

## 高双折射双芯光子晶体光纤偏振分束器

郭士亮, 黄 惠, 童 凯, 王志斌, 胡春海, 李志全

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 设计了一种基于双折射效应的新型矩形纤芯光子晶体光纤偏振分束器, 通过在矩形晶格结构的光子晶体光纤的每个纤芯中引入一对椭圆来增加结构的双折射。应用全矢量有限元法(FEM)分析了双芯光子晶体光纤中结构参数对双折射和耦合长度特性的影响, 数值模拟了该偏振分束器的性能。结果表明: 增大椭圆率可以在增大结构的双折射的同时减小耦合长度, 并且该分束器在工作波长为  $1.55\ \mu\text{m}$ 、传输长度为  $282\ \mu\text{m}$  的光纤中能够实现偏振状态的隔离, 消光比达到最小值  $-45.42\ \text{dB}$ , 并且在  $1.507\sim 1.596\ \mu\text{m}$ 、带宽为  $89\ \text{nm}$  的范围内消光比小于  $-10\ \text{dB}$ 。

**关键词:** 光子晶体光纤; 偏振分束器; 全矢量有限元法; 耦合长度

**中图分类号:** TN929.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1863-06

## Polarization splitter based on highly birefringent dual-core photonic crystal fibers

Guo Shiliang, Huang Hui, Tong Kai, Wang Zhibin, Hu Chunhai, Li Zhiqian

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

**Abstract:** Based on the birefringence effect, a novel dual-core photonic crystal fiber polarization beam splitter was proposed. The birefringence of the splitter was improved by introducing dual elliptical air holes into each fiber core of the rectangle lattice structure photonic crystal fiber. Using the full-vector finite element method (FEM), the impacts of structural parameters of dual-core photonic crystal fiber on birefringence and coupling length were analyzed. And the characteristics of the splitter, such as coupling length, extinction ratio and bandwidth, were investigated. Numerical simulation results demonstrate that the coupling length is decreased while the birefringence is increased by increasing the ellipticity, and the isolation of the polarization state can be achieved and the polarized light extinction ratio is  $-45.42\ \text{dB}$  when the working wavelength and transfer-length of the fiber are  $1.55\ \mu\text{m}$  and  $282\ \mu\text{m}$ , respectively. Besides, the extinction ratio is less than  $-10\ \text{dB}$  when the bandwidth is  $89\ \text{nm}$  as well as the range of the wavelength is  $1.507\sim 1.596\ \mu\text{m}$ .

**Key words:** photonic crystal fibers; polarization splitter; full-vector finite element method; coupling length

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(61107039, 61172044); 河北省自然科学基金(F2012203204)

作者简介: 郭士亮(1984-), 男, 博士生, 主要从事光子晶体光纤设计及应用方面的研究。Email: guos10112@163.com

导师简介: 胡春海(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事数字图像处理和光电检测方面的研究。Email: fred-hu@ysu.edu.cn

## 0 引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)由于具有高双折射、极大或极小的有效模场面积、可调色散及强非线性等特性<sup>[1-7]</sup>,自 1996 年问世以来便引起了研究者的极大关注。在光子晶体光纤中,空气孔的大小、位置等可以进行灵活选择,这样有利于构建复杂的结构。目前,探索光子晶体光纤的新应用成为研究者对其进行理论及实验研究的热点<sup>[8]</sup>。偏振分束器作为光学系统中的重要器件在光纤通信及光纤传感器方面具有重要应用。光子晶体光纤偏振分束器根据其结构的不同可以分为三芯光子晶体光纤偏振分束器和双芯光子晶体光纤偏振分束器<sup>[9]</sup>。三芯 PCF 偏振分束器是利用谐振作用使得偏振作用只发生在一个方向上,从而引起偏振模式的分离<sup>[10]</sup>。双芯 PCF 偏振分束器利用双折射效应实现两偏振态的分离。双芯光子晶体光纤可以通过引入椭圆、不对称纤芯、不同孔径的圆孔及正交方向上不同的孔间距等方法获得高双折射。

各国研究者对使用软玻璃材料代替二氧化硅制作光子晶体光纤产生了极大的兴趣。当前主要研究的软玻璃材料根据其组成物质可以划分为氧化物、氟化物及硫化物三类。与二氧化硅材料相比,软玻璃材料具有以下优点:传输光波可处于红外波段;高线性及高非线性折射率;熔点范围为 200~1000 °C,远低于二氧化硅材料的熔点(1800~2300 °C)<sup>[11]</sup>。周桂耀等研究了使用 SF6 玻璃制备光子晶体光纤<sup>[12]</sup>。刘硕等分析了硫系玻璃双芯光子晶体光纤的耦合特性<sup>[13]</sup>,并设计了基于碲玻璃的偏振分束器<sup>[14]</sup>。因此,以软玻璃作为基质材料有望设计出具有高双折射、高非线性及更好传输特性的 PCF。文中采用 SF6 玻璃作为基质材料,通过在每个纤芯中引入一对椭圆孔来增加双折射,设计了一种新型的双芯 PCF 偏振分束器。

## 1 光纤结构及理论分析

文中采用全矢量有限元法模拟了双芯光子晶体光纤的模式特性。图 1 为设计的双芯光子晶体光纤偏振分束器的横截面示意图,其中空气孔以矩形晶格形状排列,矩形长边长度为  $\Lambda$ ,短边长度为  $w$ ,且

$\zeta = \Lambda/w$ 。包层中的空气孔直径取为  $d$ ,两纤芯间的空气孔直径为  $d_0$ ,椭圆的长轴为  $a$ ,短轴为  $b$ ,椭圆率为  $\eta = b/a$ ,整个光纤的基质为 SF6 玻璃,忽略材料色散,其折射率为  $n = 1.76$ ,空气孔的折射率为  $n_{\text{air}} = 1$ 。

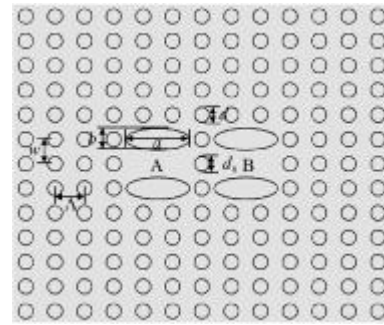


图 1 双芯光子晶体光纤截面图

Fig.1 Cross section of dual-core PCF

模式双折射是衡量光纤保偏特性的主要指标,光纤的双折射度越大,保偏性能越理想<sup>[15]</sup>。模式双折射度可以表示为:

$$B = |\text{Re}(n_y) - \text{Re}(n_x)| \quad (1)$$

式中: $n_x$ 、 $n_y$ 分别为模式中在 X 偏振方向和 Y 偏振方向的有效折射率; $\text{Re}$ 为有效折射率的实部。

在双芯光子晶体光纤中,总的模式可以视为 4 种模式的叠加,分别为 X 偏振方向的偶模  $E_{xe}(x,y)$  和奇模  $E_{xo}(x,y)$ , Y 偏振方向的偶模  $E_{ye}(x,y)$  和奇模  $E_{yo}(x,y)$ ,与其对应的传播常数和有效折射率分别为  $E_{xe}(x,y)$  和奇模  $\beta_{xe}$ 、 $\beta_{xo}$ 、 $\beta_{ye}$ 、 $\beta_{yo}$  和  $n_{xe}$ 、 $n_{xo}$ 、 $n_{ye}$ 、 $n_{yo}$ <sup>[14]</sup>,并且两种偶模  $E_{xe}(x,y)$ 、 $E_{ye}(x,y)$  可认为光纤的基模,两种奇模  $E_{xo}(x,y)$ 、 $E_{yo}(x,y)$  可视为光纤的二次模<sup>[16]</sup>。根据波导模式耦合理论,双芯光子晶体光纤在两个偏振方向上的耦合长度为:

$$L_{x,y} = \frac{\pi}{\beta_e^{x,y} - \beta_o^{x,y}} = \frac{\lambda}{2(n_e^{x,y} - n_o^{x,y})} \quad (2)$$

式中: $\lambda$ 为工作波长。

在对称双芯光子晶体光纤中,光能沿着光纤周期的从一个纤芯全部转移到另一个纤芯中,然后再返回。当光能入射到一个纤芯 A 中,在输出端的输出功率  $P_{\text{out}}^{x,y}$  的表达式为:

$$P_{\text{out}}^{x,y} = P_{\text{in}}^{x,y} \cos^2 \left( \frac{\pi}{2} \frac{L}{L_{x,y}} \right) \quad (3)$$

式中: $P_{\text{in}}^{x,y}$ 为光能的输入功率; $L$ 为光纤长度。

消光比(Polarization Extinction, ER)作为衡量偏振分束器性能的一个重要参数指标,表示在纤芯 A 的输出端,不同偏振态光场的输出功率的比值。消光比绝对值越大,分光效果越理性。其表达式为:

$$ER=10\log_{10}\frac{P_{out}^y}{P_{out}^x} \quad (4)$$

## 2 数值分析

### 2.1 结构参数对光纤的双折射的影响

模式双折射主要是由纤芯附近空气孔的不对称性等因素引起的,文中通过调整孔间距、椭圆率和纤芯间空气孔的直径分析了其对双折射的影响。图 2(a)为  $\zeta=1.2, d_0=0.4 \mu\text{m}, d=0.6 \mu\text{m}, \eta=0.34, a=2.6 \mu\text{m}$  保持不变,  $\Lambda$  由 1.2 增加到 1.8 时,双折射随波长的变化曲线。从图中可以看出,对于确定的  $\Lambda$ ,双折射

随着传输波长的增大而增大。这主要是因为模场随着传输波长的增加而逐渐向外扩展,使得包层的不对称性对双折射的影响逐渐增大。在确定传输波长处,双折射随孔间距  $\Lambda$  的增加而显著减小,如在  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  处,  $\Lambda=1.2 \mu\text{m}$  和  $\Lambda=1.8 \mu\text{m}$  时,双折射分别为  $1.795 \times 10^{-2}$  和  $1.62 \times 10^{-3}$ 。这主要是因为随着孔间距  $\Lambda$  的增大,纤芯面积增大,光场与内层空气孔的作用减弱,双折射减小。

图 2(b)为  $\Lambda=1.2 \mu\text{m}, \zeta=1.2, d_0=0.4 \mu\text{m}, d=0.6 \mu\text{m}, a=2.6 \mu\text{m}$  保持不变,  $\eta$  由 0.28 增加到 0.34 时,双折射随传输波长变化的曲线图。在确定传输波长处,双折射随椭圆率  $\eta$  的增加而逐渐增大。这主要是因为光场随着椭圆率  $\eta$  增大而受到内层空气孔不对称性的影响增大,导致双折射增大。

图 2(c)为  $\Lambda=1.2 \mu\text{m}, \zeta=1.2, d=0.6 \mu\text{m}, \eta=0.34, a=2.6 \mu\text{m}$  保持不变,  $d_0$  由  $0.4 \mu\text{m}$  增加到  $0.6 \mu\text{m}$  时,双折射随传输波长变化的曲线图。由图可知,在确定传输波长处,双折射随空气孔直径  $d_0$  的增加而逐渐增大,这主要是因为空气孔直径  $d_0$  增加时加大了结构的不对称性,从而使双折射增加。因此,可以通过减小孔间距  $\Lambda$  或增加椭圆率  $\eta$  和空气孔直径  $d_0$  来提高光子晶体光纤的双折射,从而增大耦合长度差。

### 2.2 结构参数对光纤的耦合长度的影响

为了进一步研究纤芯周围空气孔对耦合长度的影响,研究了椭圆率和纤芯间空气孔直径的改变对耦合长度变化的影响。图 3(a)为  $\zeta=1.2, d_0=0.4 \mu\text{m}, d=0.6 \mu\text{m}, \eta=0.34, a=2.6 \mu\text{m}$  保持不变,  $\Lambda$  由 1.2 增加到 1.8 时,各偏振方向上耦合长度随波长的变化曲线。由图可知,对于确定的  $\Lambda$ ,耦合长度随着传输波长的增大而减小。这主要是因为随着波长增加,模场逐渐扩散到包层中,引起纤芯间的耦合效应增强,造成光纤的耦合长度减小。X 偏振方向的耦合长度大于 Y 偏振方向,且随传输波长的增加这种差异逐渐降低。在确定传输波长处,耦合长度随着  $\Lambda$  的增大而增大,这与参考文献[15]中耦合长度随着孔间距  $\Lambda$  的增大而减小不同。这主要是因为随着孔间距  $\Lambda$  的增大,模场因包层空气填充率减小而向外扩散的同时纤芯间的距离增大,导致模场间的距离增大。这样,耦合效应减弱,耦合长度增加。

图 3(b)为  $\Lambda=1.2 \mu\text{m}, \zeta=1.2, d_0=0.4 \mu\text{m}, d=0.6 \mu\text{m},$

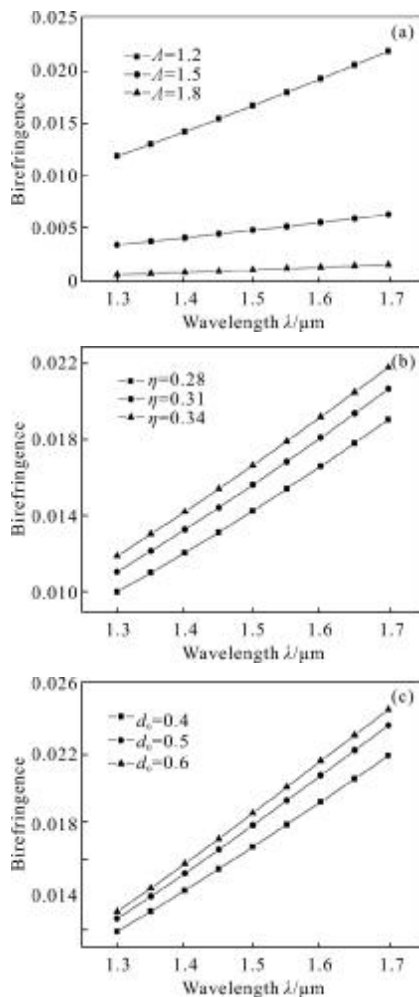


图 2 双折射随  $\Lambda, \eta$  和  $d_0$  的变化

Fig.2 Birefringence variation with  $\Lambda, \eta$  and  $d_0$

$a=2.6\ \mu\text{m}$  保持不变,  $\eta$  由 0.28 增加到 0.34 时, 各偏振方向上耦合长度的变化情况。在确定传输波长处, 耦合长度随着  $\eta$  的增加而逐渐减小。这主要在于随着  $\eta$  的增大, 光场由于受到纵向压缩而向横向扩散, 导致纤芯间的耦合效应增强, 光纤的耦合长度减小。

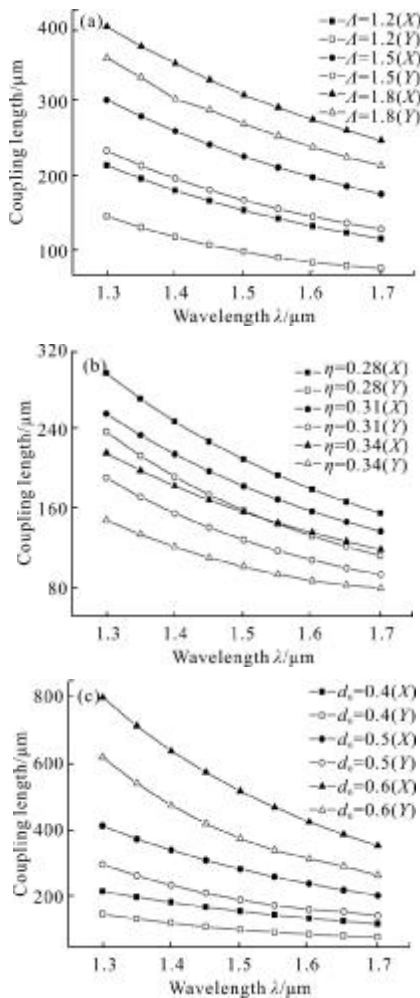


图 3 耦合长度随  $\Lambda$ ,  $\eta$  和  $d_0$  的变化

Fig.3 Coupling length variation with  $\Lambda$ ,  $\eta$  and  $d_0$

图 3(c) 为  $\Lambda=1.2\ \mu\text{m}$ ,  $\zeta=1.2$ ,  $d=0.6\ \mu\text{m}$ ,  $\eta=0.34$ ,  $a=2.6\ \mu\text{m}$  保持不变,  $d_0$  由  $0.4\ \mu\text{m}$  增加到  $0.6\ \mu\text{m}$  时, 各偏振方向上耦合长度的变化情况。由图可知, 在确定传输波长处, 耦合长度随空气孔直径  $d_0$  的增加而显著增大, 如在  $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$  处,  $d_0=0.4\ \mu\text{m}$  和  $d_0=0.6\ \mu\text{m}$  时, X 偏振方向耦合长度分别为  $145.8\ \mu\text{m}$  和  $467.7\ \mu\text{m}$ , 空气孔直径  $d_0$  对耦合长度的影响显著。这主要是因为空气孔直径  $d_0$  增加, 两纤芯间的距离增加, 纤芯间的耦合效应减弱, 导致耦合长度增加。由

此可知, 在文中所设计的结构中, 通过增加椭圆率  $\eta$  和减小孔间距  $\Lambda$  与空气孔直径  $d_0$  来减小光子晶体光纤的各偏振方向的耦合长度。

### 2.3 偏振分束器设计

根据上述对文中提出的双芯光子晶体光纤的数值分析, 优化光纤的结构参数, 设计了一种基于该光纤的新型偏振分束器, 其中  $\Lambda=1.2\ \mu\text{m}$ ,  $\eta=0.34$ ,  $d_0=0.40\ \mu\text{m}$ 。

图 4 为双芯光子晶体光纤耦合长度随传输波长的变化曲线。由图可知, 在波长  $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$  时, X 偏振方向和 Y 偏振方向的耦合长度分别为  $L_x=145.8\ \mu\text{m}$ 、 $L_y=93.9\ \mu\text{m}$ , 这远小于参考文献[17]中的耦合长度。

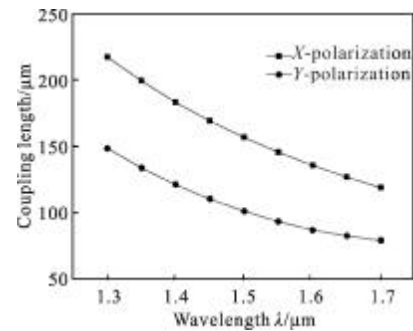


图 4 X 偏振光和 Y 偏振光的耦合长度

Fig.4 Coupling length of X polarization and Y polarization

图 5 为在波长  $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$  处, X 偏振方向和 Y 偏振方向上的纤芯的归一化功率随传输距离变化的曲线图。由图可知, 当光束从纤芯 A 中入射, 纤芯 A 中 X 和 Y 偏振方向上的能量分布将随着传输距离的增加而发生变化。对于每个确定的 X 和 Y 偏振方向, 能量将在纤芯 A 和 B 中进行周期性的转移。在光纤长度  $L=282\ \mu\text{m}$  时, X 和 Y 偏振光实现了分离, 即将波长  $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$  的光输入到纤芯 A 中, 通过长度为  $282\ \mu\text{m}$

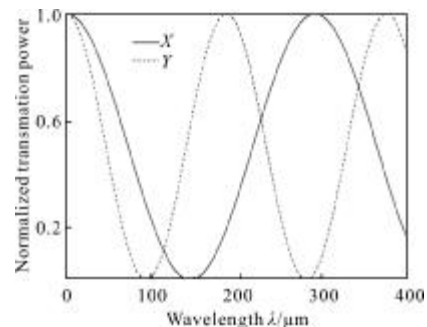


图 5 纤芯 A 中 X、Y 偏振光的归一化功率随传输距离的变化曲线

Fig.5 Normalized power in core A versus propagation distance

的双芯光子晶体光纤后, Y 偏振光可以完全耦合到另一个纤芯 B 中, 但 X 偏振光仍留在纤芯 A 中, 文中所设计的偏振分束器的传输长度比参考文献[17]中的传输长度小一个数量级, 这为设计较短传输长度的偏振分束器提供了可能。

图 6 为在双芯光子晶体的传输长度为  $282 \mu\text{m}$  时, 消光比随传输波长变化的曲线。由图可知, 在波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  时, 消光比可取得最小值, 即  $ER=-45.42 \text{ dB}$ , 高于参考文献[16-18]中的值, 并且在入射光波长为  $1.507 \sim 1.596 \mu\text{m}$  时, 其消光比均小于  $-10 \text{ dB}$ 。由此可知, 按照上述参数设计的偏振分束器, 在波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  附近, 消光比小于  $-10 \text{ dB}$  的波长范围为  $89 \text{ nm}$ 。

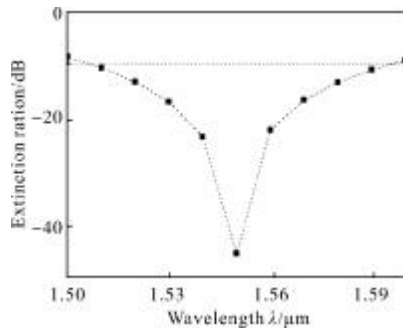


图 6 双芯光子晶体光纤偏振分束器的消光比随波长的变化曲线

Fig.6 Dependence of extinction ratio with wavelength in PCF polarization splitter

### 3 结论

文中设计了一种以 SF6 玻璃为基质材料的对称双芯光子晶体光纤。通过在每个纤芯中引入一对椭圆孔来增加结构的不对称性, 从而获得较高的双折射。采用全矢量有限元法数值模拟了结构参数对双折射和耦合长度的影响。数值分析表明, 孔间距增加时, 光线的双折射将会减小而耦合长度则不断增大; 随着椭圆率的增加, 光纤的双折射会逐渐增加而耦合长度则逐渐减小; 纤芯间空气孔直径的减小会引起双折射的降低和耦合长度的减小。根据上述结构, 优化结构参数设计了一个长度为  $282 \mu\text{m}$  的偏振分束器。分析表明, 在波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  处, 消光比达到  $-45.42 \text{ dB}$ , 且波长在  $1.507 \sim 1.596 \mu\text{m}$ , 带宽为  $89 \text{ nm}$  范围内, 消光比小于  $-10 \text{ dB}$ , 与同类型的双芯偏振分束器相比, 其综合性能比较突出。

### 参考文献:

- [1] Li Wei, Chen Hui, Chen Ming. High symmetry of the mode field distribution photonic crystal fiber with high birefringence [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39 (2): 0205002. (in Chinese)  
黎薇, 陈辉, 陈明. 高对称性模场分布的高双折射光子晶体光纤[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0205002.
- [2] Yu Chongxiu, Yuan Jinhui, Shen Xiangwei. Recent progress of study on photonic crystal fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900139. (in Chinese)  
余重秀, 苑金辉, 申向伟. 光子晶体光纤的研究新进展[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900139.
- [3] 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. (in Chinese)  
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.
- [4] Wang Dan, Zheng Yi. Numerical simulation and analysis of double cladding photonic crystal fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0806010. (in Chinese)  
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.
- [5] Juan Hu D J, Shumb D D, Lu C, et al. Dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber for nonlinear applications[J]. Opt Commun, 2009, 282(20):4072-4076.
- [6] Wang Yanbin, Hou Jing, Liang Dongming, et al. Study of supercontinuum generation in the normal-dispersion regime of photonic crystal fiber [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 1073-1077. (in Chinese)  
王彦斌, 侯静, 梁冬明, 等. 光子晶体光纤正常色散区超连续谱产生的研究[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 1073-1077.
- [7] Guan Shouhua, Yu Qingxu, Zheng Jianzhou. Study on the extreme characteristics of dispersion of photonic crystal fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0806001. (in Chinese)  
关寿华, 于清旭, 郑建洲. 光子晶体光纤色散极值特性的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0806001.
- [8] Lin Zhang, Changxi Yang. Polarization splitter based on photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2003, 11(9): 1015.
- [9] Chen Mingyang, Sun Bing, Zhang Yongkang, et al. Design of broadband polarization splitter based on partial coupling in square-lattice photonic-crystal fiber [J]. Applied Optics, 2010, 45(19): 3042-3048.

- [10] Liu Shuo, Li Shuguang, Yin Guobing, et al. A novel polarization splitter in ZnTe tellurite glass three-core photonic crystal fiber [J]. *Optics Communications*, 2012, 285: 1097-1102.
- [11] Jiang X, Euser T G, Abdolvand A, et al. Single-mode hollow-core photonic crystal fiber made from soft glass [J]. *Optics Express*, 2011, 19(16): 15439-15444.
- [12] Zhou Guiyao, Hou Zhiyun, Li Shuguang, et al. Fabrication of glass photonic crystal fibers with a die-cast process [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(18): 4433-4436.
- [13] Liu Shuo, Li Shuguang, Fu Bo, et al. Analysis of coupling characteristics of midinfrared high polarization chalcogenide glass dual-core photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(3): 034217-1-134217-6. (in Chinese)  
刘 硕, 李曙光, 付博, 等. 中红外高保偏硫系玻璃双芯光子晶体光纤耦合特性研究 [J]. *物理学报*, 2011, 60(3): 034217-1-134217-6.
- [14] Liu Shuo, Li Shuguang, Du Ying. Analysis of the characteristics of the polarization splitter based on tellurite glass dual-core photonic crystal fiber [J]. *Optics Laser Technology*, 2012, 44: 1813-1817.
- [15] Li Dan, Liu Min, Jian Duo, et al. Characteristics of highly birefringent dual-core photonic crystal fibers [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0405005. (in Chinese)  
李丹, 刘敏, 简多, 等. 高双折射双芯光子晶体光纤特性 [J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0405005.
- [16] Wen Ke, Wang Jingyuan, Wang Rong. Polarization splitter based on two-core rectangular-lattice photonic crystal fibers [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2008, 25(4): 505-508. (in Chinese)  
文科, 汪井源, 王荣. 矩形晶格结构双芯光子晶体光纤偏振分束器的研究 [J]. *量子电子学报*, 2008, 25(4): 505-508.
- [17] Zhang Bin, Tan Xiaoling, Xue Ruiqiu, et al. Polarization splitter based on double rectangular-core photonic crystal fibers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 745-749. (in Chinese)  
张斌, 谭晓玲, 薛睿秋, 等. 双矩形纤芯光子晶体光纤偏振分束器 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 745-749.
- [18] Li Minrong, Cao Ye, Tong Zhengrong. Short length polarization splitter based on dual elliptical-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1005004. (in Chinese)  
李敏荣, 曹烨, 童峥嵘. 短长度的双椭圆纤芯光子晶体光纤偏振分束器 [J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1005004.