

# 用于宽带偏振无关耦合器的双芯光子晶体光纤

王立文<sup>1,2</sup> 娄淑琴<sup>1,2</sup> 陈卫国<sup>1,2</sup> 鹿文亮<sup>1,2</sup> 王鑫<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)  
<sup>2</sup> 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘要** 提出一种可用于宽带偏振无关光定向耦合器的新型双芯光子晶体光纤(PCF),利用全矢量有限元方法分析了光纤结构参数对其光学特性的影响,得到了一组优化的双芯 PCF 结构参数,满足易于制作、易于接续和接续损耗低等应用要求,在此基础上对光纤结构进行了改进,进一步降低了制作难度,基于该光纤可以设计出在 1.26~1.625  $\mu\text{m}$  范围内分光比误差小于 1%、两偏振态分光比误差小于 0.2% 的 50:50 耦合器,并在现有实验条件下,试制了近似结构的双芯 PCF。

**关键词** 光纤光学;双芯光子晶体光纤耦合器;有限元方法;宽带;偏振无关

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0605008

## Dual-Core Photonic Crystal Fiber for Broadband and Polarization-Insensitive Coupler

Wang Liwen<sup>1,2</sup> Lou Shuqin<sup>1,2</sup> Chen Weiguo<sup>1,2</sup> Lu Wenliang<sup>1,2</sup> Wang Xin<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)  
<sup>2</sup> Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** A novel dual-core photonic crystal fiber (PCF) for broadband polarization-insensitive coupler with elliptical central hole is proposed. The impacts of its structural parameters on coupling characteristics are investigated in detail using full-vector finite element method. Optimizing fiber structure parameters, dual-core PCF is obtained and meets the application requirements of easy to fabricate, free to splice and low splice loss. Then an improved dual-core PCF is proposed for reducing the difficulty of fabrication. The coupler based on this fiber is obtained with the coupling ratio stabilized at  $(50 \pm 1)\%$  and the coupling ratio difference between  $x$  polarization and  $y$  polarization less than 0.2% in wavelength range of 1.26~1.625  $\mu\text{m}$ .

**Key words** fiber optics; dual-core photonic crystal fiber coupler; finite element method; broadband; polarization-insensitive

**OCIS codes** 060.2280; 060.5295; 060.1810

## 1 引 言

光子晶体光纤(PCF)在结构设计方面具有很大的灵活性,在实现超大模场面积、高非线性、高双折射和双芯 PCF 等新颖特性方面很有优势<sup>[1~7]</sup>。基于 PCF 的双芯光纤可以通过灵活设计其芯区和包层结构,实现传统双芯光纤难以实现的偏振、工作带

宽及模场面积等特性的控制<sup>[8~12]</sup>。

虽然光纤定向耦合器作为实用化的产品,其技术已经十分成熟,成本也很低廉,但是现有的光纤定向耦合器都针对特定的波长,工作带宽比较窄。而随着社会信息化的发展,作为宽带光通信网络、多波长可调谐光纤激光器关键器件之一,光定向耦合器

收稿日期: 2012-01-01; 收到修改稿日期: 2012-02-14

基金项目: 国家 973 计划(2010CB328206)、国家自然科学基金(60977033,61177082)和中央高校基本科研业务专项资金(2012YJS011)资助课题。

作者简介: 王立文(1984—),男,博士研究生,主要从事新型光子晶体光纤设计、制作及其应用等方面的研究。

E-mail: wlwdhr@gmail.com

导师简介: 娄淑琴(1965—),女,博士,教授,主要从事特种光纤方面的研究。E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn(通信联系人)

对带宽的要求越来越高,现有的光纤定向耦合器产品已经难以满足未来光通信的需求。因此可用于宽带偏振无关光定向耦合器的新型光纤开始被广泛研究。目前这方面的研究成果依然存在一些问题,如仅通过掺氟实现了宽带特性而偏振无关特性较差<sup>[8]</sup>,包层空气孔全部采用椭圆孔增大了制作难度<sup>[9]</sup>,两纤芯模场相距近使耦合器制作难度增大<sup>[11]</sup>,孔距过大导致模场面积与单模光纤不匹配增大了接续损耗等。

本文综合考虑光纤及耦合器的制作可行性和应用需求,提出了一种新型的双芯 PCF 结构,在获得宽带偏振无关特性的同时,有效地减小了与普通光纤的接续损耗,降低了基于该光纤的耦合器的制作难度,并在此基础上进行了改进,基于该光纤可以设计出在 1.26~1.625 μm 范围内分光比误差小于 1%、两偏振态分光比误差小于 0.2% 的 50:50 耦合器,另外还在现有实验条件下试制了一种类似结构的 PCF,研究了这种光纤结构的可行性。

## 2 光纤结构的提出与参数优化

提出的双芯 PCF 横截面结构如图 1 所示,光纤由在纯石英背景材料上周期性排列的空气孔包层、两个掺氟低折射率芯区和一个椭圆形空气孔中心调制区组成。其主要的结构参数有空气孔间距  $\Lambda$ ,空气孔直径与空气孔间距比  $f$ ,掺氟低折区直径与空气孔间距比  $f_c$ ,掺氟区折射率与石英折射率差  $\Delta_c$ ,中心调制区椭圆空气孔的长轴( $x$ 轴)和短轴( $y$ 轴)与空气孔间距比  $f_x$ 、 $f_y$  等;另外根据文献<sup>[11]</sup>中实现超宽带的设计机理,发现低折区周围模场的不对称性有利于带宽的扩展,提出了低折射率芯区偏移的方案,两低折射率芯区可以同时向靠近中心调制区

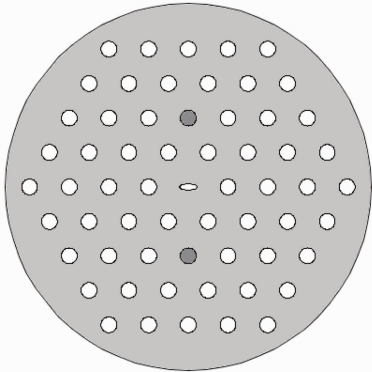


图 1 中心调制区为椭圆孔的双芯 PCF  
Fig. 1 Cross section of dual-core PCF with elliptical central hole

或者远离中心调制区偏移,偏移量也是需要研究的光纤结构主要参数之一。

为了减小与单模光纤的接续损耗、抑制双芯 PCF 中的高阶模式<sup>[13]</sup>、便于实现光纤耦合器的小型化<sup>[14,15]</sup>,结构参数初步选取为  $\Lambda=6 \mu\text{m}$ ,  $f=0.4$ ,  $f_c=0.45$ ,  $\Delta_c=-1\%$ ,  $f_x=0.4$ ,  $f_y=0.15$ ,低折射率区不偏移。利用二次插值拟合的全矢量有限元方法分析双芯 PCF 中的传输模式的有效折射率和模场分布等特性<sup>[16]</sup>,进而双芯 PCF 的耦合长度  $L_c$ 、基于该光纤的定向耦合器的分光比  $C^{xy}$  以及两偏振态的分光比差  $C_{\Delta}^{x-y}$  可表示为

$$L_c^{xy}(\lambda) = \frac{\lambda}{2(n_{\text{even}}^{xy} - n_{\text{odd}}^{xy})}, \quad (1)$$

$$C^{xy}(\lambda) = \sin^2 \left[ \frac{\pi}{2} \frac{L_0}{L_c^{xy}(\lambda)} \right], \quad (2)$$

$$C_{\Delta}^{x-y}(\lambda) = C^x(\lambda) - C^y(\lambda), \quad (3)$$

式中  $\lambda$  为波长,  $n_{\text{even}}$  与  $n_{\text{odd}}$  分别为双芯光纤中偶模与奇模的有效折射率,  $L_0$  为耦合器中双芯 PCF 的长度,上标  $x$  与  $y$  表示  $x$  偏振态与  $y$  偏振态。

在初始结构参数的基础上改变其中一项参数,保持其他参数不变,研究结构参数对光纤耦合器的耦合长度、带宽和偏振特性的影响规律,结果如表 1 所示。考虑 PCF 的易控制特性与实用性,为实现易于制作、降低与单模光纤接续的损耗,从容差性、工作波长和工作带宽等方面综合分析,对光纤结构参数进行进一步优化,得到一组较为优化的光纤结构参数,其中  $\Lambda=6 \mu\text{m}$ ,  $f=0.4$ ,  $f_c=0.45$ ,  $\Delta_c=-1.02\%$ ,  $f_x=0.4$ ,  $f_y=0.136$ ,低折射率区向远离中心调制区的方向偏移 1.42 μm。该光纤的耦合长度如图 2(a) 所示。采用 1.44 cm 的光纤制作 50:50 耦合器,其分光比及分光比差如图 2(b) 所示,发现该耦合器在波长 1.225~1.675 μm 范围内可实现分光比小于 1%、偏振态误差小于 0.5% 的优良特性。图 3 为该光纤在 1.55 μm 处的模场分布图,其单芯模场面积约为 60 μm<sup>2</sup>,虽然略小于单模光纤的模场面积,但是因为芯区周围 6 个空气孔的限制,与单模光纤接续时依然能够具备较低的插入损耗。

## 3 光纤结构的改进

椭圆形空气孔在制作中具有一定的难度,因此在图 1 所示结构的基础上提出改进方案。如图 4 所示,将中心调制区的椭圆形空气孔替换为五个一排小圆空气孔。在制作 PCF 时,先通过堆拉工艺制作出满足要求的中心具有一排空气孔的毛细棒,用于

表 1 光纤结构参数对双芯 PCF 及耦合器的光学特性的影响

Table 1 Impacts of structural parameters of the dual-core PCF on coupling characteristics

| Fiber structure parameters larger             | Coupling length            | Change rate of the coupling length of two polarization | Offset of the center wavelength of coupler         | Wavelength range                                   |
|---|----------------------------|--|--|--|
| Hole pitch                                    | Longer                     | About the same   | To long wavelength                                 | No change  |
| Diameter of air holes                         | Longer                     | $x$ polarization faster                                | No offset  | No change  |
| Diameter of cores                             | Shorter                    | $x$ polarization faster                                | To long wavelength                                 | No change  |
| Doping of cores                               | Shorter                    | $x$ polarization faster                                | To long wavelength                                 | No change  |
| $x$ axis of the center ellipse air hole       | Longer                     | $y$ polarization faster                                | To long wavelength                                 | No change  |
| $y$ axis of the center ellipse air hole       | Longer                     | $x$ polarization faster                                | No offset  | No change  |
| Offset of the cores close to center area      | Longer                     | About the same   | To short wavelength                                | First wider, then narrower                         |
| Offset of the cores far away from center area | First shorter, then longer | About the same   | First to long wavelength, then to short wavelength | First narrower, then wider, finally narrower again |

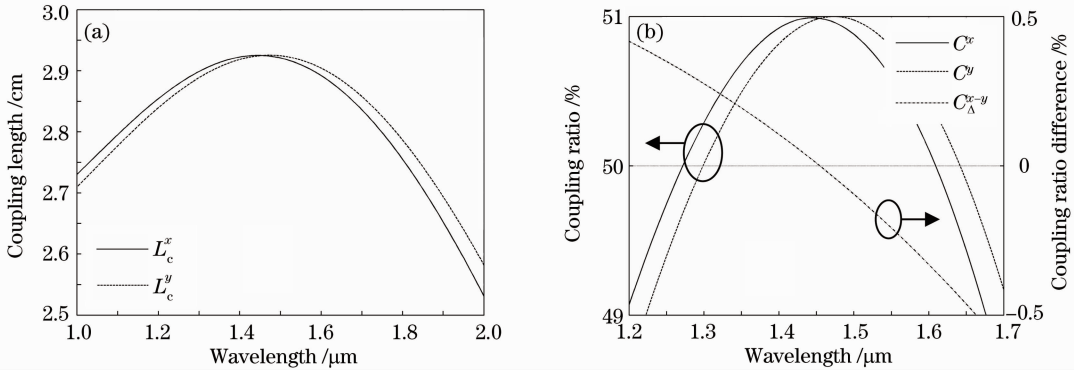


图 2 基于中心调制区为椭圆孔的双芯 PCF 设计的 50:50 耦合器的 (a) 耦合长度; (b) 分光比及偏振态分光比差  
 Fig. 2 (a) Coupling length, (b) coupling ratio and coupling ratio difference between  $x$  polarization and  $y$  polarization of 50:50 coupler based on dual-core PCF with elliptical central hole

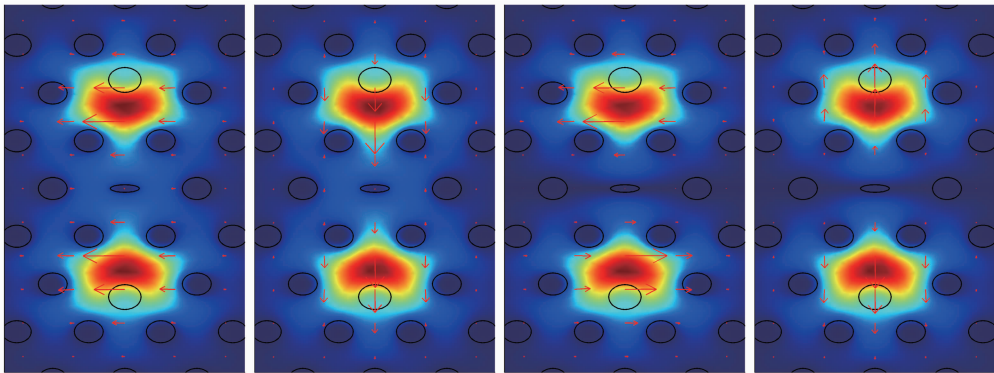


图 3 中心调制区采用椭圆孔的 PCF 在  $1.55 \mu\text{m}$  处的模场分布  
 Fig. 3 Mode field distribution of dual-core PCF with elliptical central hole at  $1.55 \mu\text{m}$

替代双芯 PCF 预制棒的中心椭圆孔, 这比椭圆形空气孔更容易实现。

优化后得到结构参数:  $\Delta = 6 \mu\text{m}$ ,  $f = 0.4$ ,  $f_c = 0.45$ ,  $\Delta_c = -1.4\%$ , 中心调制区小孔间距与包层空

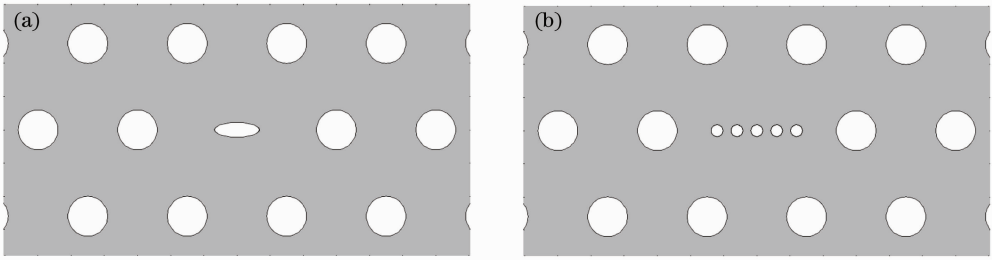


图 4 中心调制区为(a)椭圆孔和(b)一排小圆孔的双芯 PCF 局部结构图

Fig. 4 Local cross section of dual-core PCF with (a) elliptical central hole and (b) five small holes

气孔间距比例为 0.29,小孔直径与包层空气孔直径比例为 0.1,使低折区射率偏离原来的位置同样可以有效地增大带宽,最优值为向接近中心调制区的方向偏移  $0.28 \mu\text{m}$ 。其耦合长度如图 5(a)所示,采用  $1.93 \text{ cm}$ 该光纤设计的 50:50 耦合器分光比及两偏振态的分光比差如图 5(b)所示,在波长  $1.26 \sim 1.625 \mu\text{m}$ 范围内实现了分光比误差小于 1%,两偏振态之间分光比差小于 0.2%的良好特性,其带宽

特性虽然略逊于中心调制区采用椭圆形空气孔型双芯光纤耦合器的效果,但是偏振特性得到改善。图 6为该光纤在  $1.55 \mu\text{m}$ 处的模场分布图,其单芯模场面积约为  $85 \mu\text{m}^2$ ,与单模光纤的模场面积基本匹配,并且芯区周围 6 个空气孔所包围的区域直径也与单模光纤纤芯直径相近,因此与单模光纤接续时能够获得较低的插入损耗。

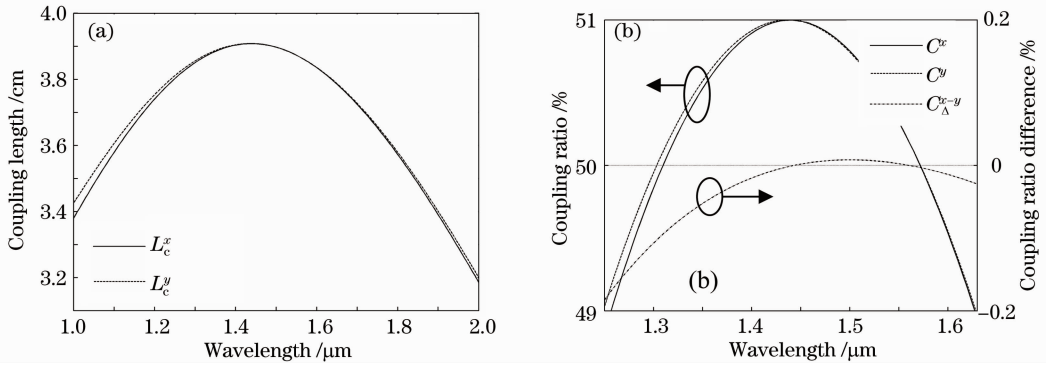


图 5 基于中心调制区为小圆孔的双芯 PCF 设计的 50:50 耦合器的(a)耦合长度和(b)分光比及两偏振态分光比差  
Fig. 5 (a) Coupling length, (b) coupling ratio and coupling ratio difference between  $x$  polarization and  $y$  polarization in of 50:50 couper based on dual-core PCF with five small holes

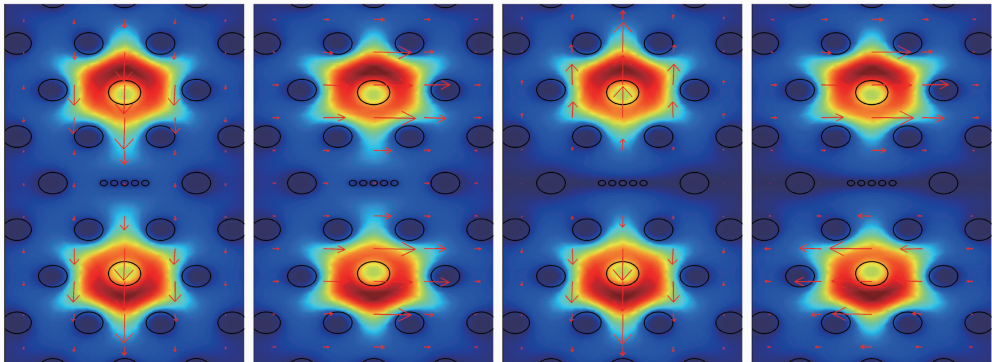


图 6 中心调制区采用小圆孔的 PCF 在  $1.55 \mu\text{m}$ 处的模场分布

Fig. 6 Mode field distribution of dual-core PCF with five small holes at  $1.55 \mu\text{m}$

为了验证上述方案的可行性,利用实验室的现有条件简单仿制了上述 PCF,因为目前缺少掺氟材料和合适尺寸的石英管,在实验中,采用掺锗材料代

替了掺氟低折射率区,空气孔的直径与孔距比与设计的不符,小空气孔也只用了 3 个而非设计中的 5 个,如图 7 所示。因为第一次制作经验不足,中心的

三孔细棒尺寸略小于其他细管细棒的尺寸,导致其在堆制过程中发生了扭转,但这在一定程度上验证了这种一排小孔代替椭圆孔的结构在制作上的可行性。

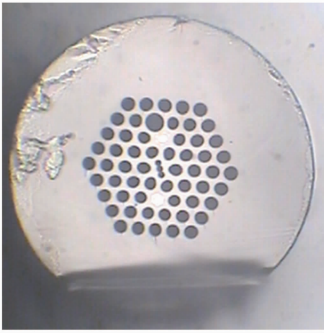


图 7 实际拉制的双芯 PCF 横截面

Fig. 7 Cross section of fabricated dual-core PCF

## 4 结 论

提出一种可用于宽带偏振不敏感光定向耦合器的新型双芯 PCF, 利用全矢量有限元方法分析了光纤结构参数对双芯 PCF 光学特性的影响, 得到了一组优化的双芯 PCF 结构参数, 满足易于制作、易于接续和接续损耗低等应用要求。基于这种光纤设计的 50:50 耦合器可以在  $1.225 \sim 1.675 \mu\text{m}$  波长范围内具有分光比误差小于 1%、两偏振态分光比误差小于 0.5% 的优良特性。并在此基础上提出了光纤结构改进方案, 通过一排小空气孔代替原来的中心调制区椭圆空气孔, 进一步降低了制作难度。基于该光纤可设计出在  $1.26 \sim 1.625 \mu\text{m}$  范围内分光比误差小于 1%、两偏振态分光比误差小于 0.2% 的 50:50 耦合器。另外, 在现有实验条件下, 试制了类似结构的双芯 PCF。

## 参 考 文 献

- 1 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 2 A. Bajarklev, J. Broeng, A. S. Bjarklev. Photonic Crystal Fibers[M]. Dordrecht: Kulwer Academic Publishers, 2003. 1~62
- 3 Hou Yu, Zhou Guiyao, Hou Lantian. Analysis of dispersion properties of octagonal structural photonic crystal fiber with double cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1068~1072

- 侯宇, 周桂耀, 侯蓝田. 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
- 4 Sun Bing, Chen Mingyang, Zhou Jun *et al.*. Design of a broadband mode converter based on an asymmetric dual-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1581~1585
- 孙兵, 陈明阳, 周骏等. 非对称双芯光子晶体光纤宽带模式转换器研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1581~1585
- 5 Li Honglei, Lou Shuqin, Guo Tiejing. Low loss fusion splicing of germanium doped core photonic crystal fiber and standard single mode fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1589~1593
- 李宏雷, 娄淑琴, 郭铁英. 掺锗芯光子晶体光纤和普通单模光纤的低损耗熔接[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1589~1593
- 6 Zhang Shaohua, Yao Jianquan, Lu Ying *et al.*. Highly nonlinear photonic crystal fibers with ultra-flattened chromatic dispersion and low confinement loss[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(12): 120605
- 张少华, 姚建铨, 陆颖等. 超平坦色散和低损耗的高非线性光子晶体光纤[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(12): 120605
- 7 Zhou Qinling, Lu Xingqiang, Zhang Guang. Mode characteristics of a large mode area flattened-mode photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1497~1500
- 周秦岭, 卢兴强, 张光. 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
- 8 J. Lagsgaard, O. Band, A. Bjarklev. Photonic crystal fiber design for broadband directional coupling[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(21): 2473~2475
- 9 S. K. Varshney, N. J. Florous, K. Saitoh *et al.*. The impact of elliptical deformations for optimizing the performance of dual-core fluorine photonic crystal fiber couplers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(5): 1982~1995
- 10 N. Florous, K. Saitoh, M. Koshiba. A novel approach for designing photonic crystal fiber splitters with polarization-independent propagation characteristics[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7365~7373
- 11 S. Lou, Z. Tang, L. Wang. Design and optimization of broadband and polarization insensitive dual-core photonic crystal fiber coupler[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **50**(14): 2016~2023
- 12 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, 祝远锋等. 基于非对称双芯光子晶体光纤的宽带定向耦合器研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 635~639
- 13 L. Wang, S. Lou, W. Chen. Full-vector effective index method for modeling endlessly single-mode and large mode area of photonic crystal fiber [C]. AOE2007, 2007: 370~372
- 14 K. Saitoh, Y. Sato, M. Koshiba. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber couplers[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(24): 3188~3195
- 15 N. Mothe, P. Bin. Numerical analysis of directional coupling in dual-core microstructured optical fibers[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(18): 15778~15789
- 16 M. Koshiba, T. Y. Gurvilinear. Hybrid edge/nodal elements with triangular shape for guided-wave problems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(5): 737~743

栏目编辑: 殷建芳