

# 矩形晶格双芯光子晶体光纤的耦合特性

耿开胜 关建飞

(南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210046)

**摘要** 基于平行波导横向耦合理论,研究了矩形气孔阵列的双芯光子晶体光纤的耦合特性,并数值计算了光纤的结构参量对耦合特性的影响。计算结果表明,在  $1.55 \mu\text{m}$  波长处,增大垂直方向气孔间距或缩小横向气孔间距并减小气孔半径都有利于减小光纤的耦合长度,耦合长度差也相应减小。在此基础上设计了一种基于矩形晶格结构具有耦合长度极短( $125 \mu\text{m}$ )、分离比较高(38 dB)的偏振分束器。

**关键词** 光学器件;双芯光子晶体光纤;耦合长度;偏振分束器;分离比

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0305007

## Coupling Characteristics of Dual-Core Photonic Crystal Fiber with Rectangular Lattice

Geng Kaisheng Guan Jianfei

(College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

**Abstract** The coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber with rectangular holes array are researched based on horizontal coupling theory of parallel waveguide. The affections of fiber's structural parameters for coupling characteristics are numerically calculated. The simulation results demonstrate that enlarging hole pitch in vertical or reducing hole pitch in horizontal and decreasing hole diameter can shorten the coupling length of fiber and the difference of coupling length in X- and Y- polarization. A kind of polarization splitters based on rectangular lattice structure with minimal coupling length ( $125 \mu\text{m}$ ) and higher extinction ratio (38 dB) is designed.

**Key words** optical devices; dual-core photonic crystal fiber; coupling length; polarization splitter; extinction ratio

**OCIS codes** 060.2310; 060.2330; 060.4510; 220.0220; 230.0230

## 1 引言

光纤通信技术的迅猛发展使得各种光无源器件纷纷问世。光纤耦合器就是其中一种重要的光无源器件,它可以完成光的传输、耦合、分束以及波分复用等功能,在光纤通信、传感及信号处理等方面有着极为广泛的应用。自光子晶体光纤(PCF)问世以来,这种由石英或空气孔构成缺陷,并利用全内反射机理或光子带隙效应导光的光纤飞速发展,各种基于光子晶体光纤的光无源器件被广泛研究,新型光

子晶体光纤耦合器件的制作和理论研究对于光子晶体光纤的实际应用和发展具有重要影响。

定向耦合器是发展较为迅速的光无源耦合器件,国外 Satoh 等<sup>[1]</sup>以及国内汪徐德等<sup>[2]</sup>分别设计出了具有波分复用功能的耦合器,其光纤长度分别为毫米量级和大于  $180 \mu\text{m}$ 。付博等<sup>[3]</sup>设计了一种高双折射光子晶体光纤并研究了其耦合及色散特性,其实现分离与再耦合的长度超过  $190 \mu\text{m}$ ;吴万青等<sup>[4]</sup>设计出了具有波长平坦特性的耦合器,陈明

收稿日期: 2012-10-17; 收到修改稿日期: 2012-11-26

基金项目: 江苏省高校自然科学基金(09KJB140005)和南京邮电大学引进人才科研启动项目(NY207005)资助课题。

作者简介: 耿开胜(1984—),男,硕士研究生,主要从事光纤通信与光子晶体光纤方面的研究。

E-mail: gks270@163.com

导师简介: 关建飞(1979—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信与光波技术领域方面的研究。

E-mail: guanjf@njupt.edu.cn(通信联系人)

阳等<sup>[5,6]</sup>研究了能实现宽带低偏振损耗和波长选择功能的耦合器,李宏雷等<sup>[7]</sup>研究和设计了具有宽带单偏单模特性的耦合器,但这些耦合器的耦合长度均在 500  $\mu\text{m}$  以上。马玲芳等<sup>[8]</sup>采用渐变空气孔设计了新型耦合器并分析了其宽带近零超平坦色散等特性,而耦合长度却在毫米量级。

偏振分束器是发展迅速的另一种光无源器件,该种器件能实现将两方向的偏振光分离的功能。Zhang 等<sup>[9,10]</sup>分别设计了窄带偏振分束器,分离比在 1.55  $\mu\text{m}$  处分别为 -11 dB 和 -20 dB。文科等<sup>[11]</sup>采用矩形晶格以及孙兵等<sup>[12]</sup>采用非对称芯设计了宽带偏振分束器,前者的分离比为 -16.9 dB,后者实现了较低的偏振相关损耗。李丹等<sup>[13]</sup>提出一种新型高双折射 PCF,并设计出耦合长度为 2741.93  $\mu\text{m}$ 、分离比达 27 dB 的偏振分束器,李荣敏等<sup>[14]</sup>设计出光纤长度为 544  $\mu\text{m}$ 、分离比低于 -10 dB、带宽为 80 nm 的偏振分束器。文献<sup>[15]</sup>对三角形结构的双芯光子晶体光纤的耦合长度进行

了简要分析。

上述文献中所设计的耦合器件没能实现短耦合长度和高分离比的特性。本文对矩形晶格结构双芯光子晶体光纤耦合长度及模场特性作了综合分析,并探究结构参量及波长对光纤耦合特性的影响。利用圆形气孔和椭圆气孔混合搭配,采用矩形晶格结构设计了一种耦合长度极短、分离比较高的偏振分束器,对光子晶体光纤器件的设计和制作具有积极的意义。

## 2 模型、理论及耦合长度分析

光纤结构剖面图如图 1(a)所示。包层为矩形晶格结构,其中圆环为空气孔,直径为  $d$ ,横向间距用  $W$  表示,竖直方向孔间距为  $\Lambda$ 。对于每个单独的纤芯来说,其模场被纤芯周围的空气孔束缚,当光从该光纤的某个纤芯入射并沿着纤芯轴向传输时,光功率将在两纤芯之间进行耦合。图 1(b)为双芯光子晶体光纤相互耦合时的模场分布图。

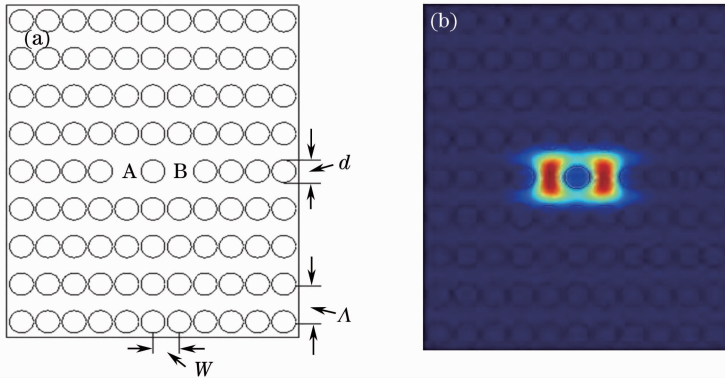


图 1 (a) 双芯 PCF 剖面图; (b) 光场在双芯 PCF 中耦合的模场分布图

Fig. 1 (a) Cross section of dual-core PCF; (b) transverse field profile of light field coupling in dual-core PCF

在上述结构双芯光子晶体光纤中有两个本征模:一个是场分布为  $E_s(x, y)$  的对称模(偶模),其传播常数为  $\beta_s = \beta + \Delta\beta$ ;另一个是场分布为  $E_a(x, y)$  的反对称模(奇模),其传播常数为  $\beta_a = \beta - \Delta\beta$ 。当传播距离为  $Z$  时,它们的相位差为  $\Delta\varphi = (\beta_s - \beta_a) Z = 2\Delta\beta Z$ 。当  $Z = 0$ ,即  $\Delta\varphi = 0$  时,对称模与反对称模在芯 A 中相干加强,在芯 B 中相干抵消,故能量全部集中在 A 芯中。当  $Z = L = \frac{\pi}{2k}$ ,即  $\Delta\varphi = \pi$  时,则光能量全部集中在芯 B 中, $L$  是光功率交换的空间周期,即耦合长度。因此,双芯光子晶体光纤中,总的模场可以看做是分别对应 X 偏振和 Y 偏振的对称模(偶模)与非对称模(奇模)的叠加<sup>[3]</sup>,于是双芯光子晶体光纤在两个方向上的耦合长度分别为

$$L_x = \frac{\pi}{\beta_{xs} - \beta_{xa}} = \frac{\lambda}{2(n_{xs} - n_{xa})}, \quad (1)$$

$$L_y = \frac{\pi}{\beta_{ys} - \beta_{ya}} = \frac{\lambda}{2(n_{ys} - n_{ya})}, \quad (2)$$

(1)、(2)式表明耦合长度与对应偏振方向的偶模和奇模的有效折射率差有关。

图 2 为由(1)和(2)式根据折射率差计算所得到的耦合长度与波长的关系。从图中可以看出光纤耦合长度随波长的增加而缩短,因为当光纤结构参数确定时,随着波长的增大模场不断扩展,双芯光场之间的耦合变得较容易,因而耦合长度逐渐变短。在长波长范围内可实现与偏振无关的耦合,其相对耦合长度<sup>[16]</sup>可表示为

$$\alpha = \frac{L_x - L_y}{L_y}. \quad (3)$$

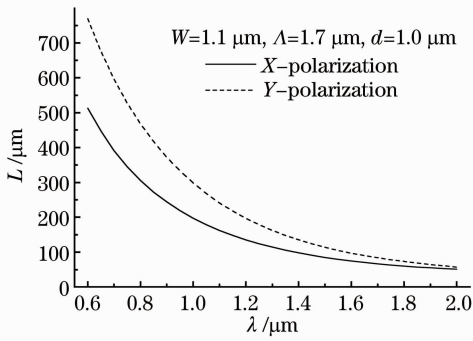


图 2 耦合长度随波长的变化

Fig. 2 Dependence of coupling length with wavelength

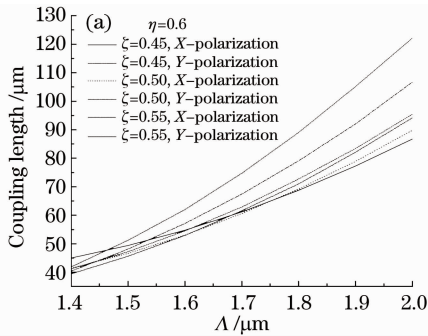
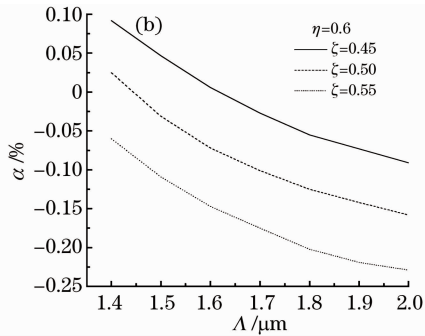

 图 3 (a)  $\eta=0.6$  时双芯 PCF 的耦合特性耦合长度; (b) 相对耦合长度  $\alpha$  百分数

 Fig. 3 (a) Coupling length characteristic of dual-core PCF  $\eta=0.6$ ; (b) relative coupling length  $\alpha$ 

图 3(b) 给出了相对耦合长度  $\alpha$  与  $\zeta$  和  $\Lambda$  之间的变化关系, 它清晰地表明: 当  $\zeta$  取定值时, 相对耦合长度  $\alpha$  随着  $\Lambda$  的增大而逐渐由正变化到负值, 例如在  $\zeta$  取 0.5,  $\Lambda$  取 1.445  $\mu\text{m}$  时,  $\alpha = 0$ 。另一方面,  $\Lambda$  取定值时相对耦合长度曲线随着  $\zeta$  的增加逐渐向下移动, 即随着  $\zeta$  的增大, Y 偏振方向与 X 偏振方向的耦合长度之差也在单调增大。

在  $\zeta = 0.5, \Lambda > 1.5 \mu\text{m}$  时, 相对耦合长度  $\alpha$  的绝对值随着  $\Lambda$  的增加而逐渐增大, 这也说明两个偏振方向的耦合长度差随着  $\Lambda$  的增加而逐渐变大, 即 Y 偏振方向与 X 偏振方向的耦合长度差逐渐增大; 另外, 当  $\Lambda$  取定值时, 随着  $\zeta$  的增大, 相对耦合长度  $\alpha$

在图 1 所示的光纤截面模型中, 空气孔直径  $d$  与竖直气孔间距  $\Lambda$  的比值记为  $\zeta$ ; 水平气孔间距  $W$  与竖直气孔间距  $\Lambda$  的比值记为  $\eta$ , 以  $\zeta$  和  $\eta$  作为主要的结构参数来研究双芯光子晶体光纤在  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  附近的耦合特性。图 3 表示用图 1(a) 所示结构在  $\eta = 0.6$  时计算得到的耦合长度随孔间距的变化关系。从图 3(a) 可以看出, 当  $\Lambda < 1.5 \mu\text{m}$  时, X 偏振模的耦合长度略大于 Y 偏振模的耦合长度, 随着  $\Lambda$  逐渐增大, X 偏振模的耦合长度先是等于然后是小 Y 偏振模的耦合长度。 $\Lambda$  在某一固定值处, 随着  $\zeta$  的增大, 耦合长度逐渐变大。



的绝对值逐渐增大, 进而较大的  $\zeta$  利于分离两方向的偏振光。

图 4(a) 给出了当  $\zeta = 0.5$  时,  $\eta$  值分别为 0.6、0.7 与 0.8 时双芯光纤耦合长度随竖直方向孔间距  $\Lambda$  的变化规律曲线。图中曲线表明, 随着孔间距  $\Lambda$  增大时, 三条曲线都具有单调递增的趋势, 而且  $\Lambda$  值越大时, 曲线的斜率也越大。另外对于同一  $\Lambda$  值, 耦合长度随着  $\eta$  的增加也单调递增。这是因为对于单个纤芯来说, 包层的占空比变小, 同时纤芯的面积增大, 从而导致模式的有效折射率变大, 光纤的模场更加集中于芯区, 因而耦合变得困难致使耦合长度变大。

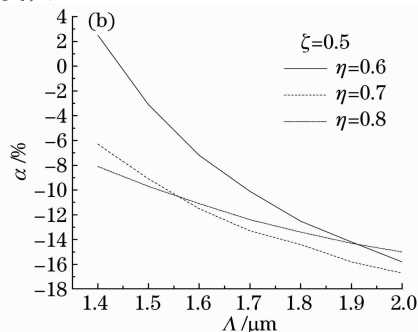
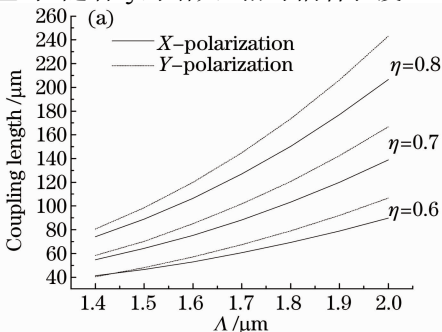

 图 4 (a)  $\zeta=d/\Lambda=0.5$  时双芯 PCF 的耦合特性耦合长度; (b) 相对耦合长度  $\alpha$  百分数

 Fig. 4 (a) Coupling length characteristic of dual-core PCF ( $\zeta=d/\Lambda=0.5$ ); (b) relative coupling length  $\alpha$

图 4(b)显示了  $\eta$  值分别为 0.6、0.7 与 0.8 时双芯光纤相对耦合长度  $\alpha$  随垂直方向孔间距  $\Lambda$  的变化规律曲线。图中曲线表明:当  $\eta$  较小时,相对耦合长度  $\alpha$  的绝对值也相应较小。在  $\eta=0.6$ , 垂直间距  $\Lambda=1.445 \mu\text{m}$  时,相对耦合长度  $\alpha$  值为零,此结构的光纤即可实现与偏振无关的耦合。

### 3 偏振分束器设计

依据两方向的偏振光在双芯光纤中具有不同的耦合长度,适当调节光纤结构,使两偏振方向的耦合

长度比满足  $L = mL_x = nL_y$ , 其中  $m$  和  $n$  是整数,且  $m$  和  $n$  的奇偶性相反,就可以做成偏振分束器<sup>[3]</sup>。 $L_y/L_x = 2$  是设计偏振分束器的最佳比值。

基于图 5(a)所示结构,利用上述原理设计了一种偏振分束器,图 5(b)为其模场分布图。其中横向间距  $W$  和垂直方向的间距  $\Lambda$  分别取  $1.1 \mu\text{m}$  和  $1.7 \mu\text{m}$ ,四角和中心的椭圆气孔的纵横比分别为  $2.0 \mu\text{m}/0.8 \mu\text{m}$  和  $1.0 \mu\text{m}/1.4 \mu\text{m}$ ,其余气孔均为  $1.0 \mu\text{m}$ ,石英的折射率(忽略材料色散)取 1.45。

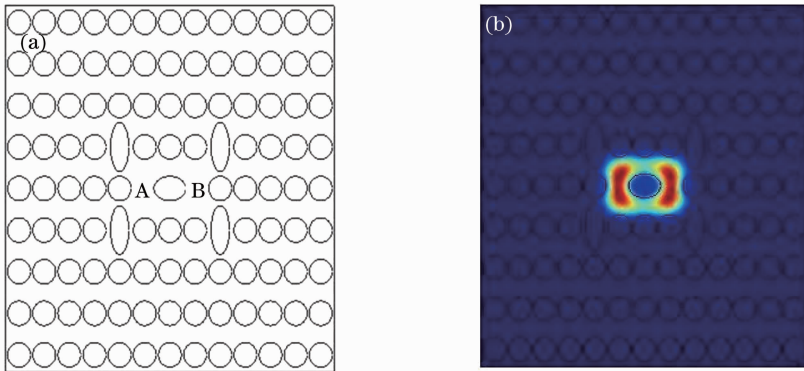


图 5 (a)光纤剖面图;(b)截面模场图

Fig. 5 (a) Cross section of optical fiber; (b) transverse mode-field

由于椭圆气孔的引入既破坏了光纤的对称性又将光场限制得比较严密,因此更有利于光功率的耦合,同时也增加了双芯之间的距离,致使双折射效应更加强烈,因而既使得两偏振方向的光更加易于分离,又可以使光纤的耦合长度极短。经过半矢量光束传播方法(BPM)进行数值模拟并计算得出,在波长为  $1.55 \mu\text{m}$  处,以 X 和 Y 偏振方向的从左芯(图中 A 芯)入射时的耦合长度分别是  $62.3 \mu\text{m}$  和  $125.4 \mu\text{m}$ 。

图 6(a)给出了忽略传输损耗的情况下纤芯中光功率在传输过程中的变化情况。从图中可以看

出,用高斯分布的线偏振光入射 A 芯,在光纤长度为  $125 \mu\text{m}$  时,X 方向偏振光几乎全部耦合到 A 芯,而此时 Y 方向偏振光则仍在 B 芯中,从而实现了偏振光的分离,其分离程度可以用分离比<sup>[17]</sup>来描述,表示为

$$R_A = 10 \lg \frac{P_Y}{P_X}, \quad (4)$$

$$R_B = 10 \lg \frac{P_X}{P_Y}. \quad (5)$$

式中  $P_X$  和  $P_Y$  分别表示 X 和 Y 偏振方向的输出功率。用(4)、(5)式计算出的分离比随波长的变化关

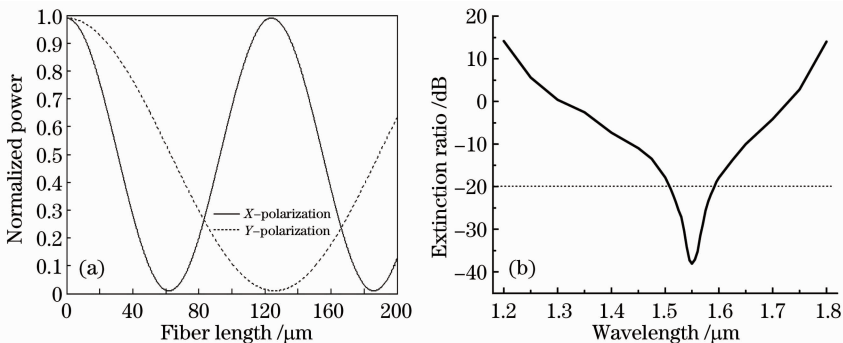


图 6 (a)归一化功率随传输距离的变化;(b) A 芯中偏振光的分离比与波长的关系

Fig. 6 (a) Dependence of normalized power with fiber length; (b) dependence of extinction ratio with wavelength in core A

系如图 6(b)所示,可以看出,在波长为  $1.55 \mu\text{m}$  时其分离比高达  $-38 \text{ dB}$ ,且光纤结构不变的情况下,在  $1.55 \mu\text{m}$  附近,分离比小于  $-20 \text{ dB}$  的带宽超过了  $80 \text{ nm}$ 。

## 4 结 论

在平行波导耦合模理论的基础上,研究了晶格结构参量对该光纤耦合特性的影响。数值计算表明,该双芯光纤的耦合长度将随着波长的增加而逐渐缩短;在  $1.55 \mu\text{m}$  波长处,增大竖直方向气孔间距或缩小横向气孔间距并减小气孔半径都有利于减小光纤的耦合长度,并可使耦合长度差也相应减小。基于这一结论设计了一种偏振分束器,其耦合长度缩小至  $125 \mu\text{m}$ ,分离比高达  $-38 \text{ dB}$ ,且分离比低于  $-20 \text{ dB}$  的波长区间超过  $80 \text{ nm}$ ,实现了耦合长度极短、分离比相对较高的特性。本工作将对新型集成光子器件的研制具有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 Kunimasa Satoh, Yuichiro Sato, Masanori Koshiba. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber couplers[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(24): 3188~3195
- 2 Wang Xude, Zhou Zheng, Luo Aiping *et al.*. Design of twin core photonic crystal fiber coupler using WDM [J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(8): 875~879  
汪徐德,周正,罗爱平等. 波分复用双芯光子晶体光纤耦合器的设计[J]. *激光与红外*, 2011, **41**(8): 875~879
- 3 Fu Bo, Li Shuguang, Yao Yanyan *et al.*. Coupling characteristics of dual-core high birefringence photonic crystal fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(11): 7708~7714  
付博,李曙光,姚艳艳等. 双芯高双折射光子晶体光纤耦合特性研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(11): 7708~7714
- 4 Wu Wanqing, Xu Feng, Chen Bo *et al.*. An asymmetric dual-core photonic crystal fibers coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3527~3530  
吴万青,徐峰,陈博等. 一种非对称双芯光子晶体光纤耦合器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3527~3530
- 5 Chen Mingyang, Zhang Yongkang, Zhu Yuanfeng *et al.*. Broadband directional coupler based on asymmetric dual-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 635~639  
陈明阳,张永康,祝远峰等. 基于非对称双芯光子晶体光纤的宽带定向耦合器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 635~639
- 6 Mingyang Chen, Yongkang Zhang, Rongjin Yu. Wavelength-selective coupling of dual-core photonic crystal fiber and its application[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(5): 390~392
- 7 Li Honglei, Lou Shuqin, Chen Weiguo *et al.*. An asymmetric dual-core single-polarization single-mode photonic crystal fiber coupler[J]. *Optoelectronics Letters*, 2010, **6**(4): 272~274  
李宏雷,娄淑琴,陈卫国等. 一种非对称双芯单模单偏光子晶体光纤耦合器[J]. *光电子学报*, 2010, **6**(4): 272~274
- 8 Ma Lingfang, Liu Min, Zhang Min *et al.*. Study on a dual-core photonic crystal fiber with varying air holes [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2011, **17**(3): 225~230  
马玲芳,刘敏,张敏等. 渐变空气孔双芯光子晶体光纤特性研究[J]. *量子光学学报*, 2011, **17**(3): 225~230
- 9 Lin Zhang, Changxi Yang. Polarization splitter based on photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(6): 1015~1020
- 10 Weiqing Wu, Xiongwen Chen, Hui Zhou *et al.*. Effective polarization splitters based on dual-core photonic crystal fibers with elliptical holes [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(S): S280~S283
- 11 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  
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研究[J]. *量子电子学报*, 2008, **25**(4): 505~508
- 12 Sun Bing, Chen Mingyang, Yu Rongjin *et al.*. Design of a fiber polarizer based on an asymmetric dual-core photonic crystal fiber [J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, **7**(4): 253~255  
孙兵,陈明阳,于荣金等. 一种基于非对称双芯光子晶体光纤偏振器的设计[J]. *光电子学报*, 2011, **7**(4): 053~255
- 13 Li Dan, Liu Min, Jian Duo *et al.*. Characteristics of highly birefringent dual-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0405005  
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
- 14 Li Rongmin, Cao Ye, Tong Zhengrong. Short length polarization spllter based on dual elliptical-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(10): 1005004  
李荣敏,曹晔,童峥嵘. 短长度的椭圆双芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(10): 1005004
- 15 Yu Rongjin, Xiang Yang, Chen Mingyang *et al.*. Research on coupling lengths of twin-core photonic crystal fiber[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, **15**(7): 755~777  
于荣金,向阳,陈明阳等. 双芯光子晶体光纤耦合长度研究[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(7): 755~777
- 16 Chen Mingyang. Numerical Simulation of New Configurations in Photonic Crystal Fiber[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2004. 62~75  
陈明阳. 新型光子晶体晶体光纤数值模拟[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2004. 62~75
- 17 K. Saitoh, Y. Sato, M. Koshiba. Polarization splitter in three-core photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(17): 3940~3946