

文章编号:1004-4213(2010)s1-0039-4

新型高双折射光子晶体光纤特性分析

梁健,云茂金,孔伟金,孙欣,张文飞,席思星,尹霞,杨学宗

(青岛大学 物理科学学院,山东 青岛 266071)

摘 要:将单模光子晶体光纤的空气孔设计成椭圆形增加其结构的不对称性,可以破坏模式中两偏振态的简并,达到实现双折射特性的目的.据此,提出了一种新型的高双折射光子晶体光纤.该模型通过在纤芯引入两个小空气孔以及将包层的第一环和中间一行变为椭圆空气孔来造成光纤模式的不对称性,获得了高双折射特性.之后对该结构的色散特性及模场面积等特性进行了数值模拟,并且讨论了外包层空气孔的几何参数改变对于该模型色散特性的影响.采用全矢量平面波展开法,并且以完美匹配层作为边界条件对该结构光子晶体光纤的上述特性进行分析.结果表明,该结构光子晶体光纤可以在较宽的波长范围内产生 10^{-3} 量级的模式双折射,并且从 1 100~1 800nm 范围内具有平坦色散特性,同时具有小模场面积特性.为基于超平坦色散、高双折射和高非线性光子晶体光纤的光纤器件的制作和应用提供理论基础.

关键词:光子晶体光纤;双折射;色散;有效模场

中图分类号: TN25;O734

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb201039s1.0039

0 引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)又称为多孔光纤或微结构光纤,由于其具有无尽单模传输^[1]、可控的非线性效应^[2]、灵活的色散^[3]、大模场区^[4-5]及高双折射等特性^[6-8],自 1996 年问世以来一直受到广大科技工作者的关注.高双折射型光纤在光纤通信和光纤传感等方面有着广泛的应用,较于普通光纤而言,光子晶体光纤可以简单地通过引入非对称的纤芯或非对称的包层实现高双折射^[9].灵活控制光子晶体光纤的色散在光纤通信^[10]、色散补偿^[11]、非线性光学^[12]以及平坦连续谱传输^[13]的应用中都是很重要的问题,光子晶体光纤新型的包层结构一波长量级的空气孔排列使得我们可以灵活的调节色散曲线,可以在一定范围内实现平坦色散.

对于单一优良特性光子晶体光纤的研究已经相对成熟,实验上也成功拉制出了具有单一优良特性的光子晶体光纤.因此,近年来对同时具有两个或多个优良特性的光子晶体光纤的研究逐渐成为研究热点^[14-18],我国在这方面也做了大量工作^[8,16,19].但是由于此类光纤大都具有比较复杂的结构,因此其在控制上存在一定的困难,目前几乎没有多优良特性

光子晶体光纤的实验报道.

同时具有高双折射、小模场和平坦色散的光子晶体光纤有着重要的应用.但目前同时具有这三种特性的光子晶体光纤还未见报道.文献^[14]提出了具有高双折射性、超平坦色散和小限制损耗的光子晶体光纤结构;文献^[15]提出了具有平坦色散和小模场特性的光子晶体光纤结构.

本文通过在纤芯引入两个小空气孔以及将包层的第一环和中间一行变为椭圆空气孔来造成光纤模式的不对称性,获得了高双折射光子晶体光纤.采用全矢量平面波展开法对所设计的光子晶体光纤的双折射、模式色散及模场特性进行了详尽分析.分析结果表明本文提出的新型光子晶体光纤可以在保持高双折射的同时实现平坦色散及小模场特性.

1 理论模型

在传统的结构对称型光纤中,基模由两个简并的正交偏振模组成,这两个正交偏振模的模式折射率非常接近,导致了光纤中的场很容易从一个偏振模耦合到另一个偏振模中去,由此人们提出了通过在纤芯或包层引入光纤的不对称结构,人为地增大这两个偏振模之间的模式折射率差,得到高双折射

基金项目:国家自然科学基金(No. 10904080)资助

第一作者:梁健(1986—),男,硕士研究生,主要研究方向为光子晶体光纤及光纤中的慢光. Email: liangjian0007@126.com

导师(通讯作者):云茂金(1974—),男,教授,主要研究方向为光学超分辨率及光子晶体光纤. Email: mjun@qdu.edu.cn

收稿日期: 2010-08-10; **修回日期:** 2010-10-18

的光子晶体光纤.与已有的实现高双折射光子晶体光纤方式不同的是,我们同时在光子晶体光纤的包层和纤芯引入不对称结构构成一种截面结构如图1的高双折射光子晶体光纤,该光纤为四环的光子晶体光纤,第一环和中间一行为椭圆孔,基底为氧化硅材料.为了得到更好的双折射性,在纤芯中引入两个小空气孔.

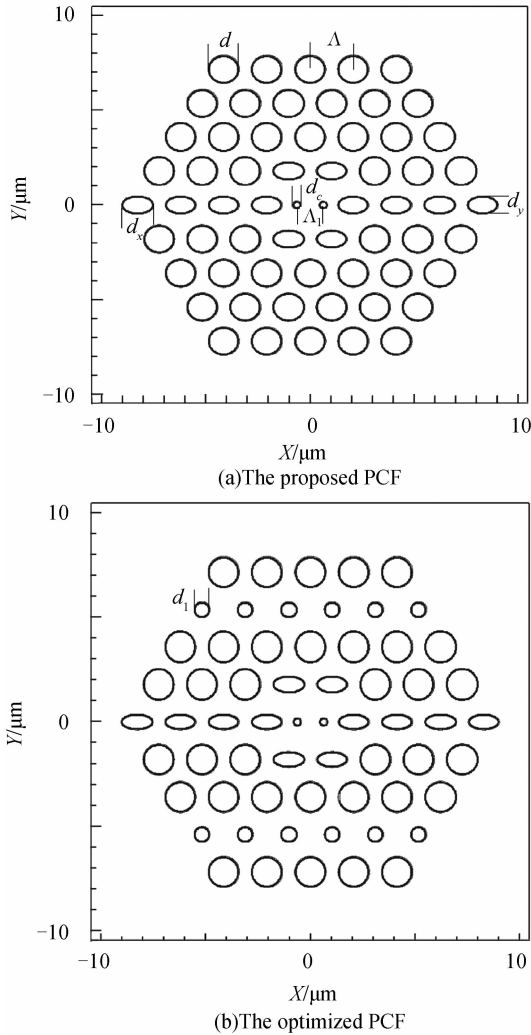


图1 提出的和优化后的光子晶体光纤结构

Fig. 1 The schematic cross-section of the proposed and optimized highly birefringence PCF

图中,空气孔的折射率 $n_0=1$,硅材料的折射率 $n=1.45$,空气孔的周期 $\Lambda=2.07 \mu\text{m}$,纤芯的两个小孔间距 $\Lambda_1=(2/3)\Lambda$.包层和纤芯的空气孔直径分别为 d 和 d_c ,其中 $d/\Lambda=0.71$. d_x 和 d_y 分别为椭圆空气孔的长轴和短轴.为了限制模场区域,设 $d_x=d$,椭圆率为 $\eta=d_y/d_x$.我们采用全矢量平面波展开法(Plane Wave Expansion Method, PWEM),并且以完美匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)作为边界条件对该结构光子晶体光纤的双折射特性、模式色散及模场特性进行分析.

双折射定义为两偏振基模的有效折射率差

(HE_{11}^x 和 HE_{11}^y)^[7],计算公式为

$$B = |n_x - n_y| \quad (1)$$

式中 n_x 和 n_y 分别是每个基模的有效折射率.

光子晶体光纤中的色散主要由材料色散和波导色散两部分构成^[16].色散值 D 可由有效折射率及相应工作波长给出

$$D_g(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}[n_{\text{eff}}]}{d\lambda^2} \quad (2)$$

式中 c 是光速. $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 是有效折射率的实部.总的色散值为波导色散和材料色散的和

$$D(\lambda) \approx D_g(\lambda) + \Gamma(\lambda) D_m(\lambda) \quad (3)$$

式中, Γ 是硅材料的限制因素.对于大部分的波导型光子晶体光纤来说, Γ 取 1^[17].材料色散可以直接由三阶 Sellmeier 方程求出,而波导色散需要通过式(2)算出.光子晶体光纤的有效模场区域与纤芯区域的有效区域有关^[5],计算公式为

$$A_{\text{eff}} = \frac{(\iint |E|^2 dx dy)^2}{\iint |E|^4 dx dy} \quad (4)$$

式中, E 为电场强度.对于要求高非线性特性的结构来说,小模场是非常重要的.

2 模拟结果与分析

对结构参量 $\eta=0.6$, $d_c/d=0.2, 0.25, 0.4$ 的光子晶体光纤的双折射特性进行数值模拟,模拟结果如图2,由图2可以看出双折射特性随着波长的增长而明显增大.当 $d_c/d=0.25$ 时,在波长 1550 nm 处双折射最高可达 1.97×10^{-3} .研究发现随着 d_c/d 的增大,双折射特性在达到最大值后开始下降.这说明在纤芯区域引入太大或太小的空气孔都会使得纤芯的不对称性变弱,从而影响其双折射特性.模拟结果表明,对于该结构的光子晶体光纤,能得到最好双折射特性的最佳参数为 $d_c/d=0.25$.

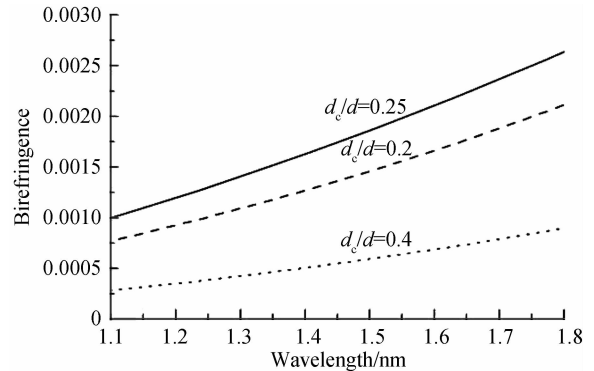


图2 当 $\eta=0.6$ 时,双折射性随着波长变化曲线

Fig. 2 Variation of the birefringence as a function of the wavelength with $\eta=0.6$

图3给出了 $d_c/d=0.25$, $\eta=0.4, 0.5, 0.6$ 的光子晶体光纤的双折射特性变化曲线.点线、虚线和实线分别表示 $\eta=0.4, 0.5$ 和 0.6 .可以看出双折射特

性随着波长的增长而明显增大. 波长为 1 550 nm 时, 双折射最大值分别可达到 2.47×10^{-3} , 2.18×10^{-3} 和 1.97×10^{-3} . 根据图 3 可以明显看出, 双折射特性随着椭圆率的变小而变大. 这是因为随着椭圆率的减小, 该结构的不对称性变强, 从而导致更高的双折射特性.

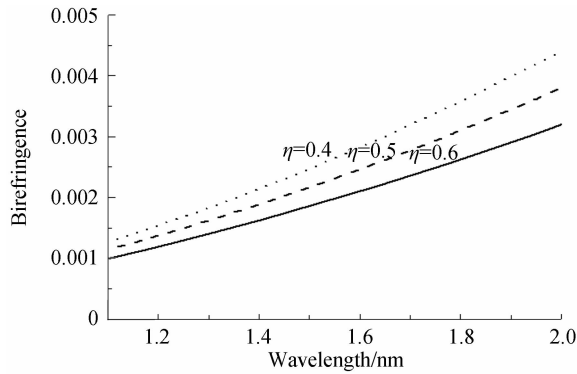


图 3 当 $d_c/d=0.25$ 时, 双折射性随着波长的变化曲线
Fig. 3 Variation of the birefringence as a function of the wavelength with $d_c/d=0.25$

图 4 给出了所设计的高双折射光子晶体光纤在 $d_c/d=0.25$ 时, 不同椭圆率情况下基模有效面积随波长的变化关系. 由图可以看到, 基模有效面积随着波长的变长而增大. 对应于同一工作波长, 基模有效面积随着椭圆率的增加而减小. 当 $\eta=0.6$ 时, 基模有效面积最小. 根据基模有效面积与非线性效应的反比关系知道该结构光子晶体光纤具有高的非线性效应.

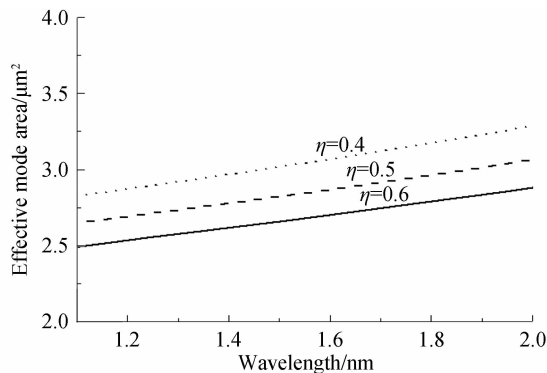


图 4 当 $d_c/d=0.25$ 时, 有效模场区域随波长的变化曲线
Fig. 4 Variation of the effective mode area as a function of the wavelength with $d_c/d=0.25$

为了同时得到平坦色散和高双折射性, 对图 1 (a) 所示的光子晶体光纤结构进行了优化. 优化后的结构如图 1 (b), 其中小空气孔的直径为 d_1 . 图 5 给出了优化后的光子晶体光纤的双折射性. 对比图 3 和图 5, 可以看出优化后的光子晶体光纤的双折射性减小了. 该结果与文献[7, 18]中, 包层空气孔尺寸的改变有利于提高双折射性的结论相矛盾. 这是因为, 在我们设计的结构中引入了椭圆空气孔, 有了椭圆空气孔之后, 改变包层空气孔的尺寸会减小其不

对称性, 从而导致双折射有所减小. 尽管双折射的值有所减小, 但是仍然在 10^{-3} 量级, 达到了实际应用的需要.

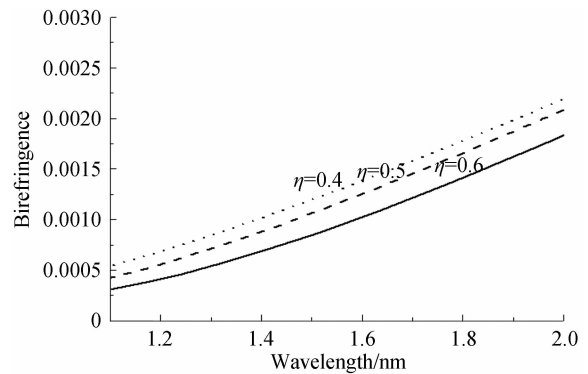


图 5 当 $d_c/d=0.25, d_1/d=0.6$ 时, 双折射性随着波长的变化曲线

Fig. 5 Variation of the birefringence as a function of the wavelength with $d_c/d=0.25, d_1/d=0.6$

图 6 给出了图 1 (a) 和 (b) 两种结构光子晶体光纤的色散变化曲线. 可以看出优化后的结构可以在 1 100~1 800 nm 波段中获得超平坦色散. 当 $d_1/d=0.6$ 时, 该结构具有最平坦的色散值. 因此, 优化后的光子晶体光纤在 $\eta=0.6, d_c/d=0.25, d_1/d=0.6$ 时, 可以在保持高双折射的同时实现超平坦色散及小模场特性.

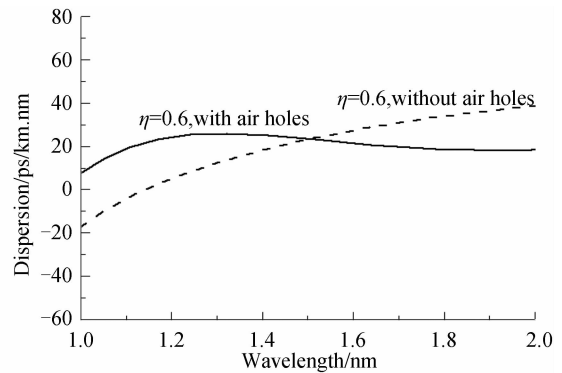


图 6 当 $\eta=0.6, d_1/d=0.6$ 时, 色散随着波长的变化曲线
Fig. 6 Variation of the chromatic dispersion as a function of the wavelength with $\eta=0.6, d_1/d=0.6$

3 结论

本文采用全矢量平面波法对所设计的高双折射型光子晶体光纤进行了数值模拟. 模拟结果表明, 通过调节光子晶体光纤的结构参量可以设计出同时具有超平坦色散、基模有效面积较小的高双折射光子晶体光纤. 为基于超平坦色散、高双折射和高非线性光子晶体光纤的光纤器件的制作和应用提供理论基础.

参考文献

[1] WADSWOETH W, JOLY N, KNIGHT J, et al. Supercontinuum and four-wave mixing with Q-switched pulsed in endlessly single-mode photonic crystal fibers[J]. *Optics*

- Express, 2004, **12**(2):299-309.
- [2] HANSEN K. Dispersion flattened hybrid-core nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(13):1503-1509.
- [3] KNIGHT J C, ARRIAGA J, BIRKS T A, *et al.* Anomalous dispersion in photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(7):807-809.
- [4] MORTENSEN N A, NIELSEN M D, FOLKENBERG J R, *et al.* Improved large-mode-area endlessly single-mode photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(6):393-395.
- [5] MATSUI T, ZHOU J, NAKAJIMA K, *et al.* Dispersion-flattened photonic crystal fiber with large effective area and low confinement loss[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(12):4178-4183.
- [6] STEEL M J, OSGOOD Jr R M. Elliptical-hole photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(4):229-231.
- [7] JU J, JIN W, DEMOKAN M S. Properties of a highly birefringent photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photonics Technolgo Letters*, 2003, **15**(10):1375-1377.
- [8] ZHANG M M, MA X R, CAO Y, *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.
- [9] HE Z J. Highly Birefringent photonic crystal fiber based on index-enhanced fiber core (in English) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2):301-304.
- [10] NIELSEN M D, JACOBSEN C, MORTENSEN N A, *et al.* Low-loss photonic crystal fibers for transmission system and their dispersion properties[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(7):1372-1376.
- [11] SHEN L P, HUANG W P, JIAN S S. Design and optimization of photonic crystal fibers for broad-band dispersion compensation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(4):540-542.
- [12] FINAZZI V, MONRO T M, RICHARDSON D J. Small-core silica holey fibers; Nonlinearity and confinement loss trade-offs [J]. *JOSA B*, 2003, **20**(7):1427-1436.
- [13] WANG W, HOU L T, SONG J J, *et al.* Design of double cladding dispersion flattened photonic crystal fiber with deformation insensitive outer cladding air-holes [J]. *Optics Communications*, 2009, **282**(17):3468-3472.
- [14] ADEMGIL H, HAXHA S. Highly birefringence photonic crystal fibers with ultralow chromatic dispersion and low confinement losses [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(4):441-448.
- [15] HU J J, SHUM P P, LU C, *et al.* Dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber for nonlinear applications [J]. *Optics Communications*, 2009, **282**(20):4072-4076.
- [16] HAXHA S, ADEMGIL H. Novel design of photonic crystal fibers with low confinement losses, nearly zero ultra-flatted chromatic dispersion, negative chromatic dispersion and improved effective mode area [J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(2):278-286.
- [17] FERRANDO A, SILVESTRE E, MIRET J J, *et al.* Designing the properties of dispersion-flattened photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2001, **9**(13):687-697.
- [18] YANG T J, SHEN L F, CHAU Y F, *et al.* High birefringence and low loss circular air-holes photonic crystal fiber using complex unit cells in cladding [J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(17):4334-4338.
- [19] HE Z J. Highly birefringent photonic crystal fiber based on micro-hole-structured fiber core [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11):2217-2221.
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):2217-2221.

A Novel Highly Birefringent Photonic Crystal Fiber

LIANG Jian, YUN Mao-jin, KONG Wei-jin, SUN Xin, ZHANG Wen-fei,
XI Si-xing, YIN Xia, YANG Xue-zong
(College of physics science, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: To destroy the degenerate of the two polarization mode, designing the model with elliptical holes is an easier and efficient method. According to this theory, a novel high birefringent totally internal reflection photonic crystal fiber was proposed. By introducing elliptical air holes in the cladding and small holes both in the core area and cladding, a property of high birefringence could be achieved. And then dispersion and effective area of the fundamental modes in such photonic crystal fibers were analyzed in detail. Meanwhile, the influence of external air holes on the dispersion property was also discussed. A full-vector plane wave expansion method with anisotropic perfectly matched layer was used to calculate these properties. The simulation result shows that high birefringence with a magnitude of the order of 10^{-3} , flattened chromatic dispersion from 1 100 nm to 1 800 nm and low effective area (which mean high nonlinearity) are obtained. This work provides theoretical basis for the production and application of optical devices based on such photonic crystal fibers.

Key words: Photonic crystal fibers; Birefringence; Chromatic dispersion; Effective area