

基于碲酸盐玻璃的新型双芯光子晶体光纤偏振分束器

曹 晔 崔丹宁* 童峥嵘 赵 健

(天津理工大学薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384)

摘要 设计了一种基于碲酸盐玻璃的双芯光子晶体光纤(PCF)偏振分束器,采用全矢量有限元法和模式耦合基本理论以及全矢量光束传播法对其特性进行了研究,并与相同结构参数的石英玻璃双芯光子晶体光纤偏振分束器的特性进行了对比。结果表明,此种偏振分束器有更高的消光比和极低的耦合损耗,在工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$, 光纤长度为 $441 \mu\text{m}$ 时,两偏振光实现分离,两个纤芯在 x, y 方向偏振光的消光比分别达到 -50.1 dB 和 -53.6 dB , 消光比小于 -20 dB 的带宽分别为 34 nm 和 36 nm , 耦合损耗仅为 0.0009 dB 。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤偏振分束器; 全矢量有限元法; 消光比; 光束传播法

中图分类号 O436; TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0605007

Dual-Core Photonic Crystal Fiber Polarization Splitter Based on Tellurite Glass

Cao Ye Cui Danning Tong Zhengrong Zhao Jian

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

Abstract A new kind of dual-core photonic crystal fiber (PCF) polarization splitter based on tellurite glass is designed. The full vector finite element method, coupled-mode theory and the full vector beam propagating method are employed to investigate the characteristics of the polarization splitter, meanwhile the quartz glass dual-core PCF polarization splitter with the same structural parameters is applied to compare. Numerical investigations demonstrate that the designed polarization splitter has higher extinction ratio and lower coupling loss. The two polarized lights are separated entirely with $441 \mu\text{m}$ fiber at the wavelength of $1.55 \mu\text{m}$ and the extinction ratios in x and y polarization directions are -50.1 dB and -53.6 dB , respectively. When the extinction ratio is less than -20 dB , the bandwidths are 34 nm and 36 nm respectively, and the coupling loss is only 0.0009 dB .

Key words fiber optics; photonic crystal fiber polarization splitter; full vector finite element method; extinction ratio; beam propagating method

OCIS codes 060.2270; 060.2280; 060.5295

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)因其具有传统光纤无法比拟的高双折射、大模面积、灵活非线性、可控色散以及无截止单模传输等独特特性^[1~5],受到人们的广泛研究。多芯 PCF 尤其是双芯 PCF 在现代光纤光学系统中发挥着重要的作用,多种光学器件如偏振分束器、滤波器、耦合器等^[6~8]都用到了双芯 PCF。

基于双芯 PCF 的偏振分束器成为近年来国际学术界的一个研究热点。传统双芯光纤存在制作过程繁琐、对工艺技术要求高等缺点,因此,PCF 的出现为制造双芯光纤偏振分束器提供了新的途径。Florous 等^[9]对高双折射双芯 PCF 偏振无关分束器进行了分析研究;Mao 等^[10]提出了新颖的基于干涉效应的全固双芯 PCF 偏振分束器;Chen 等^[11]基于

收稿日期: 2012-12-08; 收到修改稿日期: 2013-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(61107052)和天津市高等学校科技发展基金计划(20110704)资助课题。

作者简介: 曹 晔(1976—),男,博士,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

* 通信联系人。E-mail: cuidanning@163.com

不对称双芯矩形晶格 PCF 的局部耦合设计了宽带偏振分束器; Zhang 等^[12] 对矩形晶格单模单偏振 PCF 偏振分束器进行了研究。

目前主要对以石英为基底材料的双芯 PCF 偏振分束器进行研究。近年来,软玻璃 PCF 由于其具有较高的线性和非线性折射率以及较宽的传输光谱等特点引起了人们的研究兴趣。Hameed 等^[13] 提出并研究了软玻璃液晶填充的可调谐双芯 PCF 耦合器; 王晓琰等^[14] 提出了中红外高双折射高非线性宽带正常色散硫系玻璃 As_2S_3 为基底的 PCF; Savellii 等^[15] 分析了碲酸盐 $TeO_2-ZnO-Na_2O$ 微结构光纤的制作和特性; Liu 等^[16,17] 设计了基于 $ZnTe$ 碲酸盐玻璃的三芯 PCF 偏振分束器, 并对基于碲酸盐玻璃的双芯 PCF 偏振分束器的特性进行了分析。目前, 已有多种实用技术用于拉制非石英玻璃 PCF, 如毛细管堆积、钻孔、内置铸造、挤压等, 其中, 由于挤压机制具有可控和可重复控制的优点, 被广泛用于拉制复杂的非石英玻璃 PCF 结构。而且, 利用挤压方法已经成功拉制出了碲酸盐玻璃 PCF^[18]。

本文基于碲酸盐玻璃设计了一种结构简单、易于制作的双芯 PCF 偏振分束器, 利用全矢量有限元法和光波导的模式耦合理论分别对其进行了数值计算和研究, 同时采用全矢量光束传播法对这种双芯 PCF 偏振分束器的传输特性进行了模拟仿真, 并与具有相同结构参数、基底材料为石英玻璃的偏振分束器的特性进行了对比, 得到了一种微型、高消光比和低耦合损耗的双芯 PCF 偏振分束器。这为制作高性能的双芯光子晶体光纤偏振分束器提供了新的途径。

2 光纤结构与理论基础

2.1 光纤结构

图 1 为本文设计的双芯 PCF 偏振分束器的截面图。空气孔呈压缩六边形排列, 以提高 x 和 y 两偏振方向的不对称性, 从而提高双折射, 致使两偏振方向的耦合长度出现明显的差异, 这样可以使两偏振态较容易分开, 从而实现偏振分束。两个纤芯平行于 y 轴放置, 空气孔直径 $d_0 = 0.6 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.7 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.76 \mu\text{m}$, x, y 轴两方向的孔间距分别为 $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$, $\Lambda_y = 0.7 \mu\text{m}$ 。基底材料碲酸盐玻璃的有效折射率由 Sellmeier 公式求出^[14]:

$$n(\lambda) = \sqrt{A + \frac{B\lambda^2}{\lambda^2 - C} + \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - E}}, \quad (1)$$

其中, $A = 2.4843245$, $B = 1.6174321$, $C = 0.053715551$, $D = 2.4765135$, $E = 225.0$ 。

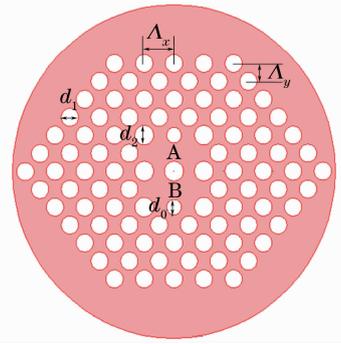


图 1 双芯 PCF 偏振分束器截面图

Fig. 1 Cross section of the dual-core polarization splitter

2.2 理论基础

由模式耦合理论可知, 双芯 PCF 中存在 4 个束缚模式, x 偏振方向的奇模 (E_{x_o})、偶模 (E_{x_e}) 和 y 偏振方向的奇模 (E_{y_o})、偶模 (E_{y_e}), 它们的有效折射率为 $n_{\text{odd}}^{x,y}$ 和 $n_{\text{even}}^{x,y}$, 耦合长度定义为

$$L_C^{x,y}(\lambda) = \frac{\lambda}{2(n_{\text{even}}^{x,y} - n_{\text{odd}}^{x,y})}, \quad (2)$$

式中 λ 为入射波长, 不同波长下的有效折射率 $n_{\text{odd}}^{x,y}$ 和 $n_{\text{even}}^{x,y}$ 通过全矢量有限元法计算得出。对于某一入射波长, x 和 y 两方向的耦合长度应满足

$$L_C^x(\lambda) : L_C^y(\lambda) = \frac{n_{\text{even}}^x - n_{\text{odd}}^x}{n_{\text{even}}^y - n_{\text{odd}}^y} = m : n, \quad (3)$$

式中 m 和 n 为整数且奇偶性相反。只要光纤的长度 $z = mL_C^x = nL_C^y$, 两偏振光在纤芯中的传输距离为 z 时可完全分开, 实现偏振分束。当纤芯中基模的入射功率为 P_{in} 时, A、B 两纤芯输出端 x, y 两偏振方向的功率分别为

$$P_{\text{out,A}}^{x,y} = P_{\text{in}} \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{z}{L_C^{x,y}}\right), \quad (4)$$

$$P_{\text{out,B}}^{x,y} = P_{\text{in}} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{z}{L_C^{x,y}}\right). \quad (5)$$

偏振分束器的耦合损耗定义为

$$V_{\text{loss}} = -10 \lg\left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}\right), \quad (6)$$

式中 P_{out} 为两纤芯输出端的总功率。消光比是衡量偏振分束器性能优劣的重要参数, 纤芯 A 和 B 在 x, y 两偏振方向的消光比分别表示为

$$R_{\text{PE}}^A = 10 \lg\left(\frac{P_{\text{A}}^y}{P_{\text{A}}^x}\right), R_{\text{PE}}^B = 10 \lg\left(\frac{P_{\text{B}}^x}{P_{\text{B}}^y}\right). \quad (7)$$

3 数值结果与分析

3.1 耦合长度

耦合长度是衡量双芯间耦合效应的重要参数, 耦合长度越短, 耦合特性越强^[15]。由 (2) 式可计算

出不同波长下的耦合长度,如图 2 所示。两种基底材料双芯 PCF 的两偏振方向的耦合长度呈相同的变化趋势,即随着波长的增大而减小。在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时,碲酸盐玻璃 PCF 在 x 、 y 方向的耦合长度分别为 $110 \mu\text{m}$ 和 $63 \mu\text{m}$,石英玻璃 PCF 在 x 、 y 方向的耦合长度分别为 $35 \mu\text{m}$ 和 $28 \mu\text{m}$ 。碲酸盐玻璃 PCF 的耦合长度和 x 、 y 方向的耦合长度差值均大于石英玻璃 PCF 的相应值,由于本文设计的 PCF 的双芯是平行于 y 轴放置,所以 x 方向的耦合长度大于 y 方向的相应值,且在 y 轴方向进行了压缩,增大了两方向的不对称性,使耦合长度差值相对增大,从而使两个偏振态分离。

3.2 归一化功率

碲酸盐和石英玻璃两种 PCF 偏振分束器在纤芯 A 中、波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时,归一化功率随传输距离的变化如图 3 所示。由图 2 可知两种双芯 PCF 在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处两偏振方向的耦合长度。从图 3(a)可以看出,对于碲酸盐玻璃 PCF 偏振分束器,当传输距离 $z = 4L_c^x = 7L_c^y = 441.3 \mu\text{m}$ 时, x 偏振光在 A 芯中, y 偏振光则完全耦合到 B 芯,此时实

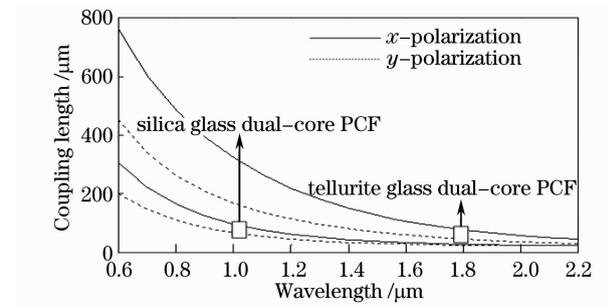
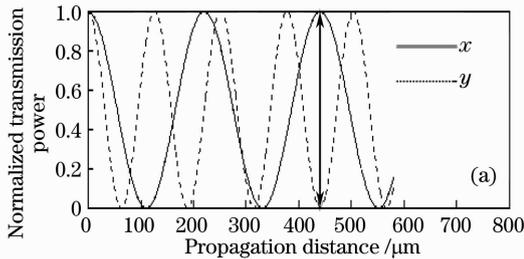


图 2 碲酸盐和石英玻璃双芯 PCF x 、 y 偏振方向的耦合长度

Fig. 2 Coupling lengths for x and y polarizations of dual-core PCFs for tellurite and silica glass

现了两偏振态的完全分离;由图 3(b)可知,对于石英玻璃 PCF 偏振分束器,当传输距离 $z = 4L_c^x = 5L_c^y = 140 \mu\text{m}$ 时,实现了偏振分离。在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时,利用全矢量波束传播法对所设计的碲酸盐玻璃 PCF 偏振分束器纤芯中的电场分布进行的模拟仿真如图 4 所示。左侧图和右侧图分别为 x 、 y 两偏振方向的电场分布,可以看出入射光进入 A 芯,传输 $441.3 \mu\text{m}$ 后, x 偏振光在 A 芯中, y 偏振光经过耦合进入 B 芯。

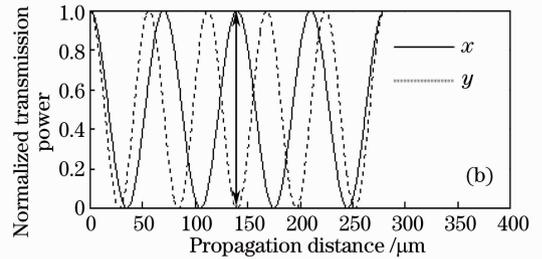


图 3 归一化功率随传输距离的变化。(a) 碲酸盐玻璃;(b) 石英玻璃

Fig. 3 Normalized transmission power versus propagation distance. (a) Tellurite glass; (b) silica glass

3.3 消光比

消光比的大小决定了偏振分束器的分光效果,消光比越大越有利于将两偏振态分开。由图 5(a)可知,对于碲酸盐玻璃偏振分束器,在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处, $R_{\text{PE}}^{\text{A}} = -50.1 \text{ dB}$, $R_{\text{PE}}^{\text{A}} < -20 \text{ dB}$ 的波长范围为 $1.533 \sim 1.567 \mu\text{m}$,消光比带宽达到 34 nm ; $R_{\text{PE}}^{\text{B}} = -53.6 \text{ dB}$, $R_{\text{PE}}^{\text{B}} < -20 \text{ dB}$ 的波长范围为 $1.535 \sim 1.571 \mu\text{m}$,消光比带宽达到 36 nm 。由图 5(b)可知,对于石英玻璃偏振分束器,在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $R_{\text{PE}}^{\text{A}} = -25.5 \text{ dB}$, $R_{\text{PE}}^{\text{A}} < -20 \text{ dB}$ 的波长范围为 $1.527 \sim 1.58 \mu\text{m}$,消光比带宽达到 53 nm ; $R_{\text{PE}}^{\text{B}} = -28.2 \text{ dB}$, $R_{\text{PE}}^{\text{B}} < -20 \text{ dB}$ 的波长范围为 $1.526 \sim 1.574 \mu\text{m}$,消光比带宽达到 48 nm 。所以,由图 5 可知,两种基底材料相比,碲酸盐玻璃偏振分

束器具有更高的消光比,更适合用于偏振分束器。与碲酸盐玻璃相比石英玻璃有更低的模场限制,两纤芯间会发生更强的耦合,所以石英玻璃偏振分束器具有更宽的带宽。

在其他参数不变的情况下,通过减小孔间距 Δ 或空气孔的直径 d ,可使偏振分束器的带宽增加;相反,若增大孔间距 Δ ,可提高偏振分束器的消光比,但同时偏振分束器的长度会随之增长,这将使制作成本提高。同时,还对所设计的光纤长度容差进行了分析,在误差为 $\pm 5\%$ 的情况下,所设计的偏振分束器在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时,基模仍能保证偏振光的消光比在纤芯端口处小于 -20 dB ,具有较高的实际应用价值。

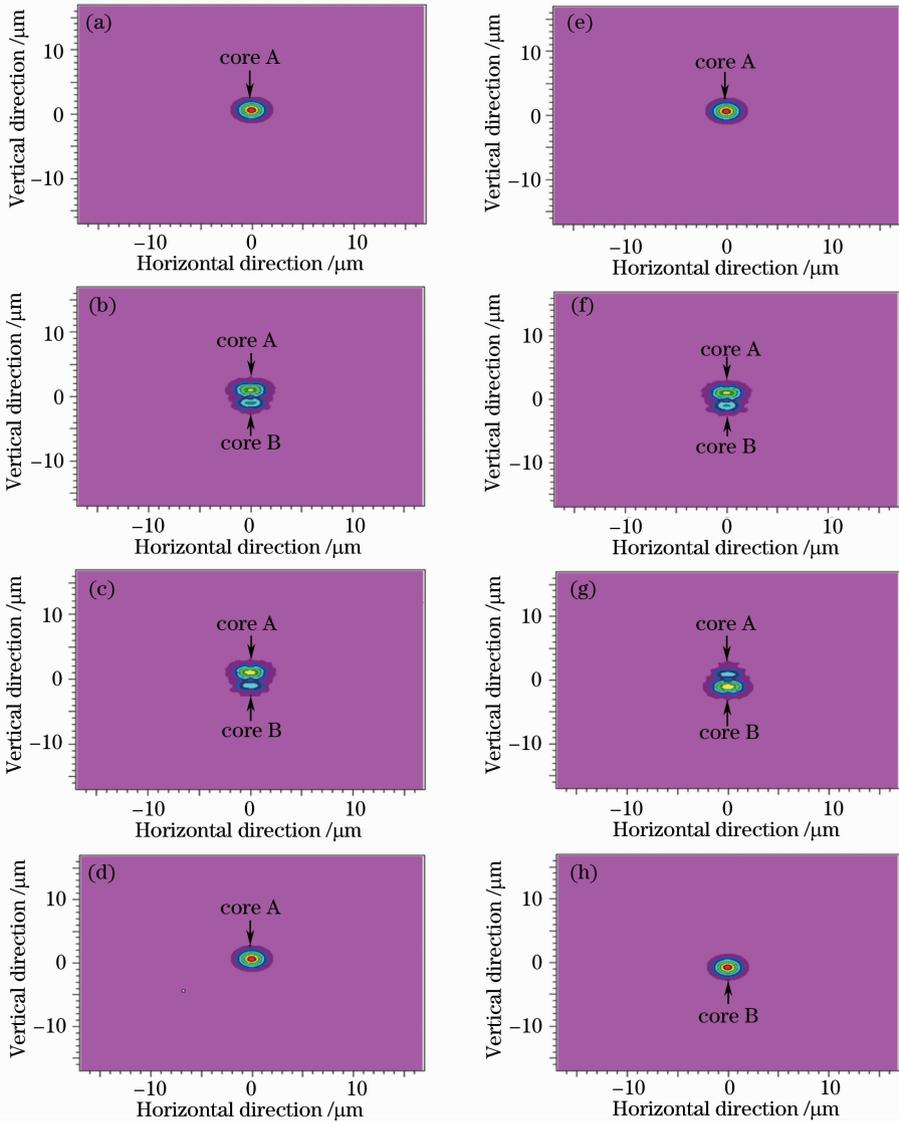


图 4 碲酸盐双芯 PCF 偏振分束器 x (左侧)、 y (右侧)方向的电场分布。

(a)、(e) $z=0$; (b)、(f) $z=L_c/3$; (c)、(g) $z=2L_c/3$; (d)、(h) $z=L_c$

Fig. 4 Electric field distributions of tellurite glass dual-core PCF polarization splitter in the x -polarized (left) and y -polarized (right) directions. (a), (e) $z=0$; (b), (f) $z=L_c/3$; (c), (g) $z=2L_c/3$; (d), (h) $z=L_c$

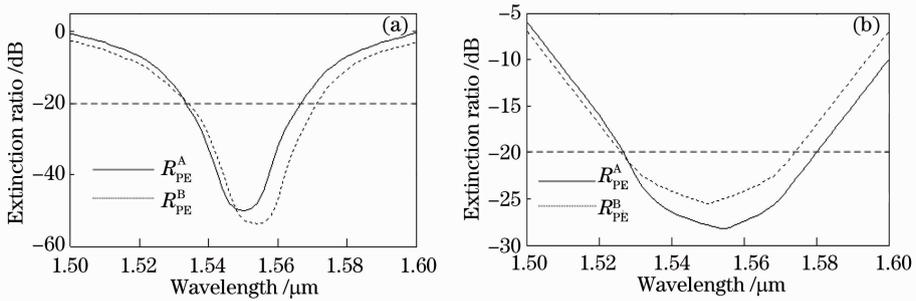


图 5 消光比随波长的变化。(a) 碲酸盐玻璃;(b) 石英玻璃

Fig. 5 Extinction ratios varying with wavelength. (a) Tellurite glass; (b) silica glass

3.4 耦合损耗

对长度为 $441.3 \mu\text{m}$ 的碲酸盐玻璃双芯 PCF 偏振分束器和长度为 $140 \mu\text{m}$ 的石英玻璃双芯 PCF 偏

振分束器的耦合损耗进行了对比,如图 6 所示,可以看出碲酸盐双芯 PCF 偏振分束器有更低的耦合损耗,在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时,耦合损耗仅为

0.0009 dB,而石英玻璃双芯 PCF 偏振分束器的耦合损耗为 0.012 dB。这说明本文设计的碲酸盐玻璃偏振分束器具有极低的耦合损耗,非常有利于光波的传输,大部分的入射能量耦合进入了输出端,具有良好的应用价值。

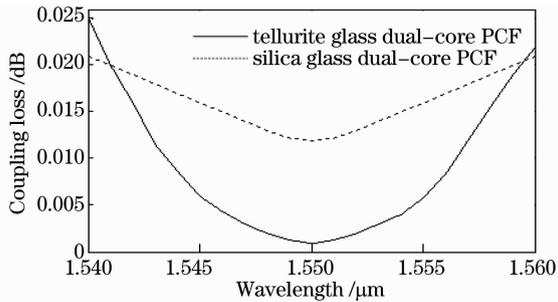


图 6 两种不同基底材料和长度的偏振分束器耦合损耗随波长的变化

Fig. 6 Coupling losses of two kinds of polarization splitters with different base materials and lengths varying with wavelength

4 结 论

提出了一种新型的基于碲酸盐玻璃的双芯 PCF 偏振分束器,利用全矢量有限元法和模式耦合基本理论以及全矢量光束传播法对此偏振分束器的特性进行了研究。与相同结构参数的石英玻璃双芯 PCF 偏振分束器相比,碲酸盐玻璃双芯 PCF 偏振分束器具有更高的消光比和极低的耦合损耗。在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 光纤长度为 $441 \mu\text{m}$ 时,纤芯 A 和 B 的消光比分别达到 -50.1 dB 和 -53.6 dB , 消光比小于 -20 dB 的带宽分别为 34 nm 和 36 nm , 耦合损耗仅为 0.0009 dB 。该偏振分束器具有较高的应用价值。

参 考 文 献

- 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
- 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
- Mohamed Farhat O. Hameed, Salah S. A. Obayya. Modal analysis of a novel soft glass photonic crystal fiber with liquid crystal core [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2012, **30**(1): 96~102
- Cheng Tonglei, Chai Lu, Li Yanfeng *et al.*. Novel cluster-solid-core photonic crystal fiber with high nonlinearity and large effective mode-field area [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 658~662

- 程同蕾, 柴路, 栗岩峰等. 具有高非线性和大有效模场面积的多固体芯集束型光子晶体光纤 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 658~662
- 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
- Li Rongmin, Cao Ye, Tong Zhengrong. Short length polarization splitter 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
- Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng, Fan Linyong *et al.*. Comb-filter based on twin-core fiber coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505001
江微微, 赵瑞峰, 范林勇等. 基于双芯光纤耦合器的梳状滤波器 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0505001
- Shuqin Lou, Zunwei Tang, Liwen Wang. Design and optimization of broadband and polarization-insensitive dual-core photonic crystal fiber coupler [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(14): 2016~2023
- 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**(9-12): 1231~1233
- 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
- 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
- Shanshan Zhang, Weigang Zhang, Pengcheng Geng *et al.*. Design of single-polarization wavelength splitter based on photonic crystal fiber [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(36): 6576~6582
- M. F. O. Hameed, S. S. A. Obayya. Coupling characteristics of dual liquid crystal core soft glass photonic crystal fiber [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2011, **47**(10): 1283~1289
- Wang Xiaoyan, Li Shuguang, Liu Shuo *et al.*. Midinfrared As_2S_3 chalcogenide glass broadband normal dispersion photonic crystal fiber with high birefringence and high nonlinearity [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(6): 064213
王晓琰, 李曙光, 刘硕等. 中红外高双折射高非线性宽带正常色散 As_2S_3 光子晶体光纤 [J]. *物理学报*, 2011, **60**(6): 064213
- I. Savellii, J. C. Jules, G. Gadret *et al.*. Suspended core tellurite glass optical fibers for infrared supercontinuum generation [J]. *Optical Materials*, 2011, **33**(11): 1661~1666
- Shuo Liu, Shuguang Li, Guobing Yin *et al.*. A novel polarization splitter in ZnTe tellurite glass three-core photonic crystal fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(6): 1097~1102
- Shuo Liu, Shuguang Li, Ying Du. Analysis of the characteristics of the polarization splitter based on tellurite glass dual-core photonic crystal fiber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**(6): 1813~1817
- V. V. R. K. Kumar, A. K. George, J. C. Knight *et al.*. Tellurite photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(20): 2641~2645

栏目编辑: 王晓琰