

doi:10.3788/gzxb20144309.0906003

液芯高双折射率光子晶体光纤的特性研究

姜凌红, 郑义, 郑凯, 彭继迎

(北京交通大学 理学院激光所, 北京 100044)

摘 要:设计了一种纤芯区域由中心椭圆缺陷孔和其横排的上下两侧椭圆孔组成的高双折射率光子晶体光纤,并在其纤芯中心椭圆缺陷孔中填充高折射率液体物质二硫化碳.利用有限元法分析了该光子晶体光纤的双折射率、功率限制因子、模场分布及色散系数特性.研究表明:液芯光纤具有较高的纤芯功率限制因子,在波长 $0.6\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 范围内实现了宽带大负色散系数,在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处光纤双折射率达到了 6.8×10^{-2} ,即该结构液芯光子晶体光纤同时实现了宽带大负色散和高双折射率特性.通过结构参量容差性分析得到该光纤具有较好的偏振稳定性.

关键词:高双折射率;功率限制因子;色散系数;有限元;光子晶体光纤

中图分类号:O437

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)09-0906003-6

Investigation of a Liquid-core Photonic Crystal Fiber with High Birefringence

JIANG Ling-hong, ZHENG Yi, ZHENG Kai, PENG Ji-ying

(Institute of Laser, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A kind of highly birefringent Photonic Crystal Fiber (PCF) was proposed, a central defect elliptical hole and two other elliptical holes just below and above the central one were introduced in the core region of PCF. The central defect elliptical air hole was filled with high refractive index of liquid such as carbon disulfide. The birefringence, power confinement factor, fundamental mode field and dispersion characteristic of the fiber were studied by the full-vector finite element method. The results show that the liquid-core PCF has high power confinement factor, the high negative dispersion is realized in a wavelength range from 0.6 to $1.8\ \mu\text{m}$, and the birefringence up to 6.8×10^{-2} at $1.55\ \mu\text{m}$. The proposed PCF has achieved both the high birefringence and broadband high negative dispersion characteristics, and shows good polarization stability by analyzing structural parameter fluctuation.

Key words: High birefringence; Power confinement factor; Dispersion; Finite element method; Photonic crystal fiber

OCIS Codes: 060.2400;060.2420;060.5295

0 引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)^[1]由于其独特的光学特性,自 1996 年问世以来一直受到人们广泛关注.高双折射光子晶体光纤在未来相干光通信系统、光纤传感、新型超宽激光偏振光源、新型光纤器件等领域有极其广泛的应用前景^[2-4].由于 PCF 在制作过程中可以灵活设置包层空气孔大小和形状,为获

得高双折射光纤提供了可行性.目前,通过改变光纤横向结构来产生双折射的方法主要有:将空气孔的分布调整为不对称形状^[5,6]、将包层空气孔做成椭圆形或者矩形^[7-9]、在纤芯区域引入不对称结构^[10]等;另外通过在光纤的纤芯或者包层注入液体^[11-12]也能实现高双折射率.数值表明椭圆孔光子晶体光纤能够获得更高的双折射率,然而包层以椭圆空气孔排列的光子晶体光纤由于大量模场能量向外包层泄露,导致更低的纤芯

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No.2010CB327604)资助

第一作者:姜凌红(1983-),女,博士研究生,主要研究方向为光子晶体光纤. Email: nolshajia@163.com

导师(通讯作者):郑义(1964-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为激光,非线性光学,太赫兹技术等. Email: zybju654@sohu.com

收稿日期:2013-11-21;录用日期:2014-03-14

<http://www.photon.ac.cn>

功率限制及更高的传输损耗. 限制损耗的大小主要是由包层结构来决定, 而纤芯区域引入非对称性结构是实现高双折射率和高功率限制的一种方案.

本文设计了一种液芯高双折射率光子晶体光纤, 在其纤芯区域引入横排的三个小椭圆孔, 即中心椭圆缺陷孔及上下两侧横排的椭圆孔, 并在其中心椭圆缺陷空气孔里填充高折射率液态二硫化碳. 该结构同时具有高双折射率和宽带大负色散系数. 另外在液芯光子晶体光纤结构的基础上, 提出了纤芯区域未填充液体、由上下两个横排的椭圆空气孔组成的光子晶体光纤, 该光纤具有更加简单的纤芯结构, 且获得较高的双折射率, 是实现高双折射率光子晶体光纤的另一设计方案.

1 理论模型

光纤结构如图 1, 纤芯区域有横排的三个椭圆孔组成, 椭圆孔间距为 Δ_1 , 中心椭圆缺陷孔(阴影部分)的长轴为 b_0 , 短轴为 a_0 , 令 $\eta_1 = b_0/a_0$; 其上下两侧椭圆孔的长轴为 b , 短轴为 a , 令 $\eta_2 = b/a$. 光纤包层由四层圆形空气孔排列的六边形结构组成, 其空气孔直径为 d , 孔间距为 Δ . 整个光纤的基质为石英材料, 在纤芯区域中心椭圆缺陷空气孔填充高折射率液体二硫化碳.

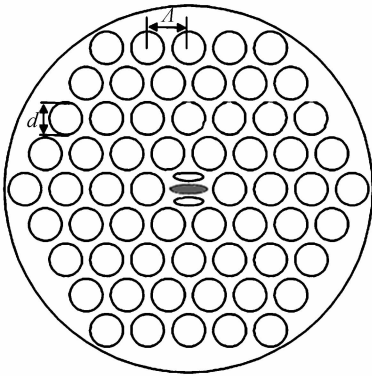


图 1 高双折射光子晶体光纤的横截面图

Fig. 1 Cross section of the high birefringent PCF

二硫化碳的折射率在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处达到了 1.59. 模拟过程中, 考虑石英介质和纤芯填充物二硫化碳的材料色散, 其不同的波长的 n_{Silica} 由 Sellmeier 方程计算^[6], 二硫化碳的折射率^[13]为

$$n_{\text{CS}_2} = 1.580826 + 1.5329\lambda^{-2} + 4.85783 \times 10^8 \lambda^{-4} - 8.2863 \times 10^{13} \lambda^{-6} + 1.4619 \times 10^{18} \lambda^{-8} \quad (1)$$

式中 λ 单位为 nm.

利用有限元法模拟得到光子晶体光纤的基模有效折射率 n_{eff} 的复数形式, 通过不同偏振方向的基模有效折射率实部相减得出光子晶体光纤的双折射率^[8]

$$B(\lambda) = |\text{Re}(n_{\text{eff}}^y(\lambda)) - \text{Re}(n_{\text{eff}}^x(\lambda))| \quad (2)$$

式中 $n_{\text{eff}}^x(x)$ 和 $n_{\text{eff}}^y(x)$ 分别是基模的两个正交偏振态的 x 方向和 y 方向所对应的模式有效折射率. 通过模式

有效折射率 n_{eff} 的实部可以求得色散系数^[8]

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \quad (3)$$

2 数值模拟与结果分析

2.1 双折射率

用选择性填充法^[14]对纤芯区域的中心椭圆缺陷空气孔填充高折射率液体二硫化碳, 由于纤芯折射率远大于包层有效折射率, 激光可在填充后的光子晶体光纤中遵循全内反射原理传输, 使光波大部分能量以基模形式在纤芯传播, 包层参量固定为 $d = 1.6 \mu\text{m}$, $\Delta = 2 \mu\text{m}$, 图 2 分析三个小椭圆的大小对光子晶体光纤双折射率的影响. 图 2(a) 中, 当 $a = 0.4 \mu\text{m}$, $b =$

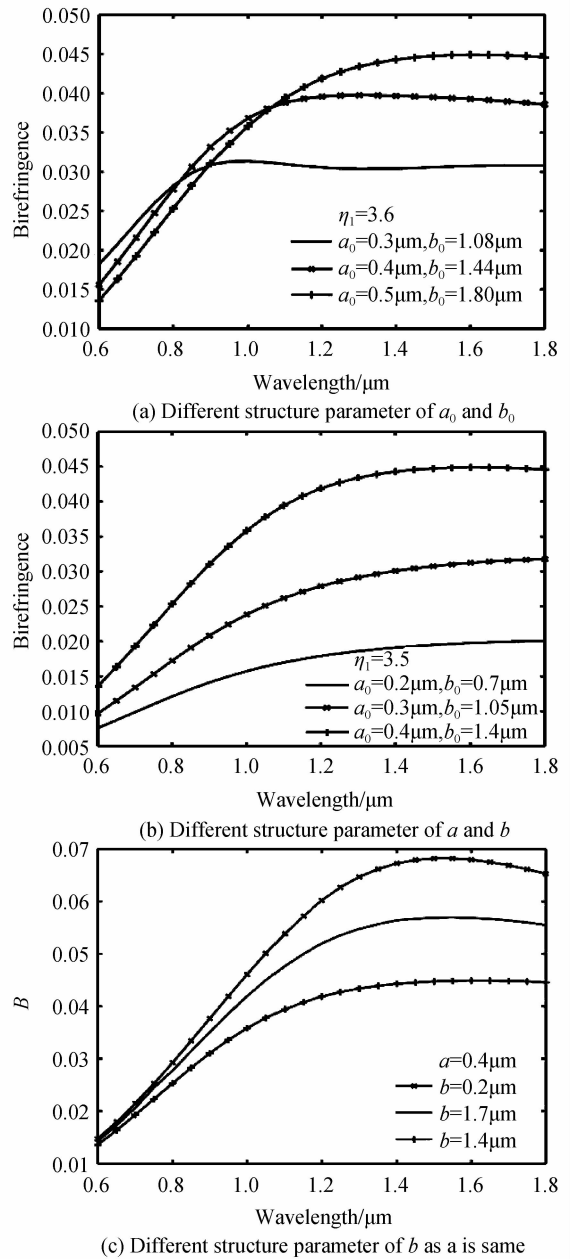


图 2 双折射率随纤芯椭圆大小变化

Fig. 2 Birefringence variation with the elliptical holes size in the fiber core region

1.4 μm , 椭圆率 η_1 固定为 3.6 不变时, 在可见光波长范围内, PCF 双折射率随着长轴 b_0 与短轴 a_0 同时减小而小范围递增; 在近红外波长范围内, PCF 双折射率随着长轴 b_0 与短轴 a_0 同时增大而增大, $a_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $b_0 = 1.8 \mu\text{m}$ 时 PCF 双折射率在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处达到了 4.4×10^{-2} . 为了获得波长 1.55 μm 附近范围内的高双折射率, 选定参量 $a_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $b_0 = 1.8 \mu\text{m}$. 图 2(b) 显示了固定纤芯中心椭圆缺陷孔大小且两侧椭圆的椭圆率 η_2 为 3.5 时, PCF 双折射率随着两侧椭圆率的长轴 b 与短轴 a 的同时增大而增大, 因此选定更大的短轴参量 $a = 0.4 \mu\text{m}$. 图 2(c) 中两侧椭圆的长轴对光纤的双折射率影响特别明显, 固定 $a_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $b_0 = 1.8 \mu\text{m}$, $a = 0.4 \mu\text{m}$, 光纤双折射率随着横轴 b 的增大 (椭圆率 $\eta_2 = b/a$ 增大) 而大范围的递增. 当 $b = 2 \mu\text{m}$ 时, 光纤双折射率 B 可以达到 6.8×10^{-2} , 相比文献 [8-10] 引入椭圆孔来获得高双折射率 PCF, 本文所设计结构的光纤双折射率大了近两倍, 而光子晶体光纤的包层结构相对简单, 更加容易制作.

固定纤芯区域三个小椭圆结构参量 $a_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $b_0 = 1.8 \mu\text{m}$, $a = 0.4 \mu\text{m}$, $b = 2 \mu\text{m}$, 图 3 分析了波长 1.55 μm 处光纤双折射率随着不同的包层结构参量的变化. 图 3(a) 中孔间距 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$ 不变时, 光纤双折射

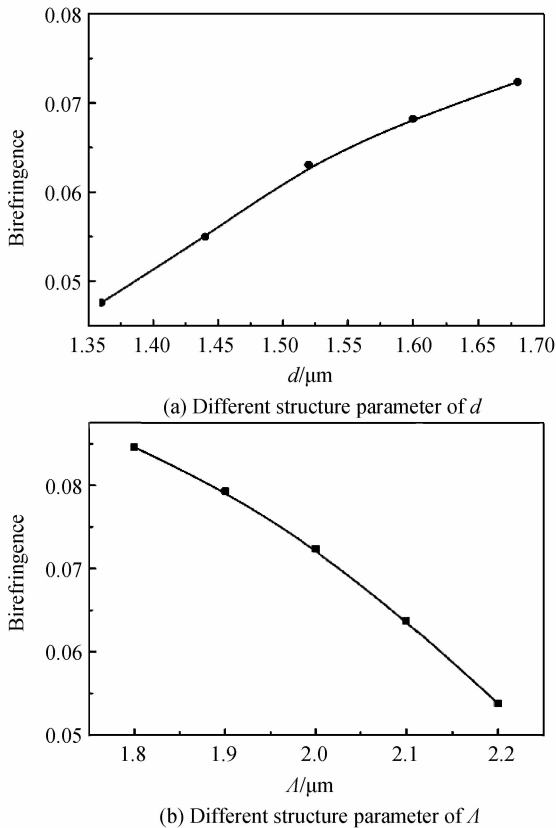


图 3 波长 1.55 μm 的光纤双折射率随着不同结构参量
Fig. 3 Birefringence variation with different structural parameter when wavelength is 1.55 μm

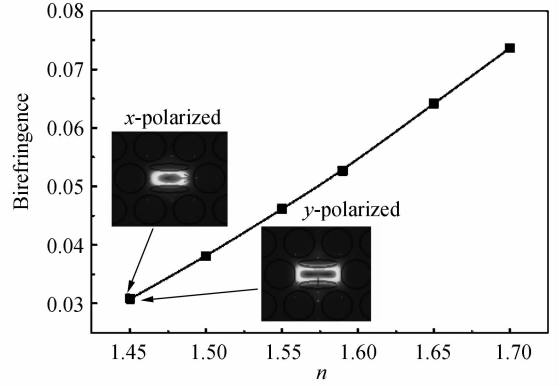


图 4 波长 1.55 μm 的光纤双折射率随纤芯折射率的变化
Fig. 4 Birefringence variation with different refractive indices of the fiber core when wavelength is 1.55 μm
率随着空气孔直径的增大而增大, 其中空气孔直径 $d = 1.68 \mu\text{m}$ 时的光纤双折射率达到最大. 图 3(b) 显示了当其他参量不变时, 光纤双折射率随着孔间距的增大而减小, 孔间距为 1.8 μm 时, 光纤的双折射率在波长 1.55 μm 处达到了 8.4×10^{-2} ; 当光纤孔间距增大为 2.2 μm 时, 该光纤的双折射率在波长 1.55 μm 处为 5.4×10^{-2} . 另外计算结果显示了光纤的双折射率随着纤芯椭圆孔间距的增大而减小. 图 4 显示了光纤结构参量为 $N = 4$, $d = 1.6 \mu\text{m}$, $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $\Lambda_1 = 0.6 \mu\text{m}$, $a_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $b_0 = 1.8 \mu\text{m}$, $a = 0.4 \mu\text{m}$, $b = 2 \mu\text{m}$ 时波长 1.55 μm 处双折射率随着纤芯填充折射率 n 的变化, 由图可知光纤的双折射率随着纤芯填充折射率的增大而增大; 当纤芯区域只有孔间距为 $2\Lambda_1$, 大小为 $a = 0.4 \mu\text{m}$, $b = 2 \mu\text{m}$ 的两个横排椭圆空气孔且没有液体填充时, 该光纤在波长 1.55 μm 处的双折射率达到了 3×10^{-2} . 图中两个小插图分别是纤芯为两个椭圆空气孔组成的光纤在波长 1.55 处的 x 与 y 偏振的基模场图, 可以看出光能量很好的被限制在纤芯传播. 因此在纤芯区域引入两个横排的椭圆空气孔是实现高双折射率的另一种设计方案.

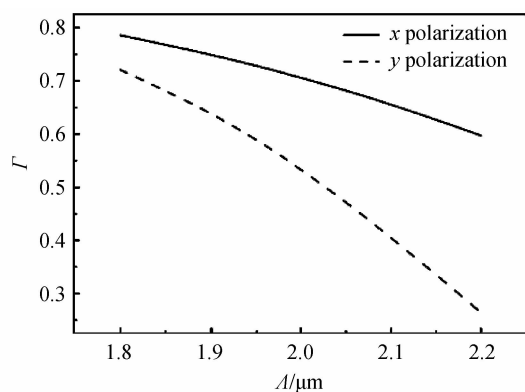
2.2 PCF 的模场分布, 功率限制因子及色散特性

为了更准确的描述不同波长的光功率在光纤中的分布情况, 分析了光纤的功率限制因子 Γ .

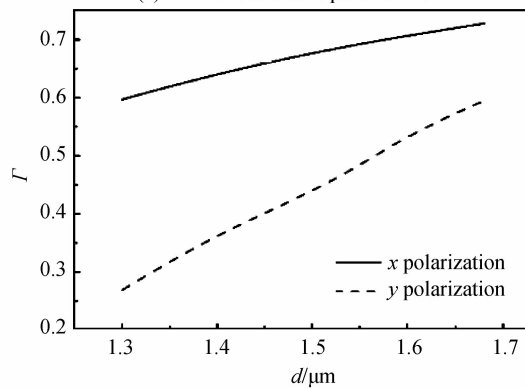
$$\Gamma = \frac{\iint_{S_c} \frac{1}{2} \text{Re}(E \times H^*)_z dx dy}{\iint_S \frac{1}{2} \text{Re}(E \times H^*)_z dx dy} \quad (4)$$

式中 S_c 反映了对纤芯区域积分, S 指整个光纤端面积分, Γ 反映了纤芯区域的光功率与总功率之比. 图 5 (a), (b) 分别显示了工作波长为 1.55 μm 的光纤基模功率限制因子随孔间距和空气孔直径的变化, 光纤基模功率限制因子随着孔间距的增大而减小, 随着空气孔直径的增大而增大. 图 6 显示光纤结构参量为 $N = 4$, $d = 1.6 \mu\text{m}$, $\Lambda = 1.8 \mu\text{m}$, $\Lambda_1 = 0.5 \mu\text{m}$, $a_0 = 0.5 \mu\text{m}$,

$b_0=1.8\ \mu\text{m}$, $a=0.4\ \mu\text{m}$, $b=2\ \mu\text{m}$ 时光纤功率限制因子随波长的变化关系. 从图 6 可以看出该光纤的纤芯功率限制因子在波长 $0.8\ \mu\text{m}$ 处 x 与 y 偏振方向的纤芯功率限制因子分布为 0.902 和 0.912 ; 在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处其参量在 x 与 y 偏振方向分别也能达到 0.786 和 0.721 . x 与 y 偏振的纤芯功率限制因子随着波长增大而减小, 与光纤基模模场分布随着波长的增大而向包层扩散达成了一致.



(a) Different structure parameter of A



(b) Different structure parameter of d

图 5 波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处光纤功率限制因子结构参量变化
Fig. 5 The power confinement factor of PCF variation with different structural parameter when wavelength is $1.55\ \mu\text{m}$

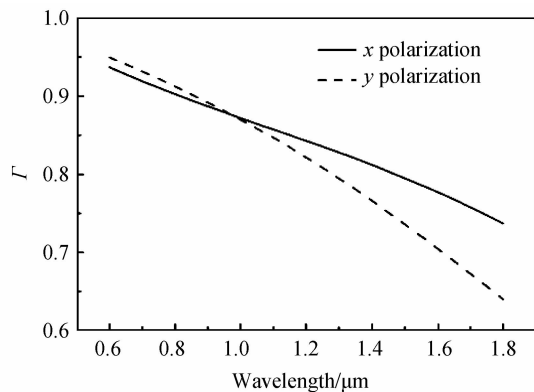


图 6 功率限制因子随波长的变化

Fig. 6 The power confinement factor as a function of wavelength

图 7 显示了光纤结构参量为 $N=4$, $d=1.6\ \mu\text{m}$, $\Lambda=2\ \mu\text{m}$, $\Lambda_1=0.5\ \mu\text{m}$, $a_0=0.5\ \mu\text{m}$, $b_0=1.8\ \mu\text{m}$, $a=0.4\ \mu\text{m}$, $b=2\ \mu\text{m}$ 的基模模场分布. 该光子晶体光纤结构的双折射率在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处达到了 6.8×10^{-2} , 本文设计的光纤双折射率比大量具有圆对称基模实现的高双折射率大了三倍左右, 且椭圆芯高双折射率具有很好的温度稳定性^[15]. 该结构参量光纤在波长 $0.8\ \mu\text{m}$ 处的 x 与 y 偏振方向的纤芯功率限制因子分布为 0.893 和 0.902 ; 波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处的纤芯功率限制因子在 x 与 y 偏振方向分别也能达到 0.707 和 0.607 . 由图 7 可以看出, x 偏振模和 y 偏振模的模场分布相似, 呈现明显椭圆型且表现出强烈的线偏振特性. 在从模场强度上看, 包层空气孔对模场具有较好的限制作用, 场强分布明显体现了二重对称性结构特点. 随着波长的增加, 基模模场的强度分布向包层以及纤芯空气孔扩散, 与纤芯功率限制因子随着波长增大而降低达成了一致.

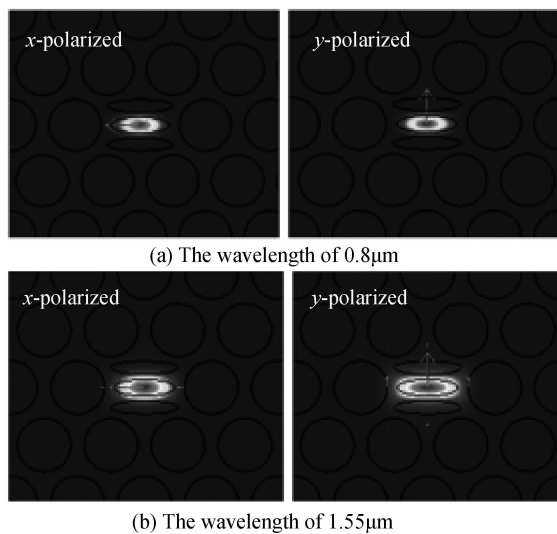


图 7 PCF 模场分布

Fig. 7 Electric field distribution for the PCF at two wavelength

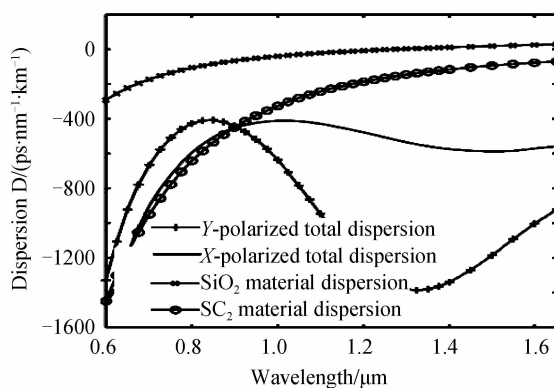


图 8 高双折射率光子晶体光纤的色散

Fig. 8 Dispersion of the high birefringent PCF

图8显示了所设计的高双折射率光子晶体光纤基底石英和液芯二硫化碳材料色散系数随波长的变化,可以看出液态物质二硫化碳本身的材料色散系数对光子晶体光纤色散系数影响很大.该光纤在波长0.6到1.6 μm 范围内保持了正常色散系数,并且在通信波长1.55 μm 附近, x 与 y 偏振的色散系数分别达到了 $-600 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$, $-1200 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 左右,为宽带色散系数补偿提供好的基础.

2.3 光纤结构参量容差性分析

在光子晶体光纤制备过程中,由于拉丝速度、送料速度、温度、黏度效应、以及孔内气压等的影响,制备出的光纤实际几何结构参量会偏离光纤理论设计结构参量的1%到5%.空气孔所在的位置对光子晶体光纤的影响程度有很大关系,空气孔越靠近芯区,对其性能的影响越大.为了明确双折射率随变形空气孔的变化范围,只需要考虑纤芯区域的三个椭圆孔.图9显示了纤芯椭圆大小改变 $\pm 5\%$ 时,相对原来的双折射分别改变了5.4%,4.9%,表明所设计的高双折射光子晶体光纤具有较高的偏振稳定性.

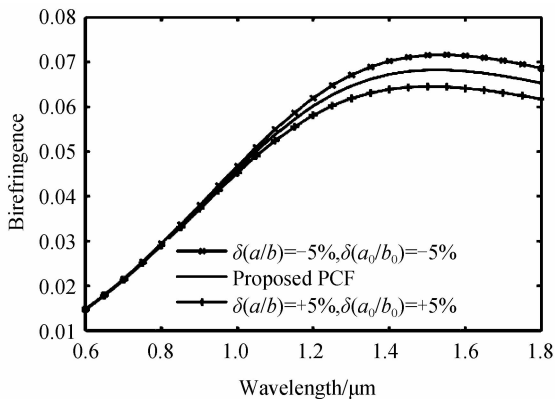


图9 双折射率随纤芯区域椭圆率改变 $\pm 5\%$ 的变化
Fig.9 Birefringence behavior of PCF with a variation of $\pm 5\%$ for a/b and a_0/b_0

3 结论

本文设计了一种纤芯区域引入三个小椭圆孔,并且在中心椭圆缺陷空气孔填充高折射率液体二硫化碳的高双折射率光子晶体光纤.利用有限元法对所设计的液芯光子晶体光纤的基模模场分布、功率限制特性、双折射率及色散系数特性进行分析.该结构光纤在波长1.55 μm 处可以获得 6.8×10^{-2} 的高双折射率,实现了波长0.6到1.6 μm 范围内的大负色散系数.另外,在液芯高双折射率光子晶体光纤结构的基础上,提出了包层结构相同,纤芯区域只有两个横排椭圆空气组成的高双折射率光子晶体光纤,该光纤在波长1.55 μm 处可以获得 3.1×10^{-2} 的高双折射率.通过模场分布以及功率限制因子的分析得到:基模模场分布随着波长的增大向包层以及纤芯空气孔扩散,与其纤芯功率限

制性因子随着波长的增大而降低得到了很好的吻合.最后对液芯高双折射率光子晶体光纤结构参量的容差性进行了定量分析,数值表明了该光纤具有较高的偏振稳定性,这对制作该高双折射保偏光子晶体光纤有重要意义.

参考文献

- [1] KNIGHT J C, RUSSELL P St J. New ways to guide light[J]. *Science*, 2002, **296**(5566): 276-277.
- [2] ZHANG Ya-ni, REN Li-yong, WANG Li-li, et al. Progress in the study of high birefringence polarization maintained photonic crystal fibers [J]. *Chinese Journal Quantum Electronics*, 2006, **23**(5): 577-582.
张亚妮, 任立勇, 王丽莉, 等. 高双折射光子晶体保偏光纤研究进展[J]. *量子电子学报*, 2006, **23**(5): 577-582.
- [3] ZHANG Xiao-juan, ZHAO Jian-jin, FANG Liang. Analysis of pulse trapping characteristic in highly birefringent photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 1154-1160.
张晓娟, 赵建林, 方亮. 一种高双折射光子晶体光纤的脉冲俘获分析[J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 1154-1160.
- [4] JIANG Ying, ZENG Jie, LIANG Da-kai, et al. Study on the axial strain sensor of birefringence photonic crystal fiber loop mirror based on the absolute integral of the monitoring peak [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(12): 3273-3277.
姜莺, 曾捷, 梁大开, 等. 基于监测波峰对积分的双折射光子晶体光纤环境轴向应变传感器研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(12): 3273-3277.
- [5] ZHANG Ming-ming, MA Xiu-rong, CAO Yue, et al. Study on high birefringence photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1126-1129.
张明明, 马秀荣, 曹晔, 等. 高双折射光子晶体光纤研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1126-1129.
- [6] LI De-yue, ZHOU Gui-yao, XIA Chang-ming, et al. Theoretical investigation of photonic crystal fiber with highly nonlinear and birefringent [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(11): 1105003-1-6.
李德月, 周桂耀, 夏长明, 等. 高非线性高双折射光子晶体光纤特性的理论研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(11): 1105003-1-6.
- [7] HE Zhong-jiao. Rectangular-hole photonic crystal fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 583-586.
何忠蛟. 矩形孔光子晶体光纤[J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 583-586.
- [8] ZHANG Ya-ni. Design and optimization of high-birefringence low-loss crystal fiber with two zero-dispersion wavelengths for nonlinear effects[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(25): 125-130.
- [9] YUE Yang, KAI Gui-yun, WANG Zhi, et al. Highly birefringent elliptical-hole photonic crystal fiber with squeezed hexagonal lattice[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(5): 469-471.
- [10] CHEN Da-ru, SHEN Lin-fang. Ultrahigh birefringent photonic crystal fiber with ultralow confinement loss [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(4): 185-187.
- [11] LIU Jia-hong, HUANG Sheng-shuo, YU Chin-ping. Loss-reduced highly birefringent selectively liquid-filled photonic crystal fibers[J]. *Optics Communications*, 2009, **283**(2010): 971-974.
- [12] HAMEED M F O, OBAYYA S S A. Modal analysis of a novel soft glass photonic crystal fiber with liquid crystal core

- [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(1): 96-102.
- [13] SAMOC A. Dispersion of refractive properties of solvents: chloroform, toluene, benzene, and carbon disulfide in ultraviolet, visible, and near-infrared [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, **94**(9): 6167-6174.
- [14] YAO Jian-quan, WANG Ran, MIAO Yin-ping, *et al.* Novel photonic functional devices based on liquid-filling microstructured optical fibers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(1): 0101002-1-11.
姚建铨,王然,苗银萍,等. 基于液体填充微结构光纤的新型光子功能器件[J]. *中国激光*, 2013, **40**(1): 0101002-1-11.
- [15] SZPULAK M, STATKIEWICZ G, OLSZEWSKI J, *et al.* Experimental and theoretical investigations of birefringent holey fibers with a triple defect[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(13): 2652-2658.