 为传播模式的有效折射率, Im 表示其虚部,

$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为自由空间波数。

色散系数^[15]可由有效折射率的实部表示,为

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{\partial \lambda^2} \quad (5)$$

式中 λ 和 c 分别是光在真空中的波长和速度, n_{eff} 为传

播模式有效折射率, Re 表示实部。

2 模型仿真与结果分析

设计的椭圆型 PCF 截面如图 1,光纤由多个椭圆型包层组合而成,背景材料为石英基底。椭圆型空气孔均匀对称的排列在纤芯周围,从而形成椭圆形的纤芯区域。椭圆型空气孔长轴为 a ,短轴为 b ,椭圆率为 e ,其中 $e = a/b$,包层长轴的孔间距为 Λ ,椭圆型包层的椭圆率为 η ,包层层数为 n ,背景材料折射率为 1.45。

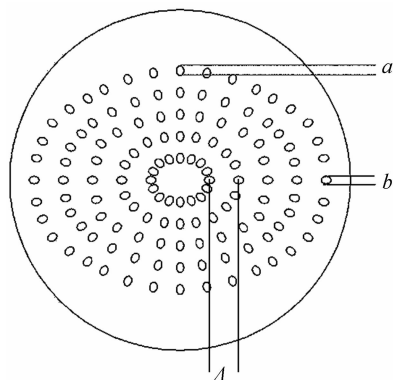


图 1 椭圆型 PCF 端面结构

Fig. 1 Schematic diagram of elliptical-cladding PCF

2.1 包层椭圆率 η 对双折射和损耗的影响

研究椭圆型包层的椭圆率对双折射和损耗的影响,设空气孔间距 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$,空气孔长轴 $a = 0.4 \mu\text{m}$,短轴 $b = 0.3 \mu\text{m}$,空气孔的椭圆率 $e = 4:3$ 。改变包层的椭圆率 η ,双折射率也随之改变。

从图 2 可以看出,随着 η 的减小,双折射率先增加后减小,在椭圆率 $\eta = 4:3$ 时,双折射达到最大值。同理,改变包层的椭圆率 η ,限制损耗也随之改变。

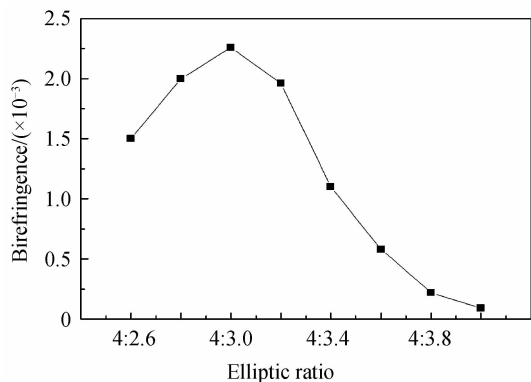


图 2 双折射率随包层椭圆率 η 的变化

Fig. 2 Birefringence versus cladding-ellipticity η

图 3 为限制损耗随包层椭圆率 η 的变化。随着 η 的增加, x 方向和 y 方向的限制损耗都是先增加后减小, y 方向的限制损耗增加的比较明显,且当 $\eta = 4:3$ 时, $L_c^y = 3.64 \times 10^{-2} \text{ dB/m}$, $L_c^x = 2.86 \times 10^{-3} \text{ dB/m}$,两者相差 13 倍。因此当光信号在光子晶体光纤中传播时, y 方向偏振光的基模比 x 方向偏振光的基模损耗

的更快,可用于制造偏振单模传输的保偏光纤。

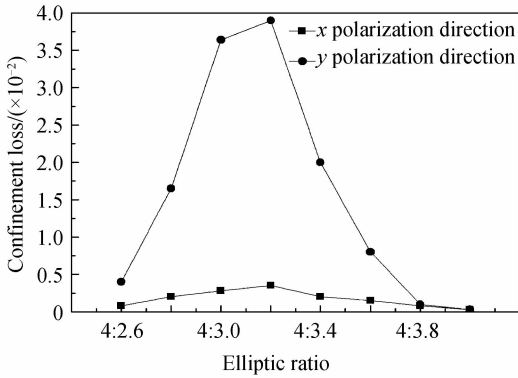


图3 限制损耗随包层椭圆率 η 的变化

Fig. 3 Confinement loss versus cladding-ellipticity η

2.2 圆孔椭圆率 e 对双折射和损耗的影响

包层中的空气孔为相同椭圆率的椭圆形空气孔,改变空气孔的椭圆率也会影响该光子晶体光纤的双折射和限制损耗.设空气孔间距 $\Lambda=2\ \mu\text{m}$,包层的椭圆率 $\eta=4:3$.固定空气孔长轴 $a=0.4\ \mu\text{m}$,改变空气孔的椭圆率 e .可以看出,随着 e 的减小,双折射逐渐减小,限制损耗逐渐减小,如图4.

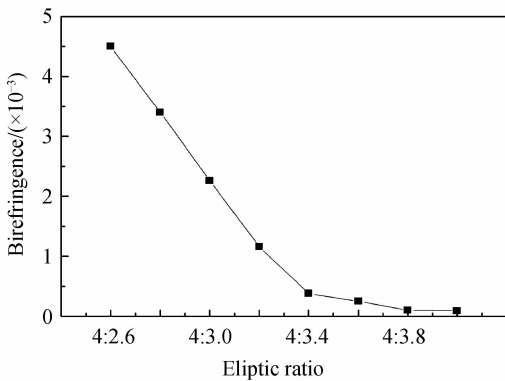


图4 双折射随圆孔椭圆率 e 的变化

Fig. 4 Birefringence versus hole-ellipticity e

从图4可以看出,椭圆率越大,引起的双折射越高.这是由于高的空气孔椭圆率加剧了光子晶体结构的不对称性,从而引起较高的双折射率.但是过高的不对称性可能引起较高的限制损耗,如图5所示.

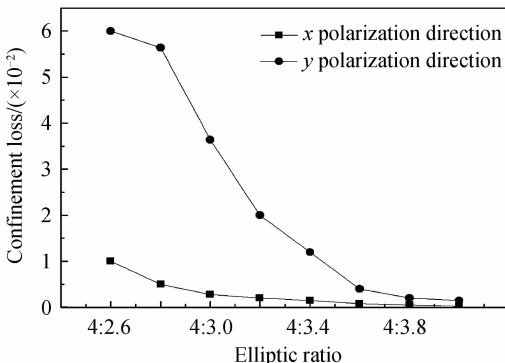


图5 限制损耗随圆孔椭圆率 e 的变化

Fig. 5 Confinement loss versus hole-ellipticity e

从图5可以看出,保持空气孔间距 $\Lambda=2\ \mu\text{m}$,椭圆型包层的椭圆率 $\eta=4:3$,改变空气孔椭圆率 e ,限制损耗随着圆孔椭圆率 e 的升高逐渐升高,且在圆孔小于椭圆率 $e=4:3$ 时,限制损耗急剧升高,这是由于结构的不对称性引起的限制损耗的增加.在 $e=1$ 时,即椭圆孔变为圆孔时,损耗最小.

由此可见,若想要获得更大的双折射率,可以减小椭圆孔的椭圆率,以获得较高的双折射率,但此时的限制损耗同样较高.本文选取适中的圆孔椭圆率 $e=4:3$,在 $1550\ \text{nm}$ 处的双折射率 B 和限制损耗达到平衡.

2.3 包层数对双折射和损耗的影响

采用五个空气孔和六层空气孔两种结构研究空气孔层数对双折射和限制损耗的影响.保持包层椭圆率 $\eta=4:3$,空气孔长轴 $a=0.4\ \mu\text{m}$,短轴 $b=0.3\ \mu\text{m}$,空气孔间距 $\Lambda=2\ \mu\text{m}$,且每一层的空气孔大小相同.

由图6可以看出,五层空气孔和六层空气孔结构的双折射大小几乎相同,这表示层数的变化对该结构的双折射率影响不大.本文结构主要是由包层椭圆的分布决定其双折射的大小,而不是空气孔数量或者空气孔层数.

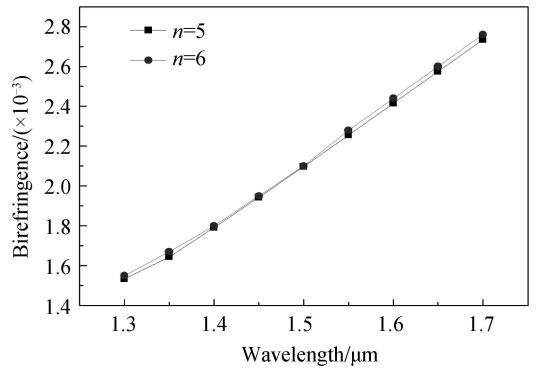


图6 双折射率随包层数的变化

Fig. 6 Birefringence versus hole ring numbers

由图7可以看出,6层空气孔结构的限制损耗小于5层空气孔的限制损耗,这是因为更多的空气孔层数可以将基模更加聚集在纤芯中,导致较低的限制损耗.因此增加椭圆型包层的层数,可以得到更小的损耗,但同时会使制作工序更加复杂.

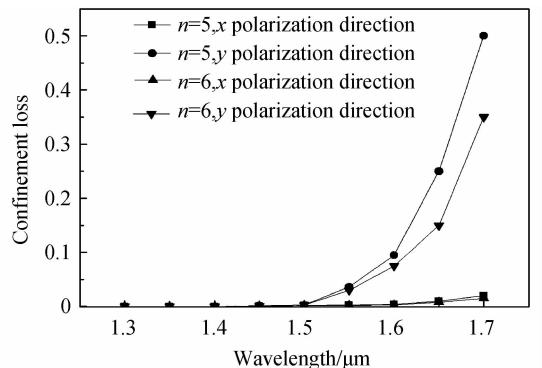


图7 限制损耗随包层数的变化

Fig. 7 Confinement loss versus hole ring numbers

2.4 双折射和损耗特性分析

由以上分析可知,选取椭圆型空气孔长轴 $a = 0.8 \mu\text{m}$,短轴 $b = 0.6 \mu\text{m}$,空气孔间距 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$,椭圆型包层的椭圆率 $\eta = 4 : 3$,层数 $n = 6$,可得到最佳的双折射率,如图 8、图 9。

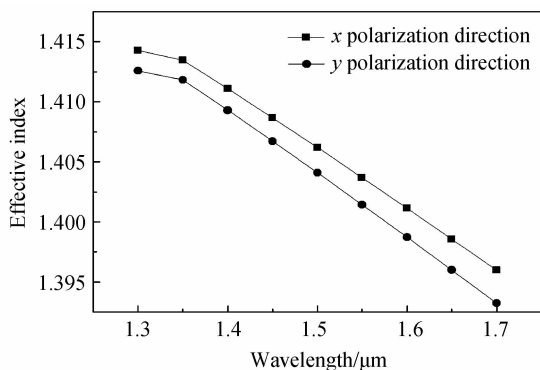


图 8 有效折射率随波长的变化

Fig. 8 Effective index versus wavelength

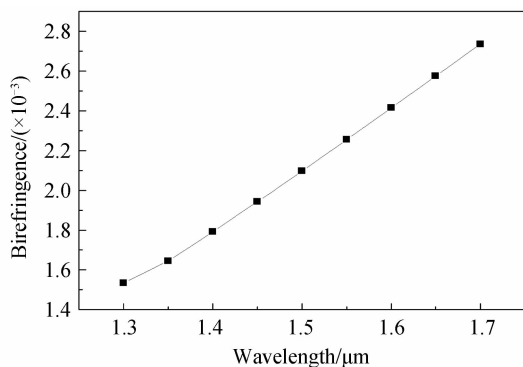


图 9 双折射率随波长的变化

Fig. 9 Birefringence versus wavelength

图 8 中,随着波长的增加, x 偏振方向和 y 偏振方向的有效折射率逐渐降低, n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 差值逐渐增加

双折射率 $B = |\text{Re}(n_{\text{eff}}^y - n_{\text{eff}}^x)|$ 逐渐变大,在波长 $\lambda = 1.550 \text{ nm}$ 处的归一化双折射率为 2.26×10^{-3} ,属于高双折射。

此时 x 偏振基模方向和 y 偏振基模方向的限制损耗随波长的变化如图 10。

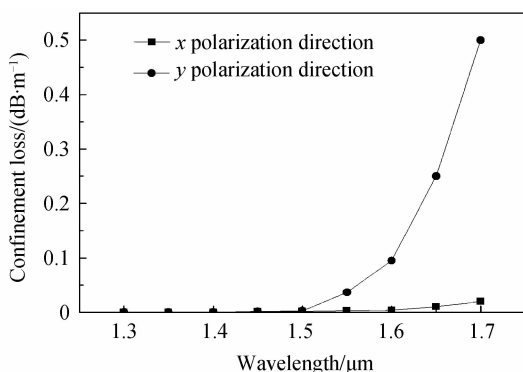


图 10 x 偏振基模 y 偏振基模随波长限制损耗的变化

Fig. 10 Confinement loss versus wavelength

从图 10 可以看出,在 $1.300 \sim 1.500 \text{ nm}$ 光波段,损耗变化不大,几乎稳定.在 1.550 nm 处,该光子晶体光纤的限制损耗为 $2.8 \times 10^{-3} \text{ dB/km}$,数值较低.在 $1.600 \sim 1.700 \text{ nm}$ 处,随着波长的增加,限制损耗迅速增加.由此可知,该光子晶体光纤易受包层中椭圆率,孔径分布等因素的影响,如在波长 1.550 nm 处,双折射率较高,同时 x 偏振方向和 y 偏振方向大小相差 13 倍,当光信号在光子晶体光纤中传播时, y 方向偏振光的基模比 x 方向偏振光的基模模损耗的更快,可用于制造偏振单模传输的保偏光纤。

3 模场特性

采用全矢量有限元法 (Full-Vector Finite Element Method, FV-FEM) 对 5 层椭圆型光子晶体光纤的基模模场特性进行分析,结果如图 11. 图 11(a)、(b) 为光子晶体光纤在 1.550 nm 处的基模模场图. 从图中可以看出,该光纤的模场被很好的束缚在光纤的纤芯中,即电磁能量束缚在纤芯中,有利于实现高双折射。

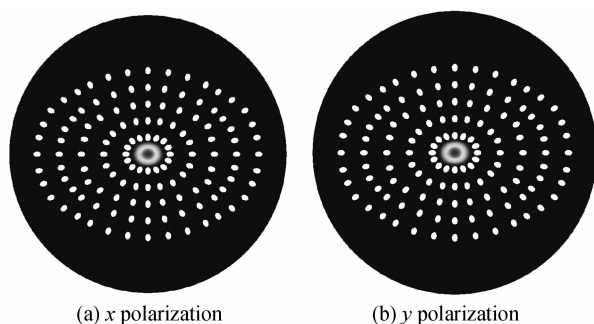


图 11 基模模场分布能量等位分布

Fig. 11 Mode field energy allelic distribution

4 结论

本文设计了一种椭圆型包层光子晶体光纤,使用多极法对该光纤的双折射、限制损耗特性进行了数值分析,发现该结构的光子晶体光纤在 $1.300 \sim 1.500 \text{ nm}$ 损耗变化不大,几乎稳定.该结构的双折射和损耗特性主要由包层椭圆率和圆孔椭圆率决定,包层圆孔直径和圆孔层数对双折射基本没有影响.在 1.550 nm 处可获得高达 2.26×10^{-3} 的高双折射值和 $2.8 \times 10^{-3} \text{ dB/km}$ 的损耗特性,且此时 x 偏振方向和 y 偏振方向大小相差数十倍,有利于光信号偏振传输,可用于制造偏振单模传输的保偏光纤。

参考文献

- [1] GENG Peng-cheng, ZHANG Wei-gang, ZHANG Shan-shan, et al. Design of new type single-polarization single-mode photonic crystal fiber with wide bandwidth[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **31**(7): 0706001.
- [2] 耿鹏程, 张伟刚, 张珊珊, 等. 新型宽带偏振单模光子晶体光纤的设计[J]. *光子学报*, 2011, **31**(7): 0706001.
- [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 ultra-flattened 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] XU Qiang, MIAO Run-cai, ZHANG Ya-ni. High birefringence and negative dispersion effect of hexagonal honeycomb lattice photonic crystal fiber[J]. *Acta Physics Sinica*, 2012, **61**(23): 4210-4218.
- 许强,苗润才,张亚妮. 六角点阵蜂窝状包层光子晶体光纤中的高双折射负色散效应[J]. *物理学报*, 2012, **61**(23): 4210-4218.
- [5] WANG Wei, ZHU Zi-min. Analysis of photonic crystal fibers and its application in supercontinuum[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(5): 684-688.
- [6] HAO Rui, LI Zhi-quan. Analysis on photonic crystal fibers with circular air holes in elliptical configuration[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(12): 363-368.
- [7] LI Li-jun, LAI Yong-zheng. Calculation and simulation of the effective index in the core and cladding of fiber[J]. *Acta Physics Sinica*, 2013, **62**(14): 140-201.
- 李丽君,来永政. 光纤纤芯及包层模有效折射率计算及仿真[J]. *物理学报*, 2013, **62**(14): 140-201.
- [8] ZHANG Ya-ni. High- birefringence negative dispersion effect of novel rectangular lattice photonic crystal fiber[J]. *Acta Physics Sinica*, 2010, **59**(12): 8632-8639.
- 张亚妮. 新型矩形点阵光子晶体光纤的高双折射负色散效应[J]. *物理学报*, 2010, **59**(12): 8632-8639.
- [9] FUJISAWA T, KOSHIBA M. Finite element characterization of chromatic dispersion in nonlinear holey fibers[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(13): 1481-1489.
- [10] ZHANG Y N, MIAO R C, REN L Y, *et al.* Polarization properties of elliptical core non-hexagonal symmetry polymer photonic crystal fiber[J]. *China Physics*, 2007, **16**(6): 1719-1724.
- [11] ZHAO Xing-tao, HOU Lan-tian, LIU Zhao-lun, *et al.* Dispersion analysis of photonic crystal fiber using improved full vectorial effective index method[J]. *Acta Physics Sinica*, 2007, **56**(4): 2275-2280.
- 赵兴涛,侯蓝田,刘兆伦,等. 改进的全矢量有效折射率方法分析光子晶体光纤的色散特性[J]. *物理学报*, 2007, **56**(4): 2275-2280.
- [12] WANG Wei, YANG Bo. Dispersion and birefringence analysis of photo crystal fiber with rhombus aircore structure[J]. *Acta Physics Sinica*, 2012, **61**(6): 064601.
- 王伟,杨博. 菱形纤芯光子晶体光纤色散与双折射特性分析[J]. *物理学报*, 2012, **61**(6): 064601.
- [13] ZHANG Lei, LI Shu-guang, YAO Yan-yan, *et al.* Characteristics of nano-structured photonic crystal fibers with high birefringence[J]. *Acta Physics Sinica*, 2010, **59**(2): 1101-1107.
- 张磊,李曙光,姚艳艳,等. 高双折射纳米结构光子晶体光纤特性研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(2): 1101-1107.
- [14] LIOU Jia-hong, HUANG Sheng-shuo. Loss-reduced highly birefringent selectively liquid-filled photonic crystal fibers[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(12): 971-974.
- [15] BERLARDI W, BOUWMANS G, PROVINO L, *et al.* Form-Induced birefringence in elliptical hollow photonic crystal fiber with large mode area[J]. *IEEE Journal of Quantum Electron*, 2005, **41**(12): 1558-1564.