

## 混合双包层高双折射光子晶体光纤的特性

李志全, 李 莎, 郝 锐, 李晓云, 郑文颖

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 提出了一种新型的混合双包层结构的光子晶体光纤。利用多极法对光纤基模的模场分布、双折射、限制损耗及色散特性等进行了数值模拟, 通过调节包层空气孔的孔径大小可以有效地控制光纤的双折射和限制损耗特性。结果发现: 新设计的光纤具有高双折射低限制损耗特性, 光纤结构参数为  $\Lambda=1.0\ \mu\text{m}$ ,  $d_1=d_2=d_3=0.8\ \mu\text{m}$  时, 该光纤在 C 波段(1.53~1.565  $\mu\text{m}$ )及 L 波段(1.57~1.62  $\mu\text{m}$ )呈现负色散及负色散斜率。在波长为 1.55  $\mu\text{m}$  处, 双折射高达  $10^{-2}$ , 限制损耗小于  $10^{-5}\ \text{dB/m}$ 。

**关键词:** 光子晶体光纤; 多极法; 双折射; 限制损耗; 色散特性

**中图分类号:** TN253    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)04-1044-06

## Hybrid dual-cladding photonic crystal fiber with high birefringence

Li Zhiquan, Li Sha, Hao Rui, Li Xiaoyun, Zheng Wenying

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** In this paper, a kind of hybrid cladding photonic crystal fiber was proposed. The model field distribution, birefringence, confinement loss and chromatic dispersion of fiber fundamental mode were simulated by multipole method. It was found that the newly designed fiber shows relatively higher birefringence and lower confinement loss. Then the birefringence and confinement loss of the hybrid cladding photonic crystal fiber were dominated by cladding air holes in the fiber. Simulation results show that the dispersion and dispersion slope are both negative over C band and L band. The birefringence is higher than  $10^{-2}$ , and the confinement loss is lower than  $10^{-5}\ \text{dB/m}$  under the condition of  $\Lambda=1.0\ \mu\text{m}$ ,  $d_1=d_2=d_3=0.8\ \mu\text{m}$  at the wavelength of 1.55  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** photonic crystal fiber; multipole method; birefringence; confinement loss; chromatic dispersion

收稿日期: 2012-09-05; 修订日期: 2012-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(61172044); 河北省科学技术研究与发展计划项目(11215170);  
秦皇岛市科学技术研究与发展计划项目(201101A105)

作者简介: 李志全(1954-), 男, 教授, 博士, 主要从事光纤传感及非线性光电检测方面的研究。Email: lzq54@ysu.edu.cn

### 0 引言

光子晶体光纤(PCF)也称多空气孔光纤或者微结构光纤,是基于光子晶体技术的一种新型光纤,是光子晶体在二维空间的典型应用<sup>[1]</sup>。根据其导光机理的不同,光子晶体光纤可分为两种:(1)全内反射光子晶体光纤(TIR-PCF),它是依赖全内反射效应导光<sup>[2]</sup>,其纤芯折射率比包层的有效折射率高,光束在纤芯中按照改进的全内反射原理进行传输。(2)光子带隙光子晶体光纤(PBGF),这种光纤按照光子带隙效应导光,即光纤包层结构由周期性排列的空气孔产生光子带隙,对频率在带隙内的光子存在带隙效应,使光只能在纤芯中传导而不能在包层中传播<sup>[3]</sup>。与传统光纤相比,PCF 具有许多优异的传输特性,比如无截止单模传输特性、高非线性、大的有效模场面积、高双折射<sup>[4-6]</sup>和较宽波长范围内的可控色散特性<sup>[7]</sup>。对于 PCF 的研究,研究热点集中在高双折射和限制损耗以及双零点色散波长或超低、超平坦色散性能等主题。到目前为止,同时考虑 PCF 的色散、双折射及限制损耗特性等因素的文献鲜有报导。在实际研究中,PCF 的色散特性及限制损耗均可以通过调整光纤结构参数得以实现,同时 PCF 的双折射特性可以通过改变两正交轴空气孔直径的大小获得。高双折射 PCF 的双折射可达到  $10^{-3}$  或  $10^{-2}$ ,比传统 PCF 的高出 1~2 个数量级。高双折射光子晶体光纤可应用于通讯系统中以减小偏振模式色散的影响,还可用于光纤传感、新型光器件等的研究<sup>[8]</sup>。

文中设计了一种新的矩形和八边形混合的双包层光子晶体光纤。与传统的光纤结构相比,孔间距( $\Lambda=1.0 \mu\text{m}$ )保持不变,只需改变包层空气孔直径的大小,便可有效控制双折射、色散和限制损耗特性。该结构是由三角晶格排列而成,且空气孔为圆形,便于制作和实现。

### 1 理论模型研究

利用多极法,模场可以用柱谐函数展开<sup>[9]</sup>。在第  $l$  个空气孔的内部,其纵向电场可以在极坐标系下展开为:

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

在第  $l$  个空气孔邻近的介质中,其纵向电场可以表示为:

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

式中:  $k_{\perp}^i = (k^2 n_i^2 - \beta^2)^{1/2}$ ;  $k_{\perp}^e = (k^2 n_e^2 - \beta^2)^{1/2}$ 。

光纤的限制损耗(单位为 dB/m)可由模式有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的虚部求得:

$$L = \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6 \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为波长,单位为  $\mu\text{m}$ 。

色散系数可由模式有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的实部求得

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 R_e(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2} \quad (4)$$

光纤的归一化双折射  $B$  表示为:

$$B = |n_{\text{eff}}^s - n_{\text{eff}}^f| \quad (5)$$

式中:  $n_{\text{eff}}^s$  和  $n_{\text{eff}}^f$  分别为基模的两个正交偏振态所对应的模式有效折射率。

### 2 模型仿真结果及其特性讨论

#### 2.1 不同结构的比较

文中设计的光纤结构是由外包层(三角形晶格排列的八边形)和内包层(三角形晶格排列的矩形)构成,如图 1 所示:(a) 纤芯缺失 4 个空气孔;(b) 纤芯

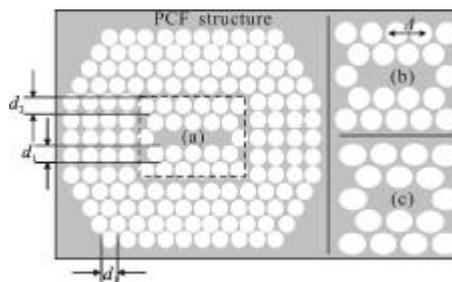


图 1 三种 PCFs 结构的横截面

Fig.1 Cross section of three types of PCFs structure

缺失 3 个空气孔;(c) 纤芯缺失 2 个空气孔。 $\Lambda=1.0 \mu\text{m}$ ,  $d_1=d_2=d_3=0.8 \mu\text{m}$ ,为了便于说明,分别命名为 A、B、C 结构,见图 2。图 2 中显示了三种 PCFs 结构的双折射曲线。可以看出:三种结构的双折射均随波长的增大而增大,且 A 结构的双折射高于 B、C 结构。可见随着纤芯缺失孔数的增加,双折射也随之增加。而 A、B 结构在较宽的波长范围内(1.3~1.7  $\mu\text{m}$ )双折射

均高于  $10^{-2}$ 。特别是 A 结构在  $1.7 \mu\text{m}$  处,双折射可达到  $1.8 \times 10^{-2}$ ,这主要由纤芯的非对称性引起,即 A 结构 X、Y 偏振态的折射率差值大于 B、C 结构。

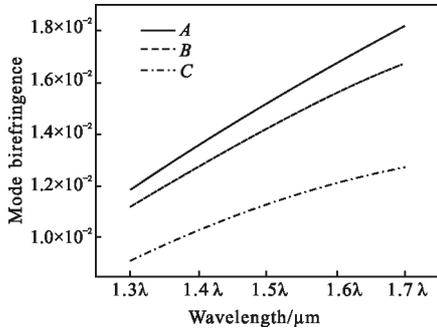


图 2 三种 PCFs 结构的模式双折射随波长的变化关系

Fig.2 Mode birefringence as a function of wavelengths for the three cases of PCFs with the parameters

图 3 显示了三种结构的限制损耗随波长的变化关系。从图中可以看出,三种结构的限制损耗值均随波长的增大而增加。无论是 X 偏振态还是 Y 偏振态, A 结构的限制损耗都小于其他两种结构。最为明显的是 A 结构的限制损耗在  $1.55 \mu\text{m}$  处最低, X 偏振态为  $4.9 \times 10^{-5} \text{ dB/m}$ , Y 偏振态为  $3.67 \times 10^{-4} \text{ dB/m}$ , 低于 B ( $1.785 \times 10^{-4} \text{ dB/m}$ ,  $1.19 \times 10^{-3} \text{ dB/m}$ )、C ( $1.9 \times 10^{-3} \text{ dB/m}$ ,  $8.96 \times 10^{-3} \text{ dB/m}$ ) 结构。且远远低于参考文献[10]中的  $10^{-2} \text{ dB/m}$ 。A 结构限制损耗之所以低于其他结构,是因为 A 结构包层的空气填充率高于 B、C 结构,使光较好的限制在纤芯内,从而获得较低的限制损耗。同时与传统 PCF 相比,相同的空气圈数,八边形包层具有更多的空气孔,在芯区附近便于实现较高的空气填充率和较低的折射率,具有较高的限光作用<sup>[11]</sup>。

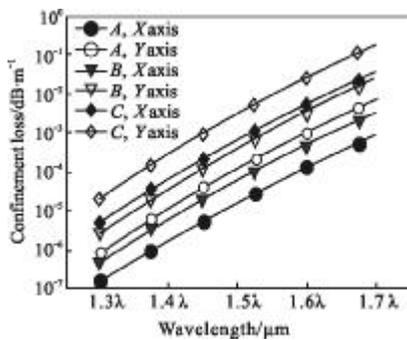


图 3 三种 PCFs 结构的限制损耗随波长的变化关系

Fig.3 Confinement loss as a function of wavelengths for the three cases of PCFs with the parameters

在数值模拟过程中发现,如图 4 所示。A、B、C 的 Y 偏振态色散值的绝对值均大于 X 偏振态,两偏振态色散绝对值均逐渐增大。而且在 C 波段( $1.53 \sim 1.565 \mu\text{m}$ )及 L 波段( $1.57 \sim 1.62 \mu\text{m}$ )均呈现负色散并具有负色散斜率,有利于对色散及色散斜率均为正值的光子晶体光纤进行色散补偿。

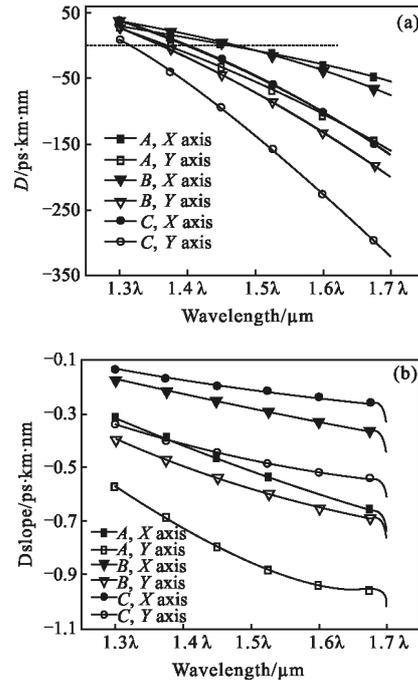


图 4 三种 PCFs 结构色散及色散斜率随波长变化关系

Fig.4 Chromatic dispersion and chromatic dispersion slope; as functions of wavelengths for the three cases of PCFs

图 5 显示了 A 结构两偏振态基模的场分布,结构参数为  $\Lambda=1.0 \mu\text{m}$ ,  $d_1=d_2=d_3=0.8 \mu\text{m}$ 。A 结构纤芯去除的空气孔最多。X 方向空气孔数量小于 Y 方向空气孔数,导致 Y 方向包层对纤芯的限制作用大于 X 方向,因而模场向 X 方向延伸。A 结构具有明显的纤

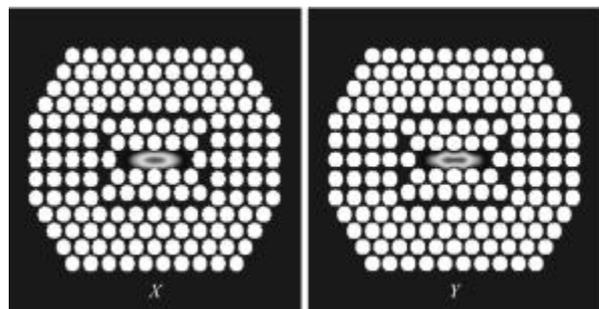


图 5 X、Y 偏振态基模的模场分布

Fig.5 Field distributions of X and Y polarization fundamental mode

芯不对称性,因而与 B、C 结构相比,双折射明显高于后两者,限制损耗较后两者降低了 1~2 个数量级。

### 2.2 光纤结构参数对其特性的影响

由于 A 结构的性能优于其他两种结构,所以主要研究 A 结构的结构参数对双折射、限制损耗及色散的影响。

#### 2.2.1 双折射特性分析

$\Lambda=1.0\ \mu\text{m}$  保持不变,  $d_1$  以  $0.1\ \mu\text{m}$  步长从  $0.6\ \mu\text{m}$  增加到  $0.8\ \mu\text{m}$ ,  $d_2=d_3=0.8\ \mu\text{m}$  时, A 结构双折射随波长的变化关系如图 6(a) 所示。  $d_2$  以  $0.05\ \mu\text{m}$  步长从  $0.7\ \mu\text{m}$  增加到  $0.8\ \mu\text{m}$ ,  $d_1=d_3=0.8\ \mu\text{m}$  时, A 结构双折射随波长的变化关系如图 6(b) 所示。  $d_3$  以  $0.05\ \mu\text{m}$  步长从  $0.65\ \mu\text{m}$  增加到  $0.8\ \mu\text{m}$ ,  $d_1=d_2=0.8\ \mu\text{m}$  时, A 结构双折射随波长的变化关系如图 6(c) 所示。从图中可

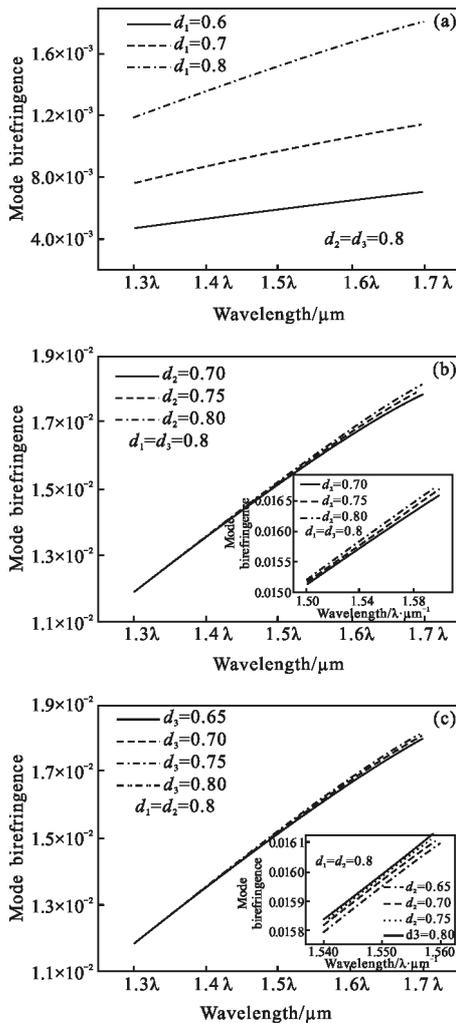


图 6 孔径分别改变时双折射随波长的变化关系图

Fig.6 Birefringence as a function of wavelength with air hole diameters varied respectively

明显看出,随着空气孔孔径的增加,光纤双折射随着波长逐渐增加,  $1.55\ \mu\text{m}$  处可达到  $1.599\times 10^{-2}$ , 高于参考文献[11]中的双折射,甚至比参考文献[12]中的双折射高一个数量级,并且在长波长段增加更为明显。主要是因为短波长段光被限制在纤芯内,包层空气孔对场的影响较小,纤芯的非对称性起主要作用,而随着波长的增加,长波长段光扩散到包层区,模场也将一定程度上受到包层不对称性的影响。由图 6(c)中局部放大图可以看出,随着外包层空气孔径  $d_3$  的增加,该光纤结构的双折射几乎不变,因此该结构的双折射主要受内包层空气孔径的影响,尤其是最内层空气孔径对双折射的影响最为明显。尽管在  $1.55\ \mu\text{m}$  处双折射可达到  $1.599\times 10^{-2}$ ,但是在判断一个光纤结构是否可用时,同样需要考虑它的限制损耗的大小。

#### 2.2.2 限制损耗特性分析

图 7 为限制损耗随波长的变化关系,孔间距固定为  $1.0\ \mu\text{m}$ 。图(a)为  $d_2=d_3=0.8\ \mu\text{m}$ ,图(b)为  $d_1=d_3=0.8\ \mu\text{m}$ 。可以看出,随着内包层空气孔直径的增加,限制损耗变化的幅度不大。可见,改变内包层孔径对双折射影响较大,尤其是最内层空气孔径对双折射的影响,而对限制损耗的影响并不明显。

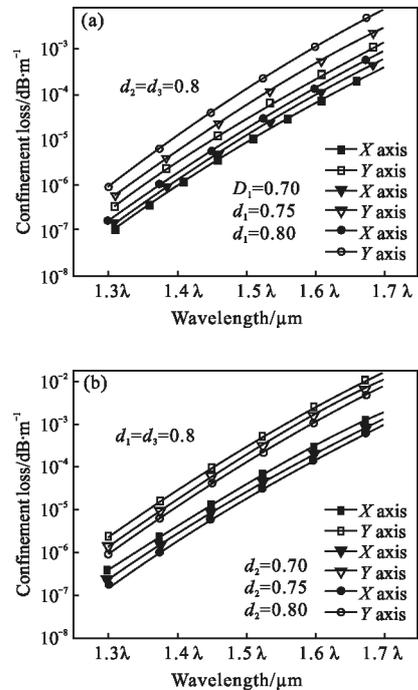


图 7 限制损耗随波长的变化关系,孔间距固定为  $1.0\ \mu\text{m}$

Fig.7 Confinement loss as a function of wavelength with the hole pitch fixed as  $1.0\ \mu\text{m}$

图 8 为限制损耗随波长的变化关系。图(a)中  $\Lambda=1.0 \mu\text{m}$ ,  $d_1=d_2=0.8 \mu\text{m}$ ,  $d_3$  变化。图 (b)中  $d_1=d_2=d_3=0.8 \mu\text{m}$ , 空气孔圈数不同。当  $d_1=d_2=0.8 \mu\text{m}$  时, A 结构限制损耗随波长的变化关系。可以看出, X 偏振态和 Y 偏振态的限制损耗都随着外层空气孔直径的增加而逐渐减小。主要原因是随着外包层空气孔直径的增加, 包层空气填充率随

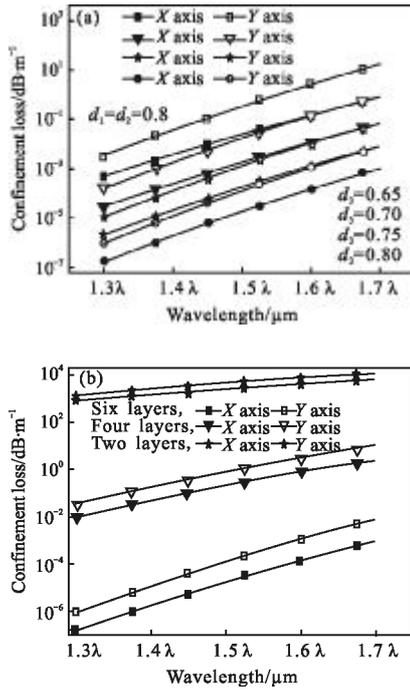


图 8 限制损耗随波长的变化关系。

Fig.8 Confinement loss as a function of wavelength

之增加, 提高了光纤纤芯与包层之间的折射差, 有效减少了光的外泄, 因此可有效的减少限制损耗。随着包层圈数的增加, 限制损耗呈 2~3 个数量级下降, 如图 8(b)所示。可见, 该结构的限制损耗主要受外包层空气孔径大小和包层圈数的影响, 可通过增加包层圈数来进一步降低限制损耗。

### 2.2.3 色散特性分析

图 9 中图(a)和(c)中可以看出, 随着空气孔径  $d_1$ 、 $d_3$  的增加, X、Y 偏振态的零点色散波长几乎没有任何移动, 而图 9(b)中, 随着空气孔径  $d_2$  的增加, 零点色散波长向长波长方向移动, 可见该结构中次内层空气孔对光纤的色散起决定性作用。当选取光纤参数  $\Lambda=1.0 \mu\text{m}$ , 当  $d_1=d_2=d_3=0.8 \mu\text{m}$  时, 设计光纤在 C 波段(1.53~1.565  $\mu\text{m}$ )及 L 波段(1.57~1.62  $\mu\text{m}$ )色散及色散斜率均为负值, 同时设计光纤在 C 波段具有较

高的双折射和较低的限制损耗。

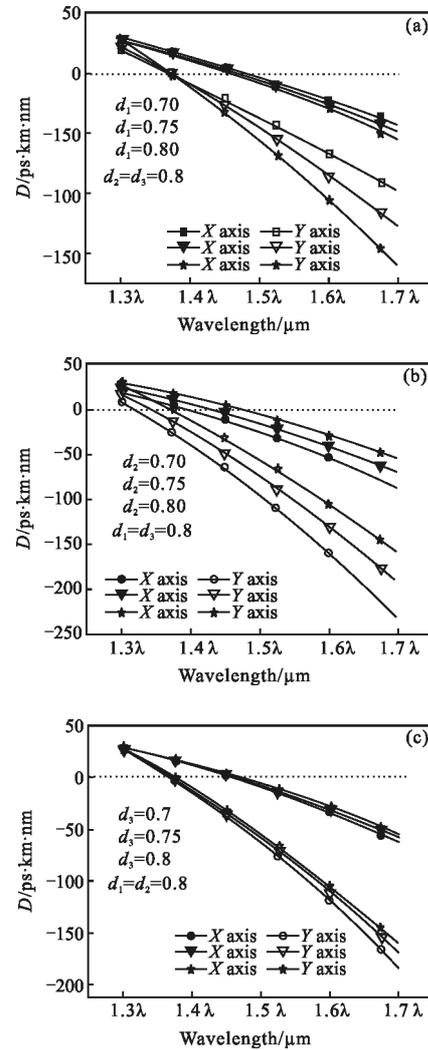


图 9 孔径分别改变时色散随波长的变化关系图

Fig.9 Chromatic dispersion as a function of wavelength with air hole diameters varied respectively

## 3 结 论

基于多极法优化设计了一种由三角形晶格组成的矩形内包层和八边形外包层的双包层 PCF 结构。并对其基模的模场分布、双折射、限制损耗等特性进行了数值模拟。模拟结果显示: 通过调整结构参数, 通信波长 1.55  $\mu\text{m}$  处双折射可达到  $1.599 \times 10^{-2}$ ; 比传统光纤高 2 个数量级, 限制损耗 X 偏振态为  $4.9 \times 10^{-5} \text{ dB/m}$ , Y 偏振态为  $3.67 \times 10^{-4} \text{ dB/m}$ ; 色散分析表明: 在 C 波段(1.53~1.565  $\mu\text{m}$ )及 L 波段(1.57~1.62  $\mu\text{m}$ )具有一定的色散补偿作用, 该结构的双折射和色散特性主要由内包层孔径大小决定, 而外包层孔径大小及包层圈数

对限制损耗大小起决定性作用。文中设计的光子晶体光纤通过传统的毛细管堆积技术便可铸造,不需要复杂的设计,对制作工艺没有特殊要求,可应用于保偏光纤偏振器,在高速通信领域、增加光纤传输效率和色散补偿等方面也具有很好的应用前景。同时为具有上述类似性质的 PCF 提供了一定的理论基础。

#### 参考文献:

- [1] Wang Wei, Zhu Zimin. Analysis of photonic crystal fibers and its application in supercontinuum[J]. *Infrared and laser engineering*, 2007, 36(5): 684-688. (in Chinese)  
王伟, 竺子民. 光子晶体光纤分析及其在超连续谱中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(5): 684-688.
- [2] Limpert J, Liem A, Reich M, et al. Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2004, 12(7): 1313-1319.
- [3] Ma Xiyang. Principle and Application of Photonic Crystals [M]. Bei jing: Science Press, 2010: 166-167. (in Chinese)  
马锡英. 光子晶体原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 166-167.
- [4] Birks T A, Knight J C, Russell P St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt Lett*, 1997, 22 (13): 961-963.
- [5] Birks T A, Mogilevtsev D, Knight J C, et al. Dispersion compensation using single material fibers [J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1999, 11(6): 674-676.
- [6] Zhao Xingtao, Hou Lantian, Liu Zhaolun, et al. Dispersion analysis of photonic crystal fiber using improved full-vectorial effective index method [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(4): 2275-2280. (in Chinese)  
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[J]. *物理学报*, 2007, 56(4): 2275-2280.
- [7] Knight J C, Arriaga J, Birks T A, et al. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photonic Technol Lett*, 2000, 12(7): 807-809.
- [8] Kuang Liangbin, Shi Zhidong. Research of microstructure fibers and their birefringence [J]. *Laster & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(9): 23-27. (in Chinese)  
旷良彬, 石志东. 微结构光纤及其双折射特性的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(9): 23-27.
- [9] 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. (in Chinese)  
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.
- [10] Cui Yanling, Hou Lantian. Dispersion characteristic of a new hybrid cladding photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(4): 2571-2576. (in Chinese)  
崔艳玲, 侯蓝田. 一种新型混合双包层光子晶体光纤的色散特性研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(4): 2571-2576.
- [11] Xia Changming, Zhou Guiyao, Han Ying, et al. Investigation of v-type photonic fiber with high birefringence [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60 (9): 094213 -1 -094213 -6. (in Chinese)  
夏长明, 周桂耀, 韩颖, 等. V形高双折射光子晶体光纤特性研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(9): 094213-1-094213-6.
- [12] Jian Liang, Mao Jinyun, Wei Jinkong, et al. Highly birefringent photonic crystal fibers with flattened dispersion and low effective mode area[J]. *Optic-International Journal for Light and Electron Optics*, 2011, 122(23): 2151-2154.