

文章编号:1004-4213(2011)11-1728-5

基于椭圆孔包层和微型双孔纤芯的新型高双折射光子晶体光纤

刘旭安^{1,2}, 吴根柱^{1,2}, 陈达如^{1,2}, 刘军^{1,2}, 卢启景^{1,2}

(1 浙江师范大学 信息光学研究所, 浙江 金华 321000)

(2 浙江师范大学和浙江大学联合实验室, 杭州 310058)

摘要:设计了一种新型高双折射光子晶体光纤, 即其包层引入椭圆形空气孔, 且以三角晶格方式周期排列, 纤芯引入亚波长尺寸($\sim 0.16 \mu\text{m}$)的微型双孔结构阵列. 采用全矢量有限元法和各向异性完美匹配层边界条件分析了该型光子晶体光纤的双折射特性和色散特性, 详细介绍了该光子晶体光纤在不同的椭圆率、椭圆归一化面积、微型双孔孔径、两小孔之间间距的情况下双折射和限制损耗随波长的变化曲线. 模拟结果表明, 通过同时在包层和纤芯引入非对称性, 获得了较高的双折射($\sim 10^{-3}$ 量级)和极低($\sim 10^{-4}$ dB/km)的限制损耗. 提供了一种新的光子晶体光纤设计方法, 即通过同时在包层和纤芯引入新结构来同时获得高双折射和低损耗.

关键词:光子晶体光纤; 椭圆空气孔; 双折射; 限制损耗

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114011.1728

0 引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF), 又被称为微结构光纤(Microstructured Optical Fiber, MOF)或多孔光纤(Holey Fiber, HF). 近年来, 由于其独特的性质, 成为了人们研究的一个热点^[1-9]. 折射率导模型光子晶体光纤(Index Guiding PCF, IG-PCF)是将光子晶体及缺陷结构引入光纤中而形成的二元光子晶体结构, 其结构为石英光纤中轴向均匀, 截面为周期性排列的空气孔. 由于在纤芯处去掉一个空气孔而形成纤芯, 使得包层有效折射率小于纤芯材料的折射率, 光就可以在纤芯中传播. 其传输特性完全取决于截面空气孔的大小和分布情况, 可以根据需要进行灵活的设计, 因此可以直接通过调整其包层和纤芯结构, 设计出在高双折射^[2-8]、低色散^[9-11]、单偏振单模^[12-14]、非线性^[15]及大有效模面积^[16-18]等特性的 IG-PCF, 这些 PCF 可广泛应用于光纤传感、光纤激光器、光纤光学非线性等领域. 目前为止, 已有不少文献^[2-9]给出能实现高双折射的 IG-PCF 设计方法. 其中, 有的是通过在包层引入非对称性以达到高双折射^[5,7], 有的是通过在纤芯引入两个或三个缺陷来实现非对称性达到高双折射^[8-9], 但这些结构的共同特点是在实现高双折射

的同时, 有大量的模能量进入到包层中, 其限制损耗比较大. 为解决这一问题, 在 PCF 纤芯引入尺寸为亚波长的微型双孔结构阵列^[3-4,6]来同时达到高双折射和低损耗, 但包层引入的是圆形空气孔, 没有引入非对称性. 这里我们设计出一种新的高双折射低损耗光子晶体光纤, 首次在纤芯引入仅两层亚波长的微型双孔结构阵列, 同时包层采用椭圆形空气孔结构. 通过全矢量有限元法分析表明, 该结构 PCF 在实现高双折射($\sim 10^{-3}$ 量级)同时, 具有极低($\sim 10^{-4}$ dB/km 量级)的限制损耗. 本文提供了一种在纤芯和包层两者同时引入非对称性结构以实现高双折射的思路.

1 微型双孔纤芯结构光子晶体光纤

本文提出的一种新型光子晶体光纤, 其截面结构如图 1. 该光纤包层仍然采用目前 PCF 中常见的三角格子结构排列的椭圆型空气孔柱. 椭圆的椭圆率 $\eta = b/a$, 椭圆归一化面积 $A = \pi ab/\Lambda^2$, 其中 a, b 分别为椭圆空气孔长半轴和短半轴的轴长, Λ 为椭圆空气孔之间的间距(两空气孔中心之间的距离). 而在纤芯, 引入亚波长尺寸的微型双孔结构阵列, 以充当各向异性介质或色散介质. 双孔型空气孔半径为 D , 两小孔沿着 y 轴方向排列, 两小孔圆心与圆心

基金项目: 浙江省自然科学基金(No. Y1100041)资助

第一作者: 刘旭安(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光子晶体光纤、光纤传感. Email: liuxan_5036@163.com

导师(通讯作者): 吴根柱(1967-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光纤传感、半导体激光器理论与技术. Email: wugenzhu@zjnu.cn

收稿日期: 2011-05-23; 修回日期: 2011-08-16

之间的距离为 H , 两小孔为一组形成最基本的双孔单元. 以这种基本的单元为基础在纤芯处以传统的三角格子结构方式排列两层, 其中单元与单元之间的距离为 Λ' (即两单元重心之间的距离).

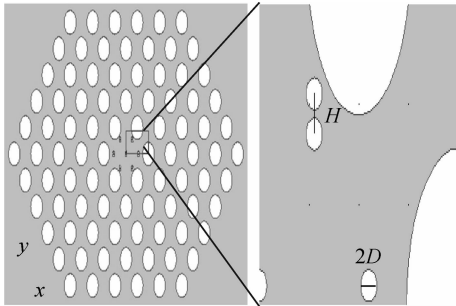


图 1 新型高双折射光子晶体光纤横截面示意图
Fig. 1 Cross section of the proposed IG-PCF with a fiber core of arrays of subwavelength circular air hole pairs

对于图 1 所示结构的光子晶体光纤, 设其结构参量分别为: $A = 0.32$, $\eta = 1.5$, $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $D = 0.08 \mu\text{m}$, $H = 0.2 \mu\text{m}$, $\Lambda' = 1.1 \mu\text{m}$, 这里取 SiO_2 和自由空间的折射率分别为 1.45 和 1, λ 为自由空间的工作波长. 提出的新型光子晶体光纤的模双折射率定义为^[4]

$$\Delta n = n_{\text{eff}}^y - n_{\text{eff}}^x \quad (1)$$

式中, n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别表示 x 方向和 y 方向的两个线偏振方向的模折射率 (有效折射率). 而基模的限制损耗定义为^[4]

$$L = 8.686 \times \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (2)$$

式中 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为复数 n_{eff} 的虚部. 我们采用全矢量有限元法^[19-20] (Full-Vector Finite-Element Method, FEM) 来计算光传播模式, 吸收边界条件为各向异性完美匹配层^[7] (Anisotropic Perfectly Matched Layers, PML).

图 2 给出了微型双孔纤芯光子晶体光纤 x 偏振方向和 y 偏振方向基模的有效折射率随着波长变化时的分布情况. 其结构参量为: $A = 0.32$, $\eta = 1.5$, $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $D = 0.08 \mu\text{m}$, $H = 0.2 \mu\text{m}$, $\Lambda' = 1.1 \mu\text{m}$, λ 的变化范围为 $0.75 \sim 2.1 \mu\text{m}$. 两条曲线的差值表示该结构 PCF 在波长范围为 $0.75 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 的双折射率 Δn . 结果显示该型 PCF 在工作波长范围内具有比较高的双折射. 且在相同工作波长情况下, 给出的 PCF 的有效折射率与传统的纯硅纤芯光纤 (在 $1.50 \mu\text{m}$ 附近为 1.42) 相比要低一些, 这是由于在纤芯引入了亚波长尺寸的双孔型空气孔微结构阵列的结果.

图 3 给出了微型双孔纤芯光子晶体光纤 x 偏振方向和 y 偏振方向基模的色散随着波长 λ 变化时的分布情况. 其结构参量为: $A = 0.32$, $\eta = 1.5$, $\Lambda =$

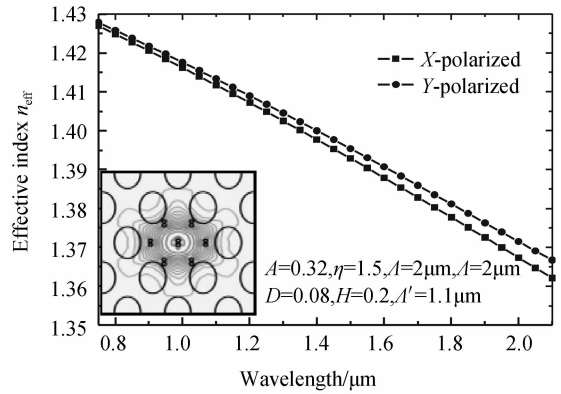


图 2 新型光子晶体光纤 x 偏振方向和 y 偏振方向的有效折射率随波长变化分布图

Fig. 2 Effective index of the x -polarized and y -polarized fundamental modes as a function of wavelength for the proposed IG-PCF. The inset shows the major electric field component of the x -polarized fundamental mode at $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$

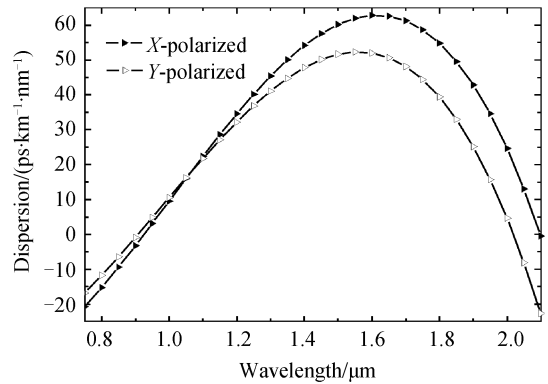


图 3 新型高双折射光子晶体光纤在 x 偏振方向 (实心三角形) 和 y 偏振方向 (空心三角形) 的色散分布图

Fig. 3 Dispersion of the x -polarized (solid triangle) and the y -polarized (hollow triangle) fundamental modes of the proposed IG-PCF

$2 \mu\text{m}$, $D = 0.08 \mu\text{m}$, $H = 0.2 \mu\text{m}$, $\Lambda' = 1.1 \mu\text{m}$, λ 的变化范围为 $0.75 \sim 2.1 \mu\text{m}$. 这里纯硅的折射率由三项 Sellmeier 公式确定, 其公式为

$$n^2 - 1 = \frac{0.6961663\lambda^3}{\lambda^2 - (0.0684043)^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - (0.1162414)^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - (9.896161)^2} \quad (3)$$

该结构光子晶体光纤的总色散 D_{sum} (包括材料色散和波导色散) 由下式决定

$$D_{\text{sum}} = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial \lambda^2} \quad (4)$$

这里 c 为光在自由空间的速度.

图 4 给出了微型双孔纤芯光子晶体光纤在各种结构参量条件下, 在波长 λ 范围为 $1.2 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 时的双折射率 Δn 分布情况. 该图中图形为实心方块的曲线结构参量为 $A = 0.32$, $\eta = 1.5$, $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $D = 0.08 \mu\text{m}$, $H = 0.2 \mu\text{m}$, $\Lambda' = 1.1 \mu\text{m}$, 而其它图形形状的曲线则分别是在参量 η, A, D, H 逐一变化时的

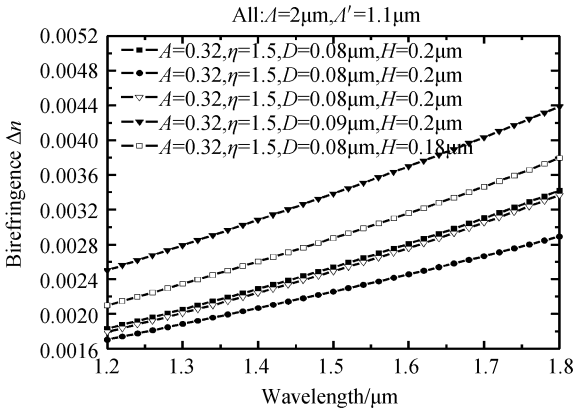


图4 新型光子晶体光纤在各种结构参量条件下随波长变化时的双折射分布图

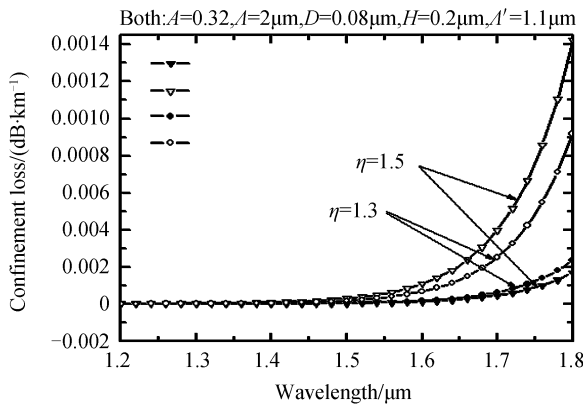
Fig. 4 Birefringence of the proposed IG-PCF as a function of the wavelength in the case of different structure parameters

曲线. 从图中可以看出: 图4中随 η 变化的两曲线表明该结构PCF随着椭圆率 η 的增大而增大, 随着波长的增大, 其增大幅度也提高. 这是因为当椭圆率 η 增大时, 其非对称性增大, 从而导致双折射增大. 随 D 变化的两条曲线表明该结构PCF随着椭圆归一化面积的变化而变化不大. 随变化的两条曲线表明该结构PCF受纤芯双孔的尺寸大小影响比较大, 且随着双孔半径的增大而显著增大, 这是因为

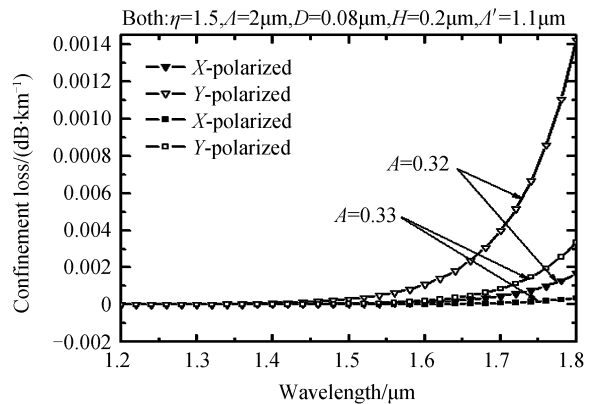
由于有纤芯的微结构光主要分布在纤芯处, 故其纤芯结构对光分布影响很大. 随 H 变化的两条曲线表明该结构PCF随着双孔之间的距离减小而增大. 结果表明了在设计高双折射PCF时, 各参量对双折射的影响, 这为今后合理设计出更高的双折射提供了依据.

2 微型双孔纤芯光子晶体光纤的限制损耗特性分析

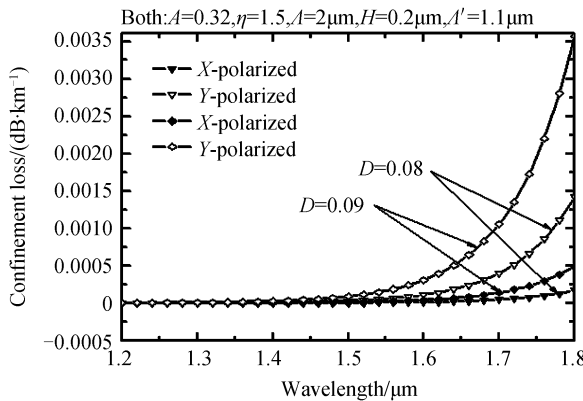
图5给出了新型光子晶体光纤在各种结构参量条件下, 在波长 λ 范围为 $1.2\ \mu\text{m} \sim 1.8\ \mu\text{m}$ 时, x 偏振方向和 y 偏振方向的限制损耗分布情况(x 偏振方向曲线为实心图形, y 偏振方向曲线为空心图形). 每张图图形为三角形的两条曲线都是参量为 $A=0.32$, $\eta=1.5$, $A=2\ \mu\text{m}$, $D=0.08\ \mu\text{m}$, $H=0.2\ \mu\text{m}$, $A'=1.1\ \mu\text{m}$, 而另外两条曲线则分别是在参量 η (图5(a)), A (图5(b)), D (图5(c)), H (图5(d))逐一变化时的限制损耗分布图. 图5(a)表明该结构PCF在 η 增大, 椭圆归一化面积保持不变时, 由于空气孔的排列致密了很多, 光波能量向包层外的泄漏减少, 但相对而言, 椭圆率增大, x 偏振方向上包层的相对等效折射率增大了, 而 y 偏振方向减



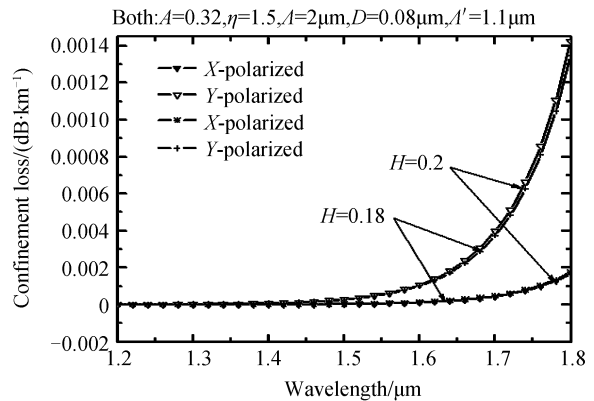
(a) Different structure parameters of η



(b) Different structure parameters of A



(c) Different structure parameters of D



(d) Different structure parameters of H

图5 新型光子晶体光纤在各种结构参量条件下随工作波长变化时 x 偏振方向和 y 偏振方向的损耗分布图

Fig. 5 The confinement loss of the proposed IG-PCF as a function of the wavelength in the case of different structure parameters

小了,使得 x 偏振方向上增大了包层纤芯之间的折射率差,而 y 偏振方向上减小了. 所以随着椭圆率增大, x 偏振方向的限制损耗减小, y 偏振方向限制损耗增大. 图 5(b)表明该结构 PCF 在椭圆归一化面积 A 增大时,其包层的等效折射率减小,这样就增大了包层纤芯之间的折射率差,因此光波能量更加集中在纤芯附近,损耗也就减小. 图 5(c)表明该结构 PCF,当增大时,纤芯的占空比增大,使得纤芯的等效有效折射率减小,其限制损耗也随着增大,而由图 4 可知的增大会大幅度提高该 PCF 的双折射,因此适当的选择好可以平衡双折射和损耗. 图 5(d)表明该结构的 PCF 参量 H 对限制损耗影响不大. 这是因为该双孔结构是放在纤芯处,大部分能量也是在纤芯处, H 的改变不会影响纤芯内这种各向异性介质的特性,所以光不会大量的泄漏到包层中,同时也对限制光损耗的作用影响不大.

3 结论

本文提出了一种具有高双折射极低损耗的微型双孔结构 PCF. 采用全矢量有限元法分析了该种 PCF 的传输特性,讨论了该 PCF 各种结构参量对双折射和限制损耗的影响,这为今后设计出更高双折射和更低限制损耗的 PCF 提供了依据. 分析表明:通过在纤芯引入仅两层的微型双孔结构,就可以使得该 PCF 可以获得高双折射同时大大降低了限制损耗,损耗降到 10^{-4} dB/km 数量级. 但这种光纤由于其结构的复杂性,很难制造出来,但是如果在纤芯处采用尺寸较大的双孔,且减少纤芯微结构的层数,其仍然可以获得同数量级的高双折射,这样制造难的问题就可以解决. 事实上纤芯微结构为单个椭圆空气孔的 PCF 已经成功的制造出来^[21]. 所以我们提出来的这种结构的 PCF 在将来是可以制造出来的.

总之,我们提供了一种新思路. 过去人们要么就是把设计重点放在包层,或将重点放在纤芯,我们通过同时在包层和纤芯引入非对称性. 以达到双折射与损耗的最佳平衡.

参考文献

[1] LI Chun-lei, SHENG Qiu-qing. The relation between the nonlinear coefficient of PCF and its geometry parameters and the optical wavelength[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 734-737.
李春雷,盛秋琴. 光子晶体光纤非线性系数与其结构参量及波长的关系[J]. 光子学报, 2006, **35**(5): 734-737.

[2] HE Zhong-jiao. Highly birefringent photonic crystal fiber based on index-enhanced fiber core [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 302-303.
何忠蛟. 基于纤芯折射率增强的高双折射光子晶体光纤[J]. 光子学报, 2008, **37**(2): 302-303.

[3] CHEN Da-ru, SHEN Lin-fang. Ultrahigh birefringent photonic crystal fiber with ultralow confinement loss[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(4): 2700-2705.

[4] CHEN Da-ru, TSE V M L, TAM H Y. Optical properties of photonic crystal fibers with a fiber core of arrays of sub-wavelength circular air holes; birefringence and dispersion[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2010, **105**(12): 193-212.

[5] HE Zhong-jiao. Highly birefringent photonic crystal fibers based on micro-structured fiber core of elliptical holes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1216-1218.
何忠蛟. 基于椭圆孔微结构纤芯的高双折射光子晶体光纤[J]. 光子学报, 2007, **36**(7): 1216-1218.

[6] HE Zhong-jiao. Highly birefringent photonic crystal fibers based on micro-hole-structured fiber core[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2218-2221.
何忠蛟. 基于小圆孔结构纤芯的高双折射光子晶体光纤[J]. 光子学报, 2008, **37**(11): 2218-2221.

[7] CHEN D, SHEN L. Highly birefringent elliptical-hole photonic crystal fibers with double defect [J]. *J Lightw Technol*, 2007, **25**(9): 2700-2705.

[8] SAPULAK M G, STATKIEWICZ J, OLSZEWSKI T, et al. Experimental and theoretical investigations of birefringent holey fibers with a triple defect[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(13): 2652-2658.

[9] ANTHKOWIAK M, KOTYNSKI R, NASIŁOWSKI T, et al. Phase and group modal birefringence of triple-defect photonic crystal fibres[J]. *J Opt A: Pure Applied Optics*, 2005, **7**(12): 763-766.

[10] SHEN L P, HUANG W P, JIAN S S. Design of photonic crystal fibers for dispersion-related applications [J]. *J Lightwave Technol.*, 2003, **21**(7): 1644-1651.

[11] WU Wei-qing, CHEN Xun-wen, ZHOU Hui, et al. Investigation of the ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers with hybrid cores[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 109-113.
吴维庆,陈雄文,周辉,等. 混合纤芯光子晶体光纤超平坦色散的研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(1): 109-113.

[12] SAITOH K, KOSHIBA M. Single-polarization single-mode photonic crystal fibers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, **15**(10): 1384-1340.

[13] EGUCHI Masashi, TSUJI Yasuhide. Single-mode single-polarization holey fiber using anisotropic fundamental space-filling mode[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(15): 2112-2114.

[14] WANG Li-wen, LOU Shu-qin, CHEN Wei-guo, et al. Design of a single-polarization single-mode photonic crystal fiber with a near-Gaussian mode field and wide bandwidth [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(32): 6196-6200.

[15] KNIGHT J C, SKRYABIN D V. Nonlinear waveguide optics and photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(13): 15365-15376.

[16] FOLKENBERG J, NIELSEN M, MORTENSEN N, et al. Polarization maintaining large mode area photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(5): 956-960.

[17] ROSTAMI Ali, SOOFI Hadi. Correspondence between effective mode area and dispersion variations in defected core photonic crystal fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(2): 234-241.

[18] MATSUI Takashi, SAKAMOTO Taiji, TSUJIKAWA Kyozo, et al. Single-mode photonic crystal fiber design with ultralarge effective area and low bending loss for ultrahigh-speed WDM transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(4): 511-515.

- [19] GUENNEAU S, LASQTMMLCC S. Modeling of photonic crystal optical fibers with finite elements [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2002, **38**(21): 1261-1264.
- [20] SAITOH K, KOSHIBA M. Full-vectorial imaginary-distance beam propagation method based on finite element scheme: Application to photonic crystal fibers[J]. *IEEE J Quantum Electron.*, 2002, **38**(7): 927-933.
- [21] BELARDI W, BOUWMANS G, PROVINO L, *et al.* Form-induced birefringence in elliptical hollow photonic crystal fiber with large mode area[J]. *IEEE J Quantum Electron.*, 2005, **41**(12): 1558-1564.

Novel Highly Birefringent Photonic Crystal Fiber Based on an Elliptical Hole Fiber Cladding and a Fiber Core of Double-micro-hole Units

LIU Xu-an^{1,2}, WU Gen-zhu^{1,2}, CHEN Da-ru^{1,2}, LIU Jun^{1,2}, LU Qi-jing^{1,2}

(1 *Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China*)

(2 *Joint Research Laboratory of Optics of Zhejiang Normal University and Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*)

Abstract: A novel highly birefringent photonic crystal fiber (PCF) with elliptical air holes in the fiber cladding and arrays of subwavelength double-hole units with size of about $0.16 \mu\text{m}$ in the fiber core was proposed. Dispersion and birefringence property of the proposed PCFs was investigated by using a full-vector finite-element method (FEM) and anisotropic perfectly matched layers. Curves between modal birefringence (confinement loss) of the proposed PCFs and the wavelength of the input light for PCFs with different parameters of ellipticity, normalized area, diameter of the two microholes, distance between the two microholes are reported in details. Simulation results showed that high birefringence (larger than 0.001) and ultralow confinement loss (less than 0.0002 dB/km) are achieved. The proposed design of the PCF is an approach to achieve both the high birefringence and the low confinement loss by introducing asymmetric microstructure both in the fiber cladding and in the fiber core.

Key words: Photonic crystal fiber(PCF); Elliptical air holes; Birefringent; Confinement loss