

高双折射双芯光子晶体光纤特性

李丹^{1,2} 刘敏¹ 简多¹ 廖洲一¹ 何丁丁¹

¹重庆大学通信工程学院, 重庆 400044
²重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044

摘要 提出一种新型的高双折射双芯光子晶体光纤(PCF)模型,通过将最内层 8 个空气孔替换为 4 个椭圆空气孔来增大光纤的结构不对称性;通过改变两纤芯间的空气孔大小、椭圆空气孔的椭圆度以及孔间距来分析光子晶体光纤的双折射度、耦合长度以及色散特性。结果表明,双芯光子晶体光纤的模式双折射度达到 10^{-2} 量级,耦合长度达 0.1367 mm,在 1.0~1.6 μm 波长范围内具有超平坦色散特性。

关键词 光纤光学;双芯光子晶体光纤;双折射;耦合长度;色散;全矢量有限元法

中图分类号 O436; TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0405005

Characteristics of Highly Birefringent Dual-Core Photonic Crystal Fibers

Li Dan^{1,2} Liu Min¹ Jian Duo¹ Liao Zhouyi¹ He Dingding¹

¹College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China
²Key Laboratory for Optoelectronic Technology & System of Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract A kind of dual-core highly birefringent photonic crystal fibers (PCF) is proposed. The model introduces the asymmetrical structure through replacing the innermost eight air holes with four elliptic air holes. The mode birefringence, coupling length and dispersion characteristics are studied by changing the hole size between the two cores, ellipticity of elliptic air holes and hole pitch. The results show that the mode birefringence is up to 10^{-2} , the coupling length is as short as 0.1367 mm, and the dispersion is very flat from 1.0 μm to 1.6 μm .

Key words fiber optics; dual-core photonic crystal fiber; birefringence; coupling length; dispersion; full vector finite element method

OCIS codes 060.2270; 060.2280; 060.2330; 060.2400; 060.5295

1 引言

光子晶体光纤(PCF)又称微结构光纤,自 1996 年问世以来^[1],由于其无尽单模传输、可控的非线性、灵活的色散、大模场面积及高双折射^[2~8]等特性,受到人们的广泛关注。近年来,双芯光纤成为研究热点,其耦合^[9,10]、非线性^[11]、高双折射^[12]、色散^[13]等特性已被广泛研究,其中高双折射和耦合特性是双芯光纤非常重要的特性,在很多光学器件中有很重要的应用,如:偏振分束器、耦合器、波分复用器等^[14~19],但很少有研究将双芯耦合、高双折射以

及色散结合起来。

本文设计了一种结构简单的双芯光子晶体光纤,可以实现高双折射度、短耦合长度以及超平坦色散等特性;同时给出应用该双芯光纤制作的偏振分束器的长度以及消光比的大小,对于集成光学中微型光子器件的研制具有重要意义。

2 光纤设计

设计的双芯光子晶体光纤的截面几何结构如图 1 所示。纤芯是由中心抽取两个空气孔形成,中

收稿日期: 2011-11-10; 收到修改稿日期: 2011-12-13

基金项目: 国家自然科学基金(61007049)资助课题。

作者简介: 李丹(1987—),女,硕士研究生,主要从事光子晶体光纤及光栅等方面的研究。E-mail: hyzld778@163.com

导师简介: 刘敏(1975—),女,副教授,硕士生导师,主要从事光纤通信以及光纤光栅等方面的研究。

E-mail: liumin@cqu.edu.cn

间由一个直径为 d_1 的空气孔隔离。包层为具有六重对称性的三角形晶格结构,其中,在最内层上引入椭圆空气孔来破坏结构的对称性,并减少空气孔的数量,将 8 个圆形空气孔改为 4 个椭圆形空气孔,椭圆度为 $\eta = a/b$, a 为短轴长度, b 为长轴长度,其余包层空气孔直径为 d , 孔间距设为 Λ 。数值分析过程中,包层空气孔折射率设为 1,背景材料折射率设为 1.444。

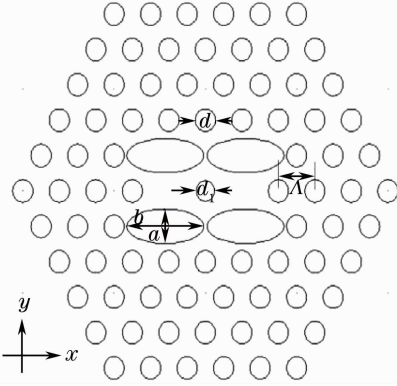


图 1 双芯光子晶体光纤截面几何结构图

Fig. 1 Cross section of the dual-core PCF

双芯光子晶体光纤的模场可以看作对应 x 偏振和 y 偏振的对称模(偶模)与反对称模(奇模)的叠加。通过改变光子晶体光纤的几何结构,来改变双芯光纤奇模和偶模的有效折射率,从而得到不同的双折射度、耦合长度以及色散特性。模式双折射是衡量保偏光纤性能的重要参数,双折射越大,保偏性能越好。基模的模式双折射度可以表示为^[20]

$$B = | \text{Re}(n_{\text{eff}}^y - n_{\text{eff}}^x) |, \quad (1)$$

式中 n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别表示 x 和 y 偏振方向上基模的有效折射率, Re 表示有效折射率的实部。

能量从一个纤芯完全转移到另一个纤芯时在光

纤中所传播的距离定义为耦合长度^[20]

$$L_c = \frac{\pi}{|\beta_c - \beta_o|} = \frac{\lambda}{2 |n_c^i - n_o^i|}, \quad (i = x, y) \quad (2)$$

式中 λ 是光的波长, β_c, β_o 和 n_c^i, n_o^i 分别对应于各个偏振方向上的偶模和奇模的传播常数和有效折射率。利用有限元法可以得到光纤的有效折射率,从而依据(2)式可以计算出耦合长度。耦合长度是衡量耦合效应的重要参数,耦合效应越弱,耦合长度越长;耦合效应越强,耦合长度越短。

色散是衡量光纤特性的一个十分重要的参数,尤其是在高速长距离光纤通信系统中,色散是一个不得不考虑的因素。光纤色散分为材料色散和波导色散,在这里忽略材料色散,主要考虑波导色散^[21]。波导色散可表示为

$$D_w = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} [\text{Re}(n_{\text{eff}})], \quad (3)$$

式中 c 为真空中的光速。

3 数值结果与分析

3.1 双折射

图 2(a) 为 $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$, $d = 1.1 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$ 保持不变, η 由 0.38 增加到 0.42 时,双折射度随传输波长变化的曲线图。可以看出,对于特定的 η ,随着传输波长的增大,双折射度增大,并且奇模与偶模的差异逐渐变大。这主要是因为随着传输波长的增大,模场向外扩展,与内层气孔的作用增强,双折射度增大,而奇模与偶模的渗透速度不同,导致双折射度差异变大。在特定波长处,双折射度随椭圆度的增加而增大。这主要是因为椭圆度 η 增大,使得光场受内层气孔不对称性的影响增大,从而双折射度增大。

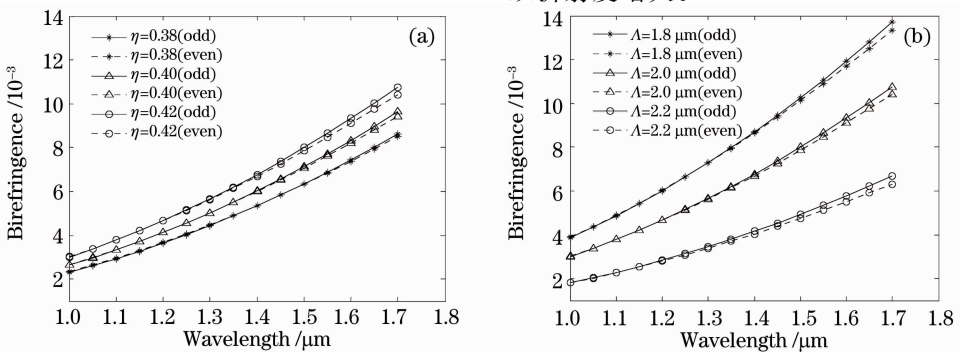


图 2 双折射度 B 随 η 和 Λ 的变化。(a) $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$ 时, η 从 0.38 变化到 0.42; (b) $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$, $\eta = 0.42$ 时, Λ 从 $1.8 \mu\text{m}$ 变化到 $2.2 \mu\text{m}$

Fig. 2 Birefringence variation with η and Λ . (a) $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$, η variation from 0.38 to 0.42; (b) $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$, $\eta = 0.42$. Λ variation from $1.8 \mu\text{m}$ to $2.2 \mu\text{m}$

图 2(b)为 $d_1=1.0 \mu\text{m}$, $d=1.1 \mu\text{m}$, $\eta=0.42$ 保持不变, Λ 由 $1.8 \mu\text{m}$ 增加到 $2.2 \mu\text{m}$ 时, 双折射度随传输波长的变化图。可以看出, 随着 Λ 的增大双折射度明显减小, 如在 $1.55 \mu\text{m}$ 处, $\Lambda=1.8 \mu\text{m}$ 和 $\Lambda=2.2 \mu\text{m}$ 时, 双折射度分别为 1.09×10^{-2} 和 5.35×10^{-3} 。这主要是因为 Λ 增大, 使得纤芯面积变大, 模场与内层气孔的作用减弱, 双折射度减小。

综上所述, 对于确定的波长, 孔间距减小, 椭圆度增大, 有助于增大光子晶体光纤的双折射度。

3.2 耦合长度

图 3(a)为 $\eta=0.4$, $\Lambda=2.0 \mu\text{m}$, $d=1.1 \mu\text{m}$ 时, d_1 从 $1.0 \mu\text{m}$ 变化到 $1.2 \mu\text{m}$ 时, 各偏振方向上耦合长度的变化情况。从图中可以看出, 随着传输波长的增大, 耦合长度减小。这是因为在短波长处, 光纤中的模场能量能很好地束缚在纤芯内; 而在长波长

段, 模场开始扩散到包层中, 使得双芯间的耦合效应增强, 耦合长度减小。 y 偏振方向的耦合长度在短波长处大于 x 偏振方向, 但在长波长处差异不大。在特定波长处, 随着 d_1 的增加, 耦合效应减弱, 耦合长度逐渐增大, 这主要是因为随着 d_1 的增大, 纤芯模场面积减小, 能量从一个纤芯传输到另一个纤芯更加困难, 纤芯间耦合效应变弱, 耦合长度增大。在 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 当 $d_1=1.0 \mu\text{m}$ 和 $d_1=1.2 \mu\text{m}$ 时, 耦合长度分别为 $450 \mu\text{m}$ 和 $965 \mu\text{m}$, 耦合长度显著增加。因而可以通过减小两纤芯间的空气孔直径来减小耦合长度。此外, 从图中还可以看出, d_1 越大, 耦合长度对偏振方向的敏感性越强, 谐振波长(两偏振方向耦合长度相等的波长)向长波长方向移动, 当 $d_1=1.0 \mu\text{m}$ 时, 谐振波长为 $1.25 \mu\text{m}$, 但 $d_1=1.2 \mu\text{m}$ 时, 谐振波长为 $1.45 \mu\text{m}$ 。

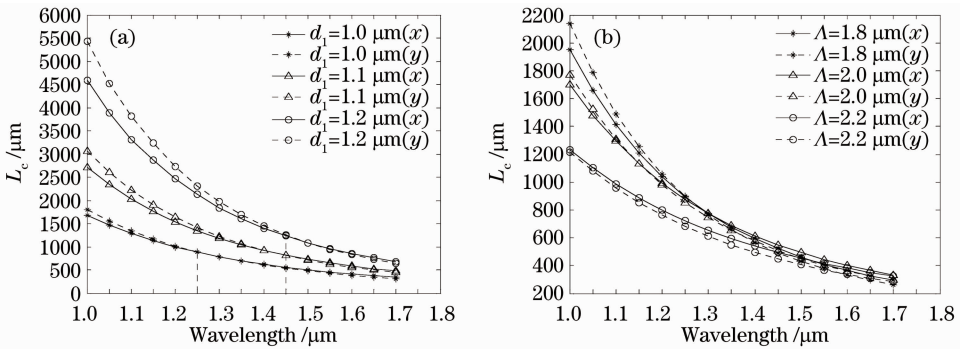


图 3 L_c 随 d_1 和 Λ 的变化。(a) $\Lambda=2.0 \mu\text{m}$, $\eta=0.42$ 时, d_1 从 $1.0 \mu\text{m}$ 变化到 $1.2 \mu\text{m}$; (b) $d_1=1.0 \mu\text{m}$, $\eta=0.42$ 时, Λ 从 $1.8 \mu\text{m}$ 变化到 $2.2 \mu\text{m}$

Fig. 3 Coupling length L_c variation with d_1 and Λ . (a) $\Lambda=2.0 \mu\text{m}$, $\eta=0.42$, d_1 variation from $1.0 \mu\text{m}$ to $1.2 \mu\text{m}$; (b) $d_1=1.0 \mu\text{m}$, $\eta=0.42$, Λ variation from $1.8 \mu\text{m}$ to $2.2 \mu\text{m}$

图 3(b)为 $d_1=1.0 \mu\text{m}$, $\eta=0.42$, $d=1.1 \mu\text{m}$ 时, 耦合长度随 Λ 变化的情况。可以看出 Λ 从 $1.8 \mu\text{m}$ 增加到 $2.2 \mu\text{m}$ 时, 耦合效应增强, 耦合长度减小。这是因为孔间距增大时, 包层空气填充率减小, 对光的束缚能力减弱, 光从一个纤芯耦合到另外一个纤芯更加容易, 因而导致耦合长度减小。在波长 $1.00 \sim 1.55 \mu\text{m}$ 范围内, 不同孔间距对应的耦合长度差异较大, 但在 $1.55 \sim 1.70 \mu\text{m}$ 范围内, 耦合长度差异较小。由此可看出, 随着波长的增加, 引入椭圆不对称结构, 孔间距对耦合长度的影响减小。因此在特定波长处, 减小两纤芯间空气孔直径, 增大空气孔间距, 可以减小耦合长度。

利用双芯高双折射光纤两偏振方向上耦合长度的不同可以制作偏振分束器和与偏振方向无关的光纤耦合器。光纤长度满足 $L = mL_c(x) = nL_c(y)$, 其中 m 和 n 是正整数。如果 m 和 n 奇偶性相同, 就可以制

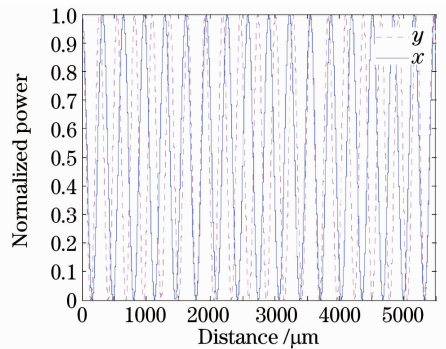


图 4 双芯光子晶体光纤归一化功率谱
Fig. 4 Normalized power of dual-core PCF

成与偏振方向无关的光纤耦合器; 如果 m 和 n 奇偶性相反, 就可以制成偏振分束器。图 4 给出了 $\Lambda=2.0 \mu\text{m}$, $d_1=0.7 \mu\text{m}$, $d=1.1 \mu\text{m}$, $\eta=0.40$ 时, 该双芯光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 处的功率随传输距离的谱线图。可以算出两个偏振方向上的耦合长度分别为: $L_c(x) =$

161.29 μm , $L_c(y) = 136.68 \mu\text{m}$ 。从图 4 可以看出:当 $L = 17L_c(x) = 20L_c(y) = 2741.93 \mu\text{m}$ ($m = 17, n = 20$) 时,可以实现两偏振光的分离;当 $L = 34L_c(x) = 40L_c(y) = 5483.86 \mu\text{m}$ ($m = 34, n = 40$) 时,两偏振光又实现耦合。

消光比是衡量偏振分束器性能的重要指标,图 5 是在光纤长度为 2741.93 μm 时,1.52 ~ 1.58 μm 波长范围内的消光比。在 1.55 μm 波长处,消光比达到 27 dB,比文献[14,17]消光比大,光纤长度短。

3.3 色散特性

从图 6(a)可以看出,在 $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$ 时,固定波长处,随着椭圆度 η 的增大,在 1.0 ~ 1.4 μm 范围内,色散幅度呈上升趋势,并且幅度变化不很明显;但在 1.40 ~ 1.70 μm 范围内,色散幅度变化趋势相反。这说明随着椭圆度的增大,色散变化变快;同时, y 方向上的色散要大于 x 方向上的色散,主要是因为模场 y 方向扩散

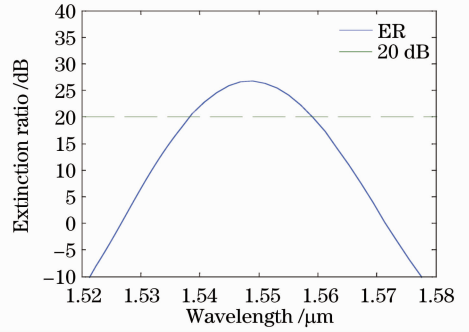


图 5 偏振分束器的消光比

Fig. 5 Extinction ratio of the polarized splitter 的速度要大于 x 方向扩散的速度,产生畸变要大。由图 6(b)可以看出,在椭圆度 $\eta = 0.42$, 中心小孔 $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$ 时,随着空气孔间距 Λ 的增大,色散幅值减小,但色散的斜率变化不大,并且在 1.0 ~ 1.6 μm 范围内,色散呈现超平坦的变化趋势。综上所述,改变孔间距的大小以及椭圆的椭圆度,有助于获得较低的平坦色散。

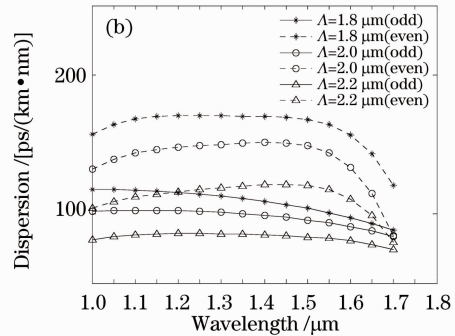
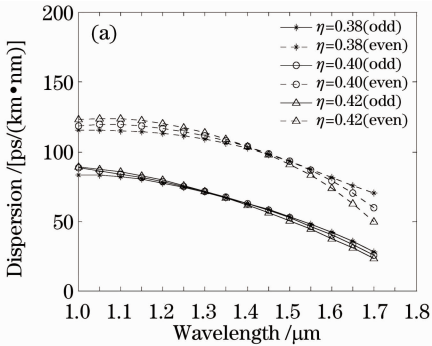


图 6 色散随椭圆度 η 和孔间距 Λ 的变化。(a) $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$ 时, η 从 0.38 变化到 0.42; (b) $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$, $\eta = 0.42$ 。 Λ 从 1.8 μm 变化到 2.2 μm

Fig. 6 Dispersion variation with d_1 and hole pitch Λ . (a) $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$, η variation from 0.38 to 0.42; (b) $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$, $\eta = 0.42$. Λ variation from 1.8 μm to 2.2 μm

图 7 是放大参数为 $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$, $\eta = 0.4$ 以及 $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$, $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$, $\eta = 0.4$ 的光纤在

波长范围为 1.0 ~ 1.6 μm 范围内的色散变化图。可以看出,光纤色散值在 137 ~ 152 $\text{ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 和

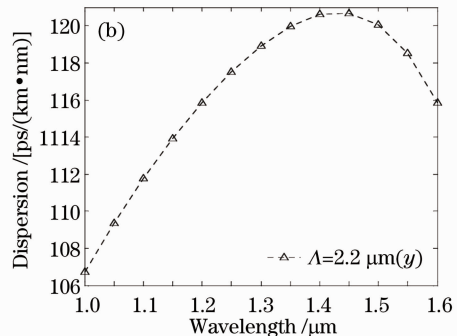
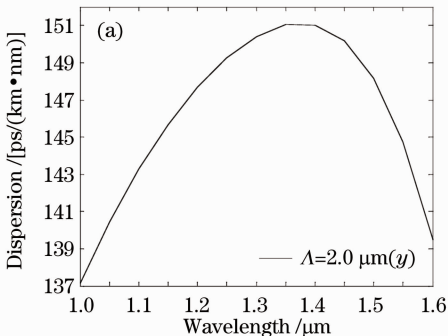


图 7 色散变化情况。(a) $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$, $\eta = 0.4$; (b) $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$, $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$, $\eta = 0.4$

Fig. 7 Dispersion variation. (a) $\Lambda = 2.0 \mu\text{m}$, $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$, $\eta = 0.4$; (b) $\Lambda = 2.2 \mu\text{m}$, $d_1 = 1.0 \mu\text{m}$, $\eta = 0.4$

106~120 ps/(km·nm)范围内,也就是色散值的变化范围为14 ps/(km·nm),而文献[21]的色散变化范围为50 ps/(km·nm),因此色散平坦度比文献[21]大。

最后从双折射度、耦合长度以及色散特性三个方面,将本文的设计结果与其他参考文献进行比较,见表1。可以看出,在 $\Lambda=2.0\ \mu\text{m}$, $d=1.1\ \mu\text{m}$, $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$ 时,本文的双折射度比文献[20,21]大近1个数量级;耦合长度比文献[20,21]短很多,色散平坦度以及色散平坦范围比文献[21]大。

表1 1.55 μm 处不同文献双折射度、耦合长度以及色散的对比

Table 1 Birefringence, coupling length and dispersion for different papers at 1.55 μm

Type	Birefringence / 10^{-3}	Coupling length /mm	Dispersion
Ref. [20]	1.157	0.721	—
Ref. [21]	0.96	2.903	1.260~ 1.675 μm relatively flat
Our results	8.8468	0.444	1.0~1.60 μm flat

4 结 论

设计了一种双芯光子晶体光纤,可以获得高双折射、短耦合长度并且在1.0~1.6 μm 波长范围内具有超平坦的色散特性。当椭圆度较大、孔间距较小时,可以使该PCF的模式双折射达到 10^{-2} 量级,比普通光纤高出1~2个数量级;当中心小孔直径 d_1 减小、孔间距增大时,可以减小该PCF的耦合长度;选择合适的孔间距,可以在1.0~1.6 μm 范围内获得超平坦色散特性;在短波长处,双折射度差异较小,但是耦合长度差异较大,在长波长处,双折射度差异较大,但是耦合长度差异较小。综合以上特性,选择合适的光纤结构参数,可以获得高双折射、较短耦合长度以及低平坦色散的双芯光子晶体光纤。本文选用合适的参数,设计出了光纤长度为2741.93 μm 、消光比达27 dB的偏振分束器,以及光纤长度为5483.86 μm 的与偏振方向无关的光纤耦合器。

参 考 文 献

- J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- Kunimasa Saitoh, Masanori Koshiba. Numerical modeling of photonic crystal fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(11): 2580~2590
- Wang Wei, Hou Lantian, Lu Ming *et al.*. Design of double cladding nearly zero dispersion flattened nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(11): 114205

- Li Yuhe, Fan Wande, Sheng Qiuqin. Dispersion properties of dual-core photonic crystal fiber with quasi-lattice[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0205005
- 李羽赫, 范万德, 盛秋琴. 双芯准晶格光子晶体光纤的色散特性[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0205005
- 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
- T. Matsui, J. Zhou, K. Nakajima *et al.*. Dispersion-flattened photonic crystal fiber with large effective area and low confinement loss[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(12): 4178~4183
- Lin Jianqiang, Shi Zhidong, He Wei *et al.*. A highly birefringent holey fiber with round lattice [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(12): 120601
- 林建强, 石志东, 何伟等. 圆形晶格高双折射多孔光纤[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(12): 120601
- J. Ju, W. Jin, M. S. Demokan. Properties of a highly birefringent photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(10): 1375~1377
- S. K. Varshney, N. J. Florous, K. Saitoh *et al.*. The impact of elliptical deformations for optimizing the performance of dual-core fluorine-doped photonic crystal fiber couplers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(5): 1982~1995
- X. Yu, M. Liu, Y. Chung *et al.*. Coupling coefficient of two-core microstructured optical fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **260**(1): 164~169
- I. D. Chremmos, G. Kakarantzas, N. K. Uzunoglu. Modeling of a highly nonlinear chalcogenide dual-core photonic crystal fiber coupler[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **251**: 339~345
- D. Chen, M. L. V. Tse, C. Wu *et al.*. Highly birefringent four-hole fiber for pressure sensing [J]. *Prog. Electromagn. Res.*, 2011, **114**: 145~158
- P. D. Bin, N. Mothe. Numerical analysis of directional coupling in dual-core microstructured optical fibers[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(18): 15778~15789
- 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
- Lin Ganbin, Zou Yi, Dong Xiaopeng. Gain flattening filter with twin-core fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1532~1536
- 林淦斌, 邹毅, 董小鹏. 采用双芯光纤的增益平坦滤波器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1532~1536
- A. Betlej, S. Suntuov, K. G. Makris *et al.*. All-optical switching and multifrequency generation in a dual-core photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(10): 1480~1482
- 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
- K. Saitoh, Y. Sato, M. Koshiba. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber couplers [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(24): 3188~3195
- M. Liu, K. S. Chiang. Propagation of ultrashort pulses in a nonlinear two-core photonic crystal fiber[J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **98**(4): 815~820
- Bo Fu, Shuguang Li, Yanyan Yao *et al.*. Design of two kinds of dual-core high birefringence and high coupling degree photonic crystal fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(20): 4064~4068
- Fu Bo, Li Shuguang, Yao Yanyan *et al.*. Study on coupling characteristics of highly birefringent dual-core 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