

基于椭圆孔微结构纤芯的高双折射光子晶体光纤

何忠蛟

(浙江工商大学 信息与电子工程学院, 杭州 310035)

摘 要:提出了一种在纤芯引入微小椭圆孔实现高双折射光子晶体光纤的方法. 采用全矢量有限元方法和完美匹配层条件, 依次研究了光子晶体光纤在纤芯中引入单个、两个、三个微小椭圆孔情况下的双折射特性. 模拟结果表明, 纤芯微小椭圆孔主导了光子晶体光纤的双折射特性, 其参量及个数对双折射有着重要的影响, 增大椭圆面积、椭圆率可以进一步提高光子晶体光纤的双折射. 最后设计和研究了一种采用三环阵列椭圆孔微结构纤芯的光子晶体光纤, 其双折射可以达到 2.7×10^{-3} .

关键词:光子晶体光纤; 双折射; 有限元方法; 椭圆孔

中图分类号: TN25

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)07-1215-4

0 引言

光子晶体光纤的出现极大地促进了光纤性能的提高和光纤应用的发展^[1-7]. 特别是在光子晶体光纤被发明之后, 作为一种在光纤通信、光纤激光器、光纤滤波器及光纤传感等方面有重要应用价值的高双折射光纤的性能得到了很大的提高^[8-10]. 目前, 已经有多种实现高双折射光子晶体光纤的方法^[11-16]. 已报道的高双折射光子晶体光纤基本上可以分为两大类. 一种是基于非对称的光纤纤芯, 通常采用光子晶体结构中双缺陷或三缺陷来实现高双折射光子晶体光纤^[11-13], 可以获得 10^{-3} 量级的双折射, 存在着模斑质量不好(甚至模斑分裂)的缺点; 另一种是基于非对称的光纤包层, 典型的设计是在光纤包层引入椭圆空气孔^[14-16], 理论上可以获得 10^{-2} 量级的双折射, 但是该光纤对光能量约束很差, 导致不可接受的传输损耗.

本文提出了在纤芯中引入椭圆孔微结构的光子晶体光纤, 同时保留了传统光子晶体光纤良好的光约束特性以及利用椭圆获得高双折射的优点. 这种设计为获得高双折射光子晶体光纤提供了一种新的方法, 为改善光子晶体光纤其它性能(如色散、非线性特性)提供了一种新的途径. 集中研究了基于椭圆孔微结构纤芯光子晶体光纤的高双折射特性.

1 少量椭圆孔微结构纤芯的光子晶体光纤

本文涉及的光子晶体光纤, 其横截面为正三角形排布的光子晶体结构. 在以下提到的结构中, 所采用的空气折射率假定为 1, 二氧化硅的折射率假定

为 1.45. 采用全矢量有限元方法和完美匹配层条件来计算光纤的双折射. 在描述光子晶体光纤双折射特性的过程中, 就以下几个参量做说明. n_{eff} 为光子晶体光纤基模的有效折射率; 光子晶体光纤的双折射定义为 $\Delta n = |n_{\text{eff}x} - n_{\text{eff}y}|$, 其中 $n_{\text{eff}x}$ 、 $n_{\text{eff}y}$ 分别为电场 x 方向偏振、电场 y 方向偏振的基模有效折射率; 定义归一化频率为 $v = \Lambda/\lambda$, 其中 Λ 为光子晶体光纤横截面周期结构中两个相邻空气孔的中心距离, λ 为光子晶体光纤的工作波长.

1.1 单椭圆孔微结构

典型的光子晶体光纤的横截面是带有一个缺陷的二维光子晶体结构. 考虑如图 1 中插图所示的光子晶体光纤结构, 即在典型的光子晶体光纤纤芯中引入一个微小的椭圆空气孔. 作为一个计算的实例, 给出参量如下: 光子晶体光纤包层相邻空气孔的中径心距离为 $\Lambda = 6 \mu\text{m}$; 光子晶体光纤包层空气孔的直为 $d = 2 \mu\text{m}$; 光子晶体光纤纤芯椭圆空气孔的长半轴和短半轴分别为 $a = 0.6 \mu\text{m}$ 和 $b = 0.4 \mu\text{m}$, 相应的椭圆率为 $\eta = a/b = 1.5$. 对于上述的参量, 计算

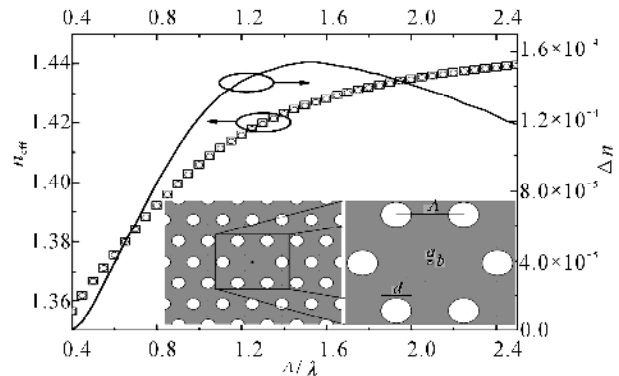


图 1 基于单椭圆孔微结构纤芯的光子晶体光纤基模有效折射率及双折射

Fig. 1 Effective indices of the fundamental modes and birefringence of the photonic crystal fiber based on single elliptical-hole fiber core

得到的光子晶体光纤基模有效折射率如图 1. 其中方格点和圆圈点分别表示 x 偏振和 y 偏振的基模有效折射率. 计算两个偏振方向的有效折射率之差, 得到光子晶体光纤的双折射如图 1 实线. 可以看出, 由于在光子晶体光纤纤芯中引入了微结构(椭圆孔), 使得光子晶体光纤的双折射最高达到了 1.5×10^{-4} .

1.2 双椭圆孔微结构

进一步的, 考虑在光子晶体光纤纤芯中引入两个微小椭圆孔的情况. 图 2(a)和(b)分别考虑了两个微小椭圆孔沿着 y 方向和 x 方向排列的情况. 椭圆孔的尺寸参量和上述相同, 当两个微小椭圆孔中心间距参量分别取 $D=2, 4, 6 \mu\text{m}$ 的情况下, 得到光子晶体光纤的双折射分别对应于图 2 中三角形、五角星、圆圈. 图示结果表明: 1) 微小椭圆孔沿着 x 方向排布有利于获得更大的双折射; 2) 对应特定的某一归一化频率, 存在一个优化的微小椭圆孔间距使得光纤双折射最大(比如, 当微小椭圆孔沿着 x 方向排布时, 光子晶体光纤在归一化频率为 1.5 的地方, 最大双折射对应的微小椭圆孔间距在 $4 \mu\text{m}$ 左右); 3) 相比于单个微小椭圆孔的情况, 双椭圆微结构的光子晶体光纤可以获得更大的双折射(大于单椭圆孔光子晶体光纤对应的双折射的 2 倍).

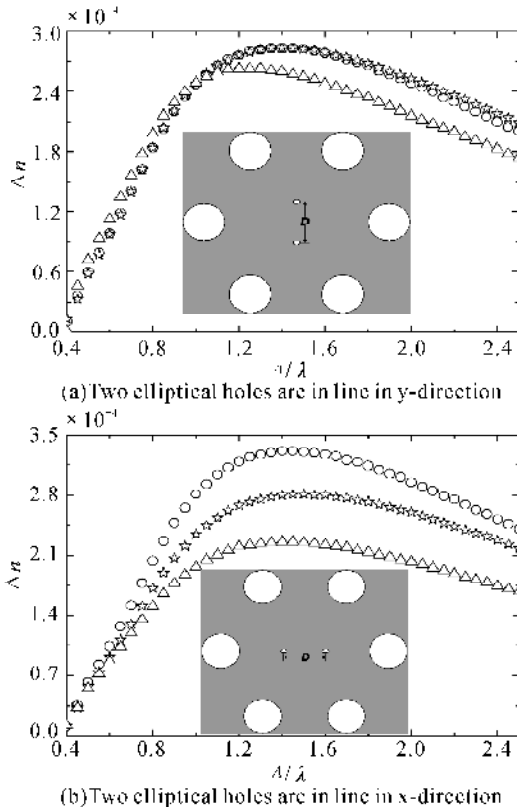


图 2 基于双椭圆孔微结构纤芯的光子晶体光纤双折射
Fig. 2 Birefringence of the photonic crystal fiber based on double elliptical-hole fiber core

1.3 三椭圆孔微结构

再考虑在光子晶体光纤纤芯中引入三个微小椭圆孔的情况. 图 3 中的插图给出了两种排列方式的光子晶体光纤结构, 纤芯中的三个椭圆呈正三角形分布, 尺寸参量和上述相同, 椭圆中心距离为 $4 \mu\text{m}$. 图 3 给出了三椭圆孔微结构纤芯的光子晶体光纤双折射, 其中插图 A 和 B 所示结构的光子晶体光纤双折射分别对应图中的方块和圆圈. 可以看出, 这两种排布方式对应的光子晶体光纤双折射基本相同, 说明了在多个微小椭圆孔情况下排布方式不是很重要, 而微小椭圆本身的参量主导了光子晶体光纤双折射特性.

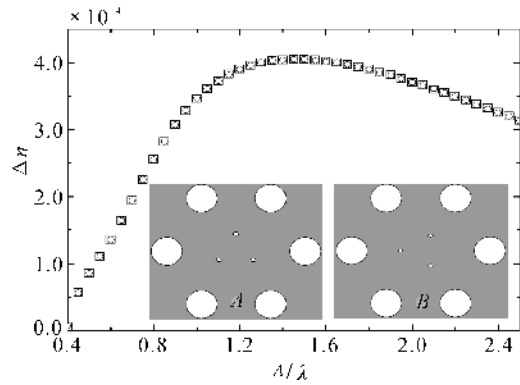


图 3 基于三椭圆孔微结构纤芯的光子晶体光纤双折射
Fig. 3 Birefringence of the photonic crystal fiber based on triple elliptical-hole fiber core

2 多椭圆孔微结构纤芯的光子晶体光纤

研究表明, 在光子晶体光纤纤芯中引入微小椭圆孔可以实现高双折射, 并且引入微小椭圆孔越多双折射越高. 因此本文设计了一种在纤芯中引入周期性排列的多个微小椭圆孔的高双折射光子晶体光纤, 其横截面结构如图 4 中的插图所示. 纤芯中分布有三环呈正三角形周期排布的微小椭圆孔阵列, 相邻椭圆孔的中心间距为 $2 \mu\text{m}$. 图 4 给出了采用三环

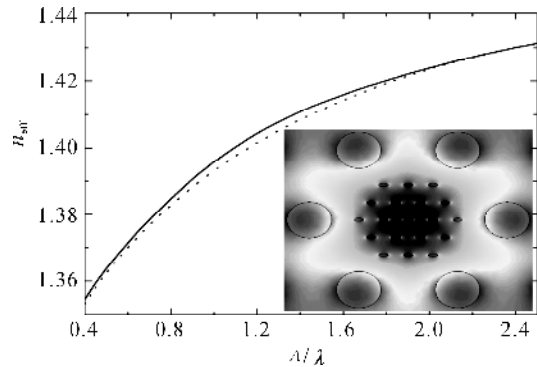


图 4 采用三环阵列椭圆孔微结构纤芯的光子晶体光纤的基模有效折射率
Fig. 4 Effective indices of the fundamental modes of the photonic crystal fiber based on the fiber core of three rings of arrays of elliptical air hole

椭圆孔微结构纤芯的光子晶体光纤的基模有效折射率,实线和虚线分别表示电场 x 偏振和 y 偏振的基模有效折射率.图 4 中的插图给出了归一化频率为 1.2 情况下的电场 x 偏振基模电场主分量的分布,可以看出基模的模斑形状和没有引入微小椭圆孔的情况相似.

研究结果表明,微小椭圆孔本身的参量对光子晶体光纤双折射特性起主导影响.图 5 给出了对应椭圆孔参量($a=0.8, b=0.3$; 圆圈)、($a=0.6, b=0.4$; 五角星)和($a=0.3, b=0.2$; 三角形)的光子晶体光纤双折射.从前两种椭圆参量对应的模拟结果来看:在相同的椭圆面积下,椭圆率越高获得的双折射越大.从图 5 中可以看出, $\eta=0.8/0.3=2.67$ 的情况下,光子晶体光纤的双折射可以达到 2.7×10^{-3} .进一步推论,在更高椭圆率(在实际制作光子晶体光纤时会有限制)的情况下,最高的双折射值可以进一步地提高.从后两种椭圆参量对应的模拟结果来看:在同样的椭圆率下,椭圆孔面积越大,最高的双折射值越大.然而,椭圆孔面积的增大会降低纤芯的有效折射率,当纤芯的有效折射率低于包层有效折射率时,光纤将无法维持导模,因此椭圆孔面积的增大有个上限.另外可以看到,在椭圆参量($a=0.3, b=0.2$)情况下,光子晶体光纤可以在一个较大归一化频率范围内(即较大的波长范围内)具有均匀的双折射.

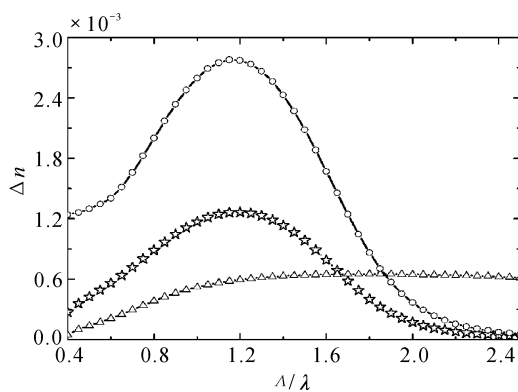


图 5 对应参量($a=0.8, b=0.3$; 圆圈)、($a=0.6, b=0.4$; 五角星)和($a=0.3, b=0.2$; 三角形)的光子晶体光纤双折射

Fig. 5 Birefringence of the photonic crystal fiber with the parameters of ($a=0.8, b=0.3$; circles), ($a=0.6, b=0.4$; pentacles) and ($a=0.3, b=0.2$; triangles)

3 结论

本文提出了一种获得高双折射光子晶体光纤的新方法,即在光纤纤芯中引入微小椭圆孔结构.采用全矢量有限元方法和完美匹配层条件,依次研究了光子晶体光纤在纤芯中引入单个、双个、三个微小椭圆孔情况下的双折射特性.研究结果表明,微小椭圆

孔主导了光子晶体光纤的双折射特性,其参量及个数对双折射有着重要的影响.增大椭圆面积、椭圆率可以进一步提高光子晶体光纤的双折射.最后,作为一个例子,本文设计了一种在纤芯中引入三环呈正三角形周期排布的微小椭圆孔阵列的光子晶体光纤,获得了高达 2.7×10^{-3} 的双折射.

参考文献

- [1] RUAN Shuang-chen, YANG Bing, ZHU Chu-yan, *et al.* Yb³⁺-doped double cladding photonic crystal fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33** (1):15-16.
阮双琛,杨冰,朱春艳,等. 2.2W 掺 Yb³⁺ 双包层光子晶体光纤激光器[J]. *光子学报*, 2004, **33** (1):15-16.
- [2] YANG Guang-qiang, ZHANG Xia, LIN Jian-fei, *et al.* The measurement of polarization mode dispersion in highly birefringent photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1133-1136.
杨广强,张霞,林健飞,等. 高双折射光子晶体光纤偏振模色散测量[J]. *光子学报*, 2005, **34**(8):1133-1136
- [3] YU Yong-Qin, RUANG Shuang-chen, ZENG Jian-chun, *et al.* Supercontinuum generation in photonic crystal fibers depends on pump wavelengths[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34** (9):1293-1296.
于永芹,阮双琛,曾剑春,等. 泵浦波长对光子晶体光纤产生超连续谱的影响[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9):1293-1296.
- [4] WU Wei-qing, CHEN Xiong-wei, 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.
- [5] LI Chun-lei, SHENG Qiu-qin. 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.
- [6] KUBOTA H, KAWANISHI S, KOYANAGI S, *et al.* Absolutely single polarization photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, **16**(1):182-184.
- [7] JU J, JIN W, DEMOKAN M S. Design of single-polarization single mode photonics crystal fibers at 1.30 and 1.55 μm [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, **24**(2): 825-830.
- [8] SANG X Z, CHU P L, YU C X. Applications of nonlinear effects in highly nonlinear photonic crystal fiber to optical communications[J]. *Opt Quantum Electron*, 2005, **37** (4): 965-994.
- [9] CHEN D R, QIN S, SHEN L F. An all-fiber multi-wavelength Raman Laser based on a PCF Sagnac loop filter[J]. *Microw Opt Technol Lett*, 2006, **48**(12): 2416-2418.
- [10] KIM D H, KANG J U. Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity[J]. *Opt Express*, 2004, **12** (19): 4490-4495.

- [11] HANSEN T P, BROENG J, LIBORI S E B, *et al.* Highly birefringent index-guiding photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, **13**(6): 588-590.
- [12] CHAUDHURI P R, PAULOSE V, ZHAO C, *et al.* Near-elliptic core polarization-maintaining photonic crystal fiber: modeling birefringence characteristics and realization [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, **16**(5): 1301-1303.
- [13] SAPULAK M, STATKIWVICZ G, OLSZEWSKI J, *et al.* Experimental and theoretical investigations of birefringent holey fibers with a triple defect[J]. *Appl Opt*, 2005, **44**(13): 2652-2658.
- [14] STEEL M J, OSGOOD R M. Elliptical-hole photonic crystal fibers[J]. *Opt Lett*, 2001, **26**(4): 229-231
- [15] STEEL M J, OSGOOD R M. Polarization and dispersive properties of elliptical-hole photonic crystal fibers [J]. *J Lightwave Technol*, 2001, **19**(4): 495-503.
- [16] ISSA N A, EIJKLENBORG M A, FELLEW M, *et al.* Fabrication and study of microstructured optical fibers with elliptical holes[J]. *Opt Lett*, 2004, **29**(12): 1336-1338.

Highly Birefringent Photonic Crystal Fibers Based on Micro-structured Fiber Core of Elliptical Holes

HE Zhong-jiao

(College of Information & Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310035, China)

Received date: 2006-11-23

Abstract: A method by employing elliptical micro-holes in the fiber core was proposed to achieve highly birefringent photonic crystal fibers (PCFs). Through employing a full-vector finite-element method (FEM) and anisotropic perfectly matched layers, the birefringence property of highly birefringent PCFs with single, double or triple micro-holes in the fiber core was investigated, respectively. Simulation results show that birefringence property of PCFs is mainly dominated by the micro-holes in the fiber core and the birefringence has important relationship with the number and the parameters of the micro-holes, which can be further enhanced by increasing the number, area and ellipticity of elliptical micro-holes. Finally a PCF based on the fiber core of three rings of arrays of elliptical air holes was proposed and investigated, whose birefringence could be up to 2.7×10^{-3} .

Key words: Photonic crystal fiber; Birefringence; Finite-element method; elliptical hole



HE Zhong-jiao was born in 1974, received Bachelor and Master degree in Department of Optical Engineering, Zhejiang University. He is now a lecturer in Information and Electron Engineering College, Zhejiang Gongshang University. His main interests are photonic crystal fiber and optical fiber communications.