

文章编号: 0253-2239(2010)06-1581-05

# 非对称双芯光子晶体光纤宽带模式转换器研究

孙 兵<sup>1</sup> 陈明阳<sup>1</sup> 周 骏<sup>2</sup> 余学权<sup>1</sup> 张永康<sup>1</sup> 于荣金<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; <sup>2</sup> 宁波大学理学院, 浙江 宁波 315211)  
<sup>3</sup> 燕山大学信息学院, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 提出了一种基于非对称双芯光子晶体光纤的新型宽带模式转换器。对光纤参数与模式有效折射率之间的分析,通过调整纤芯内层空气孔的直径及掺杂介质棒的折射率,使两个纤芯中需要转换的模式之间实现了宽带的相位匹配。数值模拟结果表明,一种长仅为 5.9 mm 的双芯光纤,在保证传输损耗小于 0.5 dB 的前提下,其工作带宽达 160 nm 且偏振相关损耗小于 0.28 dB。

**关键词** 光纤光学;双芯光子晶体光纤;模式转换器;偏振相关损耗

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103006.1581

## Design of a Broadband Mode Converter Based on an Asymmetric Dual-Core Photonic Crystal Fiber

Sun Bing<sup>1</sup> Chen Mingyang<sup>1</sup> Zhou Jun<sup>2</sup> Yu Xuequan<sup>1</sup> Zhang Yongkang<sup>1</sup> Yu Rongjin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Jiangsu University,  
Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

<sup>2</sup> Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

<sup>3</sup> School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

**Abstract** A design for a novel broadband mode converter based on an asymmetric dual-core photonic crystal fiber is proposed. With adjusting the air-hole diameters of the inner rings in the cores and the index of the down-doped silica rods, broadband index-matched coupling is achieved. Numerical investigations demonstrate that a novel mode converter with operating wavelengths ranged from 1.45  $\mu\text{m}$  to 1.61  $\mu\text{m}$  at the loss of 0.5 dB and polarization-dependent loss which is lower than 0.28 dB can be realized in a fiber with a length of 5.9 mm

**Key words** fiber optics; dual-core photonic crystal fiber; mode converter; polarization-dependent loss

## 1 引 言

由于单模光纤避免了多模光纤模式间的色散问题,因此目前在通信、传感等领域应用最广的是单模光纤。近几年来,人们提出了多种新型的光纤结构,如采用光子带隙原理的 Bragg 光纤<sup>[1]</sup>,其传输损耗最低的模式并非普通光纤中的 LP<sub>01</sub> 模,而是 TE<sub>01</sub> 模<sup>[2]</sup>。此外,人们还提出采用高阶模传输实现色散

补偿技术<sup>[3]</sup>以及将基模转换成高阶模,从而实现大模场、低损耗光传输<sup>[4]</sup>。

当以上几种器件与其他常规光纤连接时,就需借助于模式转换器来实现 LP<sub>01</sub> 模与其他模式之间的转换,且要求转换后只存在所需要的模式。光纤模式转换器是一种实现光纤中不同模式场之间转换的器件。目前已经有几种适用于光纤之间进行模场

收稿日期: 2009-05-11; 收到修改稿日期: 2009-09-06

基金项目: 中国博士后科学基金(20080441070)、江苏省博士后科研资助计划项目(0802018B)和浙江省“钱江人才计划”项目(2007R10015)资助课题。

作者简介: 孙 兵(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤技术和光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: graduate\_sunbing@163.com

导师简介: 陈明阳(1976—),男,博士,副教授,主要从事光波导、光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: miniyong@163.com(通信联系人)

转换的器件,其中最常见的是基于光纤光栅的模式转换器<sup>[3]</sup>。但采用光纤光栅时,基模及转换得到的高阶模都是在同一根光纤中传输,因此,如果光纤光栅不能实现将基模全部转换为高阶模,则在光纤中将有剩余的基模能量在光纤中传输。这些剩余能量将对传输的光信号产生干扰,从而影响器件的性能。此外,这种机制虽然转换效率较高,但其工作带宽很窄(约为几个纳米)。最近,有人提出了基于光子晶体光纤熔融技术拉制而做成的全光纤模式转换器,这种器件能在很宽的带宽范围内实现高消光比的模式转换<sup>[5]</sup>。但这种器件在制作工艺方面要求很高,且难以实现批量生产。近期,提出一种基于不对称双芯光子晶体光纤(PCF)的模式转换器<sup>[6]</sup>。这种模式转换器是通过使一个纤芯的基模(LP<sub>01</sub>)和另一个纤芯的高阶模(LP<sub>02</sub>)的有效折射率相等的方法,实现基模与高阶模之间的高效耦合,即利用耦合实现模式的转换。这种模式转换器的偏振相关损耗(PDL)小且可实现批量生产,但由于两个模式之间的有效折射率只能在很窄的一段频率范围内匹配,因此其工作带宽较窄,为 14 nm。

文献[8]提出的模式转换器不能实现宽带工作的原因在于,该结构中两个模式的有效折射率曲线只能在一个频率点上相交。在其它频率点处,由于两个模式的有效折射率不相等,即两者相位不匹配,根据耦合理论可知,只能实现部分的耦合<sup>[7,8]</sup>。这就导致了带宽变窄。基于上述分析,本文提出采用特殊的结构设计使两个模式的有效折射率在很宽波长的范围内都相差很小,从而实现宽带的相位匹配,最终实现宽带的模式转换。

## 2 光纤结构及数值分析

图 1 给出了新型双芯光子晶体光纤的横截面示意图。图 1 中灰色区域表示纯石英,白色区域表示空气孔,深色区域表示掺杂的石英材料。空气孔的周期为  $\Lambda$ ,除围绕两个纤芯的内层空气孔外,其它空气孔的直径均为  $d$ ,其值取为  $0.5\Lambda$ 。纤芯外层空气孔的主要作用是对纤芯中的模式起束缚作用。该结构由两个非对称的纤芯构成,即左侧的小纤芯和右侧的大纤芯。小纤芯是由缺失一个空气孔构成,其内包层空气孔有两种,直径分别为  $d_1$  和  $d_2$ ,其中  $d_1$  总是大于  $d_2$ 。由模式理论可知,这种纤芯具有三阶对称性,其两个线性偏振基模是简并的,不存在双折射现象<sup>[9]</sup>。大纤芯是由七个折射率低于纯石英的介质棒所组成,其与背景材料(纯石英)的折射率差为

$\Delta_1$ ,直径为  $d_3$ ,围绕大纤芯的内层空气孔直径为  $d_2$ 。采用这种结构,可以通过  $d_2$  和  $d_3$  来调整大纤芯中高阶模的有效折射率曲线,而通过  $d_1$  来调整小纤芯中基模的有效折射率曲线,并且这几个参数的调整不会使小纤芯产生双折射,从而避免模式耦合时出现强的偏振相关性。同时,由于  $d_1$  远大于  $d_2$ ,这就使得调整大纤芯中高阶模有效折射率对小纤芯的基模有效折射率的影响较小,从而达到了相对独立地调节两个模式的有效折射率曲线的目的。

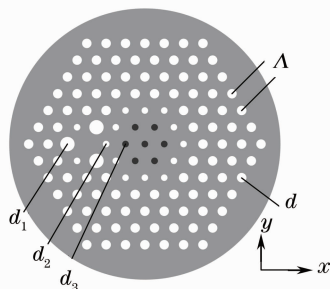


图 1 新型双芯光子晶体光纤横截面示意图

Fig. 1 Cross section of the proposed dual-core photonic crystal fiber (PCF)

计算只存在小纤芯或只存在大纤芯时光纤的模式有效折射率曲线。且只考虑小纤芯中的基模(LP<sub>01</sub>模)和大纤芯中的高阶模(LP<sub>02</sub>模)之间的转换。采用虚轴光束传播法<sup>[10]</sup>分别对两光纤的模式有效折射率进行计算,采用透明边界条件。计算区域为  $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ ,矩形网格尺寸取为  $\Delta x = \Delta y = 0.09\ \mu\text{m}$ ,传输方向步长  $\Delta z = 0.5\ \mu\text{m}$ ,空气孔的层数如图 2 所示。

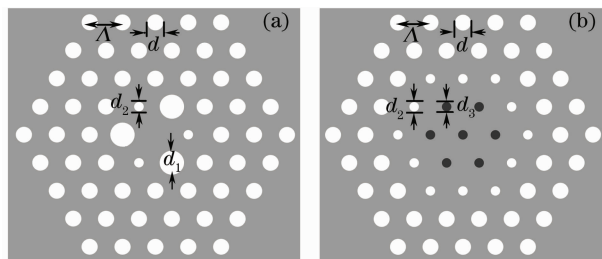


图 2 (a)小纤芯和(b)大纤芯的结构示意图

Fig. 2 Cross-sections of the (a) small core PCF and (b) large core PCF

分析一种简单的非对称双芯结构(此时所有空气孔的归一化直径取为  $d/\Lambda = 0.5$ ,大纤芯不做掺杂),发现两种模式的有效折射率相差较大且有效折射率斜率不同,如图 3 所示。

其次分析内层空气孔及介质棒对模式有效折射率的影响。从图 4(a)可以看出,当  $d_1/\Lambda$  增大时,LP<sub>01</sub>模的有效折射率减小,但曲线的斜率增大。由

图 4(b)可以看出,随着  $d_2/\Lambda$  的减小,  $LP_{02}$  模的有效折射率曲线上移,但斜率减小。

此外,大纤芯中介质棒与石英的折射率差  $\Delta_1$  对  $LP_{02}$  模的有效折射率曲线的斜率影响很小,它的变化主要导致曲线发生平移,如图 4(c)所示。

由图 3 可见看出,可以通过改变介质棒的折射率来增加或减小  $LP_{02}$  模的有效折射率,再通过调整  $d_1$  和  $d_2$  两种空气孔的直径来使两条曲线斜率相近。经过几次反复的优化调整,即可实现两条曲线的匹配。采用这种方法,得到一组优化的结构参数: $d_1/\Lambda=0.75, d_2/\Lambda=d_3/\Lambda=0.3, \Delta_1=-0.003$ 。此时,  $LP_{01}$  和  $LP_{02}$  模的有效折射率曲线如图 5 所示。从图中可以看出,两者可在很宽的频率范围内实现匹配,事实上,在所示的频率范围内,两模式的有效

折射率差均小于  $1.5 \times 10^{-5}$ 。

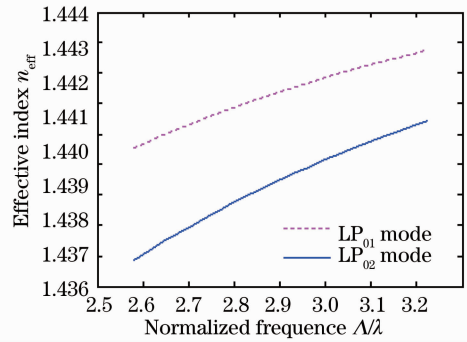


图 3 小纤芯的  $LP_{01}$  模和大纤芯的  $LP_{02}$  模的有效折射率曲线

Fig. 3 Effective index curves of  $LP_{01}$  mode of the small core PCF and  $LP_{02}$  mode of the large core PCF

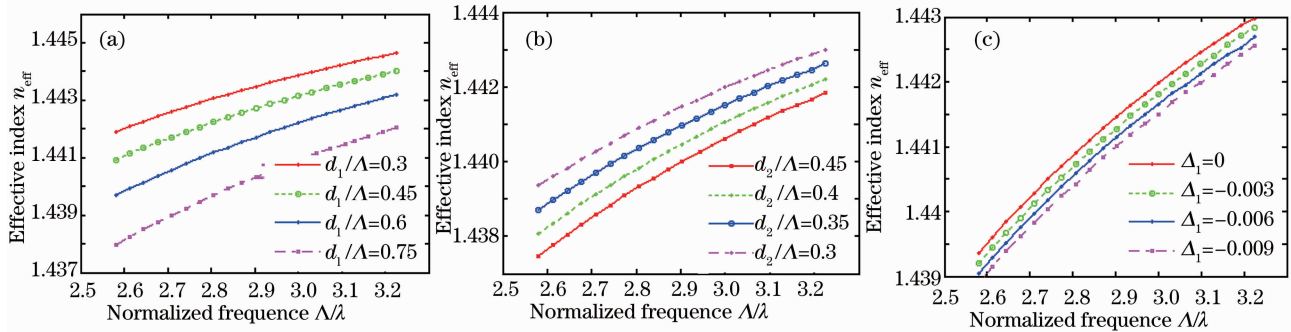


图 4 不同结构参数条件下的  $LP_{01}$  和  $LP_{02}$  模的有效折射率曲线。(a)  $d_2/\Lambda=0.5$  时,  $LP_{01}$  模; (b)  $LP_{02}$  模; (c) 大纤芯 PCF 的  $LP_{02}$  模

Fig. 4 Effective index curves of the  $LP_{01}$  and  $LP_{02}$  modes of the proposed PCF with various structural parameters.

(a)  $LP_{01}$  mode with  $d_2/\Lambda=0.5$ ; (b)  $LP_{02}$  mode; (c)  $LP_{02}$  mode of the large core PCF

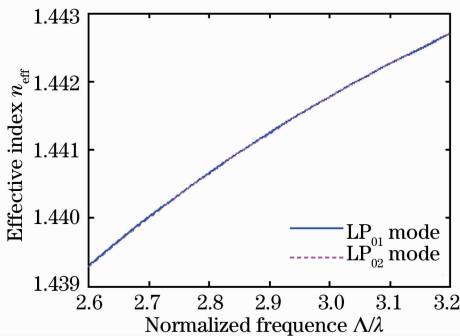


图 5 参数优化后,  $LP_{01}$  和  $LP_{02}$  模的有效折射率曲线

Fig. 5 Effective index curves of the  $LP_{01}$  and  $LP_{02}$  modes of the parameter-optimized PCF

采用半矢量光束传播法<sup>[11]</sup>对优化后的结构进行分析。计算区域大小为  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ , 矩形网格尺寸取为  $\Delta x = \Delta y = 0.09 \mu\text{m}$ , 传输方向步长  $\Delta z = 6 \mu\text{m}$ 。取孔周期为  $\Lambda = 4.5 \mu\text{m}$ , 光波长为  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。由光束传播法可以得到两个模式在  $x$  偏振和  $y$  偏振下的耦合长度分别为 5.5 mm 和 6.3 mm。

根据超模理论<sup>[12]</sup>, 双芯光纤存在两种模式: 奇模和偶模。光纤的耦合长度可由这两种模式的有效折射率推导得到, 即耦合长度  $L_c = \lambda / (2 |n_{ei} - n_{oi}|)$ ,  $i = x, y, \lambda$  是真空中光波长,  $n_{ei}, n_{oi}$  分别表示  $i$  方向偏振的偶模和奇模。优化后的结构的模式有效折射率分别为  $n_{ex} = 1.441363, n_{ox} = 1.44122, n_{ey} = 1.441232, n_{oy} = 1.441355$ 。由此可以得到  $x, y$  两偏振方向的耦合长度分别为 5.4 mm 和 6.3 mm。此结果与采用光束传播法直接得到的结果相符。

图 6 给出当光纤长度取为  $L = 5.9 \text{ mm}$  (两模式在  $x$  和  $y$  偏振态下耦合长度的平均值) 时的模式转换过程。  $LP_{01}$  模从小纤芯输入 [图 6(a)], 并逐渐向大纤芯转移 [图 6(b), (c) 所示], 并最终完全转移到大纤芯, 成为  $LP_{02}$  模 [图 6(d)]。

若将光纤的长度取为  $L = 5.9 \text{ mm}$ , 其频谱特性如图 7 所示。

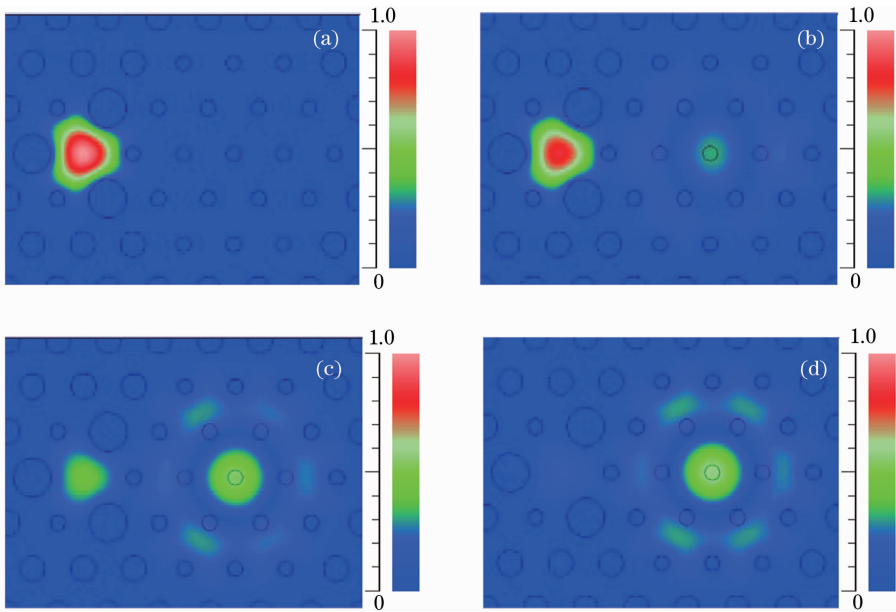


图 6 (a)  $z=0$ , (b)  $z=L/3$ , (c)  $z=2L/3$ , (d)  $z=L$  时的电场分布

Fig. 6 Electric field distributions at (a)  $z=0$ , (b)  $z=L/3$ , (c)  $z=2L/3$ , and (d)  $z=L$

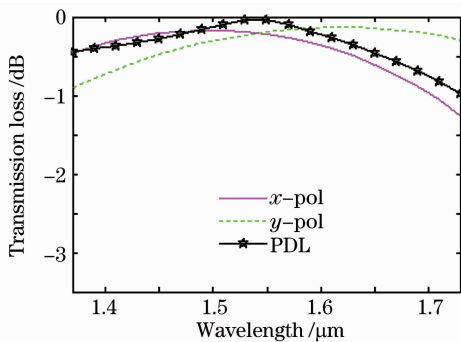


图 7 光纤长度为  $L=5.9$  mm 时的传输频谱

Fig. 7 Spectral coupling characteristics and polarization-dependent loss of the proposed mode converter with fiber length  $L=5.9$  mm

传输损耗  $P_L$  定义为输出端能量  $p_{outi}$  与输入端能量  $p_{ini}$  之比, 即  $P_L = \lg(p_{outi}/p_{ini})$ ,  $i=x, y$ 。由图 7 可见, 在两偏振态的传输损耗均小于 0.5 dB 的前提下, 其工作波长范围为 1.45~1.61  $\mu\text{m}$ , 即其工作带宽可达 160 nm 且偏振相关损耗小于 0.28 dB。在中心波长 ( $\lambda=1.55$   $\mu\text{m}$ ) 位置, 其偏振相关损耗小于 0.04 dB 且传输损耗小于 0.27 dB, 即有 95% 以上能量实现转换, 且在工作波长 1.45~1.61  $\mu\text{m}$  范围内模式的转换效率大于 90%。此外, 还考虑了光纤取不同长度时的传输性能, 如图 8 所示。从图 8(a) 可以看到, 当  $L=5.5$  mm 时, 在两偏振态的传输损耗均小于 0.5 dB 的前提下, 其工作波长范围为 1.49~1.67  $\mu\text{m}$  且相关偏振损耗小于 0.37 dB。如图 8(b) 所示, 当光

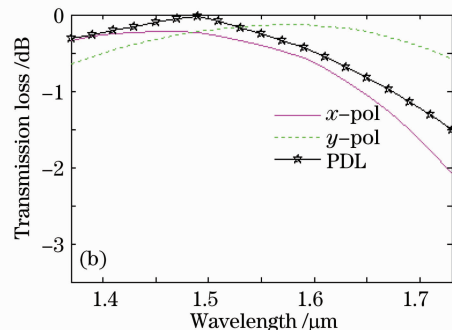
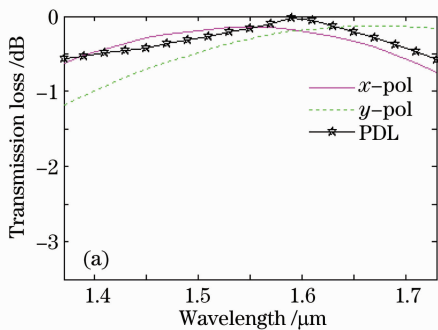


图 8 光纤长度分别取为 (a)  $L=5.5$  mm 和 (b)  $L=6.3$  mm 时的传输频谱

Fig. 8 Spectral coupling characteristics and PDL of the proposed mode converter with fiber length

(a)  $L=5.5$  mm, (b)  $L=6.3$  mm, respectively

纤长度为  $L=6.3\text{ mm}$  时,在两偏振态的传输损耗均小于  $0.5\text{ dB}$  的前提下,其工作波长范围为  $1.41\sim 1.58\ \mu\text{m}$  且相关偏振损耗小于  $0.44\text{ dB}$ 。可见,光纤长度取为两偏振态耦合长度的平均值时结果较好;当光纤长度偏离平均值时,会导致工作波长向长波长(光纤长度变短时)或向短波长(光纤长度变长时)方向移动且偏振相关损耗也会增大。由以上分析可见,光纤长度产生  $\pm 0.4\text{ mm}$  的偏差时,其工作波长范围仍然包含中心波长  $1.55\ \mu\text{m}$ ,因此,这种结构具有较大的制作容差。

### 3 结 论

提出了一种基于非对称双芯光子晶体光纤结构的新型模式转换器。通过对纤芯及其内层空气孔的调整,可以实现宽带、低损耗的模式转换。仅考虑了  $\text{LP}_{01}$  模与  $\text{LP}_{02}$  模之间的转换,但这种设计方法和基本思想同样适用于基模与其他高阶模之间的转换。根据光学互易性原理,上述结构也可以将在大纤芯中传输的高阶模转换成小纤芯中的基模。

另外,这种模式转换器与普通光纤的连接可以这样来实现:输入端小纤芯通过锥形过渡实现与普通单模光纤的连接,从而将光从单模光纤引入<sup>[13]</sup>。由于高阶模是从大纤芯输出,且大纤芯处于光纤的中心位置,因此,输出端只需与单模光纤直接连接就可以实现将高阶模输出的目的<sup>[14]</sup>。采用这种方法可以有效地实现双芯光子晶体光纤与普通光纤的连接,并具有较低的连接损耗。

### 参 考 文 献

- 1 Liang Weijun, Wang Zhi, Ren Guobin *et al.*. Study on dispersion properties of Bragg fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1343~1346
- 梁伟军,王 智,任国斌等. 布拉格光纤色散特性的研究[J].

- 中国激光, 2004, **31**(11): 1343~1346
- 2 S. Johnson, M. Ibanescu, M. Skorobogatiy *et al.*. Low-loss asymptotically single-mode propagation in large-core OmniGuide fibers [J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 748~779
- 3 S. Ramachandran. Dispersion-tailored few-mode fibers: a versatile platform for in-fiber photonic devices [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(11): 3426~3443
- 4 S. Ramachandran, J. W. Nicholson, S. Ghalmi *et al.*. Light propagation with ultralarge modal areas in optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(12): 1797~1799
- 5 K. Lai, S. G. Leon-Saval, A. Witkowska *et al.*. Wavelength-independent all-fiber mode converters [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(4): 328~330
- 6 M. -Y. Chen, J. Zhou. Mode converter based on mode coupling in an asymmetric dual-core photonic crystal fiber [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, **10**(11): 115304-1
- 7 W. P. Huang. Coupled mode theory for optical waveguides: an overview [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(3): 963~983
- 8 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定向耦合器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 635~639
- 9 M. J. Steel, T. P. White, C. M. de Sterke *et al.*. Symmetry and degeneracy in microstructured optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(8): 488~490
- 10 Y. Z. He, F. G. Shi. Finite-difference imaginary-distance beam propagation method for modeling of the fundamental mode of photonic crystal fibers [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **225**(1-3): 151~156
- 11 W. P. Huang, C. L. Xu. Simulation of three-dimensional optical waveguides by a full-vector beam propagation method [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, **29**(10): 2639~2649
- 12 J. P. Donnelly, H. A. Haus, N. Whitaker. Symmetric three-guide optical coupler with nonidentical center and outside guides [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **QE-23**(4): 401~406
- 13 S. G. Leon-Saval, T. A. Birks, N. Y. George *et al.*. Splice-free interfacing of photonic crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(13): 1629~1631
- 14 Guo Tieying, Lou Shuqin, Li Honglei *et al.*. Low loss arc fusion splice of photonic crystal fibers [J]. *Acta Optical Sinica*, 2009, **29**(2): 511~516
- 郭铁英, 娄淑琴, 李宏雷等. 光子晶体光纤的低损耗电弧熔接方案[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 511~516