

# 短长度的双椭圆纤芯光子晶体光纤偏振分束器

李荣敏 曹 晔 童峥嵘

(天津理工大学, 薄膜电子与通信器件重点实验室及智能计算及软件新技术重点实验室, 天津 300384)

**摘要** 基于双折射效应设计了一种新型的双椭圆纤芯光子晶体光纤(PCF)偏振分束器,通过在每个纤芯处引入一对大空气孔和一对小空气孔来构成椭圆纤芯。采用全矢量有限元法(FEM)和半矢量光束传播法数值模拟偏振分束器的性能,结果表明,在工作波长  $1.55 \mu\text{m}$  处,光纤长度为  $544 \mu\text{m}$  时, $X$ 、 $Y$  方向偏振光可实现分离,且消光比达到  $-43.75 \text{ dB}$ ,消光比小于  $-10 \text{ dB}$  的带宽为  $80 \text{ nm}$ 。这为设计具有高消光比和极短长度的双芯光子晶体光纤偏振分束器提供了一种新的结构。

**关键词** 光纤光学;双芯光子晶体光纤;偏振分束器;全矢量有限元法;半矢量光束传播法

**中图分类号** O436;TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1005004

## Short Length Polarization Splitter Based on Dual Elliptical-Core Photonic Crystal Fiber

Li Rongmin Cao Ye Tong Zhengrong

(Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices and Key Laboratory of Intelligent Computing and Novel Software Technology, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract** Based on the birefringence effect, a novel polarization splitter based on dual elliptical-core photonic crystal fiber (PCF) is proposed, the elliptical-core through introducing a pair of big air holes and a pair of small air holes in every core. The full-vector finite element method (FEM) and the semi-vector beam propagation method (BPM) are employed to analyze the performance of the splitter. Numerical simulations demonstrate that it is possible to obtain a  $544 \mu\text{m}$  long polarization splitter, and the polarized light extinction ratio is  $-43.75 \text{ dB}$  at the wavelength of  $1.55 \mu\text{m}$ . Besides, the bandwidth is over  $80 \text{ nm}$  when the extinction ratio is less than  $-10 \text{ dB}$ . Such design provides a new approach to get highly extinction ratio and short length polarization splitter based on dual-core photonic crystal fiber.

**Key words** fiber optics; dual-core photonic crystal fiber; polarization splitter; full-vector finite element method; semi-vector beam propagation method

**OCIS codes** 060.2270; 060.2280; 060.5295

## 1 引言

偏振分束器是光网络中的一种重要器件,能将一束光分裂为两个正交偏振态光束,并沿不同的方向传输,可运用在光通信、光传感和光电检测等方面。目前偏振分束器主要分为两种:一种是基于模式干涉原理,根据耦合长度的不同分离两种偏振态,这一种分束器设计较灵活。另一种是基于模式分类效应,这种方法工作范围较大,加工容差性较大。

近年来,光子晶体光纤(PCF)引起了人们的关

注,其结构设计灵活,与普通光纤相比,具有无截止单模传输、高双折射、高非线性、色散可调及偏振保持等独特性质<sup>[1~5]</sup>。双芯光纤是光学系统中常用的偏振器件,然而普通双芯光纤在制作上较繁琐。光子晶体光纤的出现为制作双芯光纤、设计新型的光纤偏振分束器提供了可能<sup>[6]</sup>。基于双折射效应设计的双芯光子晶体光纤偏振分束器已有相关报道<sup>[7~11]</sup>。文科等<sup>[12~15]</sup>设计的双芯光子晶体光纤偏振分束器消光比分别为  $-16.9$ 、 $-41.3$ 、 $-24.1$ 、

收稿日期: 2012-05-30; 收到修改稿日期: 2012-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(61107052)资助课题。

作者简介: 李荣敏(1988—),女,硕士研究生,主要从事光子晶体光纤方面的研究。E-mail: lirongmin1108@163.com

导师简介: 曹 晔(1976—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光纤通信与光纤传感等方面的研究。

E-mail: cynever@163.com

-25.0 dB, 带宽分别为 270、80、190、80 nm, 这些方法各有特色, 但大多结构复杂, 消光比不高, 且实现两偏振光的光纤长度较长, 分别为 1055、1659、4720、11300  $\mu\text{m}$ , 性能有待进一步提高。

本文设计了一种结构简单、易于制作的双芯光子晶体光纤偏振分束器, 并利用全矢量有限元法<sup>[16]</sup>精确地模拟了这种偏振分束器的性能。

## 2 光纤设计

采用全矢量有限元法模拟双芯光子晶体光纤的模式特性。图 1 是设计的双芯光子晶体光纤偏振分束器的横截面示意图, 其空气孔以正六边形点阵排列, 横轴方向上的两个纤芯分别是去掉两个相邻的空气孔所致, 两个纤芯是对称的, 中间由一个直径为  $d_1$  的空气孔隔开。每个纤芯处引入了两个大的直径为  $d_2$  的空气孔和两个小的直径为  $d_1$  的空气孔构成椭圆纤芯。空气孔间距  $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$ , 空气孔直径  $d_0 = 0.6 \mu\text{m}$ ,  $d_1 = 0.4 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 1.0 \mu\text{m}$ , 整个光纤的基质为纯石英材料, 其折射率由 Sellmeier 公式求出, 空气孔的折射率  $n_{\text{air}} = 1$ 。

当两个光波相互平行靠近时, 它们光场的横向耦合可用模式间的耦合来表示。根据波导模式耦合理论, 耦合长度  $L$  可表示为<sup>[17,18]</sup>

$$L = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_o}, \quad (1)$$

式中  $\beta_e$  和  $\beta_o$  分别为偶模和奇模的传播常数。

在双芯光子晶体光纤中, 总的模式可看作 4 个模式的叠加<sup>[19]</sup>, 分别为 X 偏振方向的偶模  $E_{ex}(x, y)$ , X 偏振方向的奇模  $E_{ox}(x, y)$ , Y 偏振方向的偶模  $E_{ey}(x, y)$ , Y 偏振方向的奇模  $E_{oy}(x, y)$ , 对应的传播常数为  $\beta_{ex}, \beta_{ox}, \beta_{ey}, \beta_{oy}$ , 有效折射率为  $n_{ex}, n_{ox}, n_{ey}, n_{oy}$ 。双芯光子晶体光纤的模场分布情况(箭头所示为模式的偏振方向, 近似平行于 X 和 Y 方向)如图 2 所示。双芯光子晶体光纤在 X 偏振方向和 Y 偏振方向上的耦合长度分别定义为

$$L_x = \frac{\pi}{\beta_{ex} - \beta_{ox}} = \frac{\lambda}{2(n_{ex} - n_{ox})}, \quad (2)$$

$$L_y = \frac{\pi}{\beta_{ey} - \beta_{oy}} = \frac{\lambda}{2(n_{ey} - n_{oy})}. \quad (3)$$

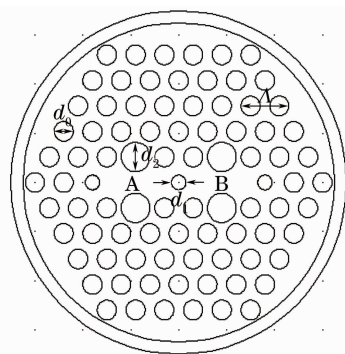


图 1 双芯光子晶体光纤的截面图

Fig. 1 Cross section of the dual-core PCF

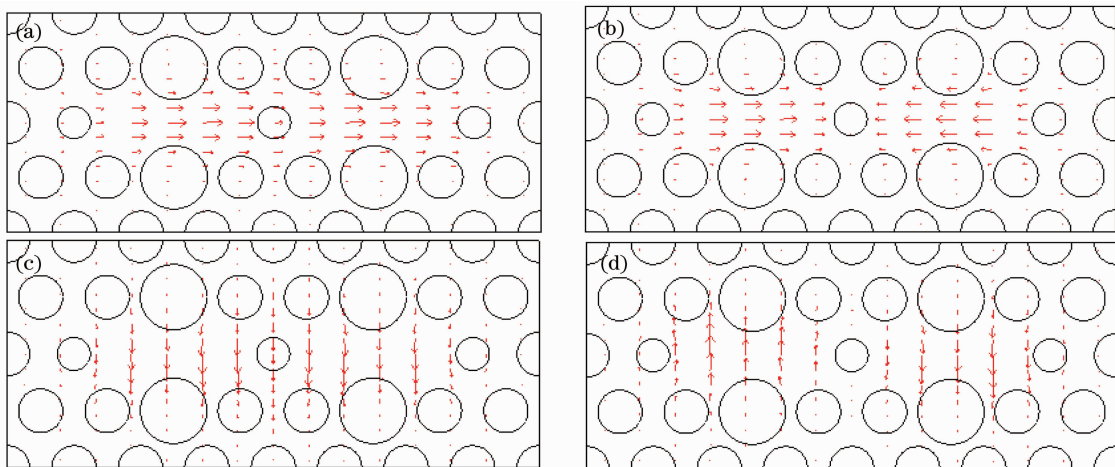


图 2 光子晶体光纤模型中 4 个模式的模场分布。(a)  $E_{ex}(x, y)$ ; (b)  $E_{ox}(x, y)$ ; (c)  $E_{ey}(x, y)$ ; (d)  $E_{oy}(x, y)$

Fig. 2 Transverse magnetic-field vector distributions of the PCF. (a)  $E_{ex}(x, y)$ ; (b)  $E_{ox}(x, y)$ ; (c)  $E_{ey}(x, y)$ ; (d)  $E_{oy}(x, y)$

## 3 数值结果与分析

### 3.1 耦合长度

采用全矢量有限元法计算出双芯光子晶体光纤

在不同波长下的 X 偏振光和 Y 偏振光的偶模和奇模有效折射率, 通过(2)、(3)式计算出不同波长  $\lambda$  下对应的 X 偏振光和 Y 偏振光的耦合长度, 如图 3 所

示,在波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  时,  $X$  偏振方向的耦合长度为  $108.8 \mu\text{m}$ ,  $Y$  偏振方向的耦合长度为  $136 \mu\text{m}$ 。从图 3 可以看出,随着波长  $\lambda$  的增大,  $X$  偏振方向和  $Y$  偏振方向的耦合长度同时减小,并且  $X$  偏振方向的耦合长度小于  $Y$  偏振方向的耦合长度,这是因为在每个纤芯处引入了一对大空气孔和一对小空气孔,使纤芯呈椭圆形,这样就增大了光纤结构的不对称性,使得  $Y$  偏振方向的耦合长度增大,同时光纤具有双折射效应。

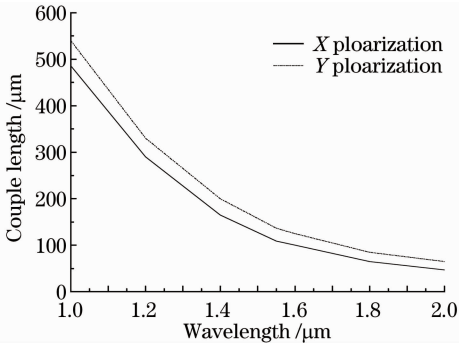


图 3  $X$  偏振和  $Y$  偏振光的耦合长度

Fig. 3 Coupling length for  $X$  polarization and  $Y$  polarization

### 3.2 归一化功率

所设计的双芯光子晶体光纤在  $X$ 、 $Y$  两个偏振方向上的耦合长度不同,可以制作微型偏振分束器。光纤  $X$  偏振方向的耦合长度  $L_x$  小于  $Y$  偏振方向的耦合长度  $L_y$ ,只要光纤的长度满足<sup>[20]</sup>:

$$L = mL_x = nL_y, \quad (4)$$

式中  $m, n$  均为正整数,  $m:n$  为奇数比偶数,或者

$m:n$  为偶数比奇数。

运用光束传播法(BPM)<sup>[21]</sup>数值模拟了偏振分束器纤芯 A 中基模  $X$ 、 $Y$  偏振光的归一化功率随传输距离的变化情况,如图 4 所示。该双芯光子晶体光纤在波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  处,对应  $X$  偏振方向的耦合长度  $L_x = 108.8 \mu\text{m}$ ,对应  $Y$  偏振方向的耦合长度  $L_y = 136 \mu\text{m}$ 。从图 4 可以看出,当  $L = 5L_x = 4L_y = 544 \mu\text{m}$  时实现了两偏振光的分离,即在纤芯 A 中输入波长  $1.55 \mu\text{m}$  的光,通过长度为  $544 \mu\text{m}$  的光子晶体光纤偏振分束器后,  $X$  偏振光完全耦合到另一个纤芯 B 中,而  $Y$  偏振光则在纤芯 A 中,如图 5 所示,故输入的基模场在通过长度为  $544 \mu\text{m}$  的光子晶体光纤偏振分束器后,纤芯 A 中仅剩下  $Y$  偏振方向的模场,纤芯 B 中仅剩下  $X$  偏振方向的模场,从而实现了  $X$  和  $Y$  偏振模式的分离。

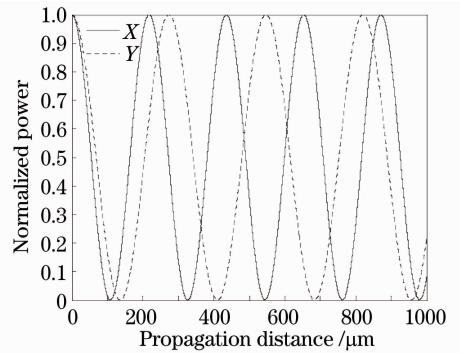


图 4 纤芯 A 中基模  $X$ 、 $Y$  偏振光的归一化功率随传输距离的变化曲线

Fig. 4 Normalized power in core A versus the propagation distance

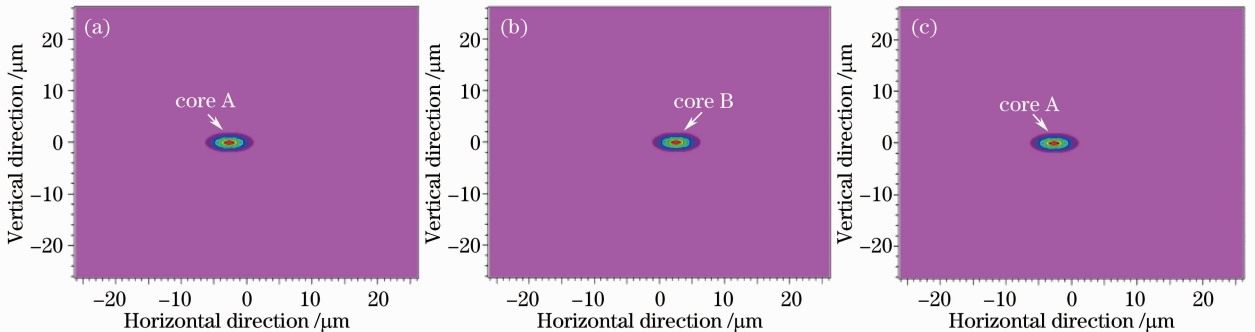


图 5 (a) 双芯 PCF 偏振分束器的模场分布纤芯 A 中输入波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  的光; (b) 传输  $544 \mu\text{m}$  后,  $X$  偏振态模场; (c) 传输  $544 \mu\text{m}$  后,  $Y$  偏振态模场

Fig. 5 (a) Mode field of the dual-core PCF polarization splitter for  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  in core A; (b) mode field of the  $X$  polarization after the propagation distance of  $544 \mu\text{m}$ ; (c) mode field of the  $Y$  polarization after the propagation distance of  $544 \mu\text{m}$

### 3.3 损耗

已知光子晶体光纤的传播常数为复数,通过模式有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的虚部可以得到该模式下所对应

的光纤的限制损耗,故各模式所对应的限制损耗与波长的关系为

$$L = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im} n_{\text{eff}} \times 10^6. \quad (5)$$

表 1 给出了在波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  处, 双芯光子晶体光纤的各偏振态的限制损耗和偏振光经过  $544 \mu\text{m}$  距离传输之后的损耗, 由表 1 可得到, 光纤的限制损耗很低, 且当 X 偏振光经过  $544 \mu\text{m}$  距离传输之后完全耦合到另一个纤芯时, 损耗仅为  $10^{-2}$  数量级, 非常有利于光信号的传输。

表 1 在波长  $1.55 \mu\text{m}$  处, 双芯 PCF 各偏振态的限制损耗和传输  $544 \mu\text{m}$  损耗

Table 1 Confinement loss of the orthogonal polarization modes for the PCF at the wavelength of  $1.55 \mu\text{m}$  and the loss after transmission  $544 \mu\text{m}$

Polarization ( $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ )	Confinement loss / (dB/mm)	Loss after transmission $544 \mu\text{m}$ / dB
$E_{ex}(x, y)$	0.0205	0.011152
$E_{ox}(x, y)$	0.0221	0.0120224
$E_{ey}(x, y)$	0.0213	0.0115872
$E_{oy}(x, y)$	0.0257	0.0139808

### 3.4 消光比

消光比是衡量偏振分束器性能的重要指标, 当纤芯 A 中输入功率为  $P_{in}^{x,y}$  时, 其输出功率为<sup>[19]</sup>

$$P_{out}^{x,y} = P_{in}^{x,y} \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{z}{L}\right), \quad (6)$$

则纤芯 A 中 X、Y 偏振光的消光比为

$$E_R = 10\lg\left(\frac{P_{out}^x}{P_{out}^y}\right). \quad (7)$$

图 6 是在双芯光子晶体光纤长度为  $544 \mu\text{m}$  时, 根据(7)式可得出纤芯 A 在输入波长为  $1.5 \sim 1.6 \mu\text{m}$  范围内的消光比。在波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  处, 消光比可达到  $-43.75 \text{ dB}$ , 高于参考文献[11~13], 对于入射光波长在  $1.51 \sim 1.59 \mu\text{m}$  时, 其消光比均小于  $-10 \text{ dB}$ , 因此所设计的双芯光子晶体光纤偏振分束器在波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  附近, 消光比小于  $-10 \text{ dB}$  的波长范围为  $80 \text{ nm}$ 。

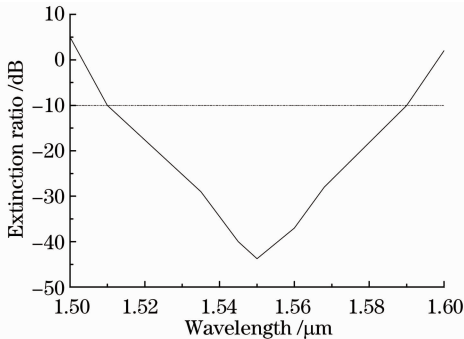


图 6 双芯光子晶体光纤偏振分束器的消光比随波长的变化曲线

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

## 4 结 论

通过在纤芯处引入直径不同的空气孔, 破坏光子晶体光纤中纤芯的对称性, 可以获得较明显的双折射效果。基于双折射效应设计了一种新型的双椭圆纤芯光子晶体光纤偏振分束器, 采用全矢量有限元法和半矢量光束传播法数值模拟该偏振分束器的性能。当两偏振光经过  $544 \mu\text{m}$  距离的传输后, X 偏振光完全耦合到另一个纤芯中, 实现了两偏振光的分离; 在波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  处, 光纤的限制损耗很低, 并且偏振光经过  $544 \mu\text{m}$  距离传输之后损耗仅为  $10^{-2}$  数量级; 在波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  处, 消光比达到  $-43.75 \text{ dB}$ , 且波长从  $1.51 \sim 1.59 \mu\text{m}$  消光比小于  $-10 \text{ dB}$ , 带宽范围是  $80 \text{ nm}$ 。这为设计具有高消光比和极短长度的双芯光子晶体光纤偏振分束器提供了一种新的结构。

## 参 考 文 献

- 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  
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
- 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  
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
- Wang Dan, Zheng Yi. Numerical simulation and analysis of double cladding photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806010  
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
- D. J. Juan Hu, P. P. Shumb, C. Lu *et al.*. Dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber for nonlinear applications [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(20): 4072~4076
- 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  
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
- Z. Wang, T. Taru, T. A. Birks *et al.*. Coupling in dual-core photonic bandgap fibers: theory and experiment [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8): 4795~4803
- Zhang Xuan, Liao Qinghua, Chen Shuwen *et al.*. Proposal of novel and efficient polarization beam splitter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(10): 104215  
张 旋, 廖清华, 陈淑文 等. 新型高效偏振光分束器的设计 [J]. *物理学报*, 2011, **60**(10): 104215
- Mingyang Chen, Bing Sun, Yongkang Zhang *et al.*. Design of broadband polarization splitter based on partial coupling in square-lattice photonic-crystal fiber [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(16): 3042~3048
- Dong Mao, Chunying Guan, Libo Yuan. Polarization splitter based on interference effects in all-solid photonic crystal fibers [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(19): 3748~3752
- 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, 间多等. 高双折射双芯光子晶体光纤特性[J]. *中国激光*, 2012, **39**(4): 0405005
- 11 Shuo Liu, Shuguang Li, Ying Du. Analysis of the characteristics of the polarization splitter based on tellurite glass dual-core photonic crystal fiber[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2012, **44**(6): 1813~1817
- 12 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
- 13 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
- 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
- 14 Jianhua Li, Jingyuan Wang, Rong Wang *et al.*. A novel polarization splitter based on dual-core hybrid photonic crystal fibers[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2011, **43**(4): 795~800
- 15 Bing Sun, Mingyang Chen, Rongjin Yu *et al.*. Design of a fiber polarizer based on an asymmetric dual-core photonic crystal fiber [J]. *Optoelectron. Lett.*, 2011, **7**(4): 0253~0255
- 16 S. Selleri, L. Vincetti, A. Cucinotta *et al.*. Complex FEM modal solver of optical waveguides with PML boundary conditions [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2001, **33**(4,5): 359~371
- 17 Bo Fu, Shuguang Li, Yangyan Yao *et al.*. Design of two kinds of dual-core high birefringence and high coupling degree photonic crystal fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **282**(20): 4064~4068
- 18 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
- 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
- 19 N. J. Florous, K. Saitoh, M. Koshiba. Synthesis of polarization-independent splitters based on highly birefringent dual-core photonic crystal fiber platforms [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(11): 1231~1233
- 20 J. S. Chiang, N. H. Sun, S. C. Lin *et al.*. Analysis of an ultrashort PCF-based polarization splitter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(5): 707~713
- 21 K. Saitoh, S. Member, M. Koshiba. Full-vectorial finite element beam propagation method with perfectly matched layers for anisotropic optical waveguides[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(3): 405~413

栏目编辑: 王晓琰