

一种高双折射、低损耗的新型光子晶体光纤

谷芊志, 励强华

哈尔滨师范大学光学实验室, 黑龙江 哈尔滨 150025

摘要 设计了一种高双折射、低损耗的新型光子晶体光纤。基于全矢量有限元法,通过改变椭圆结构参量对该光子晶体光纤的有效折射率、双折射、色散、损耗和场特性进行分析。结果表明:改变椭圆率可以实现光纤在 1300~1500 nm 范围内色散点的控制;当椭圆率为 0.6 时,该光纤在 1550 nm 处可获得 2.55×10^{-2} 的高双折射,以及 2.4×10^{-2} dB/km 的低损耗;1300~1500 nm 范围内出现 1 个零色散点。此新型光纤的性能优于传统光纤,在光通信及光纤传感等领域有一定的应用前景。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;高双折射;色散;损耗

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.060603

Novel Photonic Crystal Fiber with High Birefringence and Low Loss

Gu Qianzhi, Li Qianghua

Optical Laboratory, Harbin Normal University, Harbin, Heilongjiang 150025, China

Abstract A novel photonic crystal fiber with high birefringence and low loss is designed. Based on full vector finite element method, the effective refractive index, birefringence, dispersion, loss and field properties of the photonic crystal fiber are analyzed when we change the elliptical structure parameters. Results show that dispersion point control of the novel fiber in the range from 1300 nm to 1500 nm can be realized when we change ellipticity. When the ellipticity is 0.6, the fiber has a high birefringence of 2.55×10^{-2} and low loss of 2.4×10^{-2} dB/km. A zero dispersion point appears in the range from 1300 nm to 1500 nm. Performance of the novel fiber is better than that of the traditional fiber, and it has a certain application prospect in the field of optical communications and optical fiber sensing.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; high birefringence; dispersion; loss

OCIS codes 060.5295; 260.1440; 260.2030

1 引言

光子晶体光纤(PCF)具有复杂的折射率分布,成为近年来的研究热点。PCF 因其不同排列的空气孔表现出优于普通光纤的一些性质,例如高双折射、低损耗单模偏振、多种色散^[1]及超连续谱的产生与控制等特性。具有高双折射的光子晶体光纤的保偏能力较强,具有低损耗的光纤对于光信号的传输有重要作用。

到目前为止,研究人员已经提出了多种结构的光子晶体光纤,他们均有较高的双折射特性及色散、低损耗特性。2012年,张亚妮等^[2]设计了一种同轴双芯六角点阵光子晶体光纤,其损耗接近 10^{-2} dB/km。2016年,周铭皓等^[3]提出了一种椭圆形高双折射光子晶体光纤,获得了 2.8×10^{-3} dB/km 的限制损耗。2012年,李德月等^[4]在光子晶体光纤中引入了六角形排列的不同大小空气孔,得到了 10^{-3} 数量级的双折射,此结构得到了较好的色散特性,但其双折射特性还可进一步提高。

本文利用有限元法优化设计了一种中心空气孔为椭圆包层结构的光子晶体光纤,调整其结构参数,当椭

收稿日期: 2017-01-12; 收到修改稿日期: 2017-02-21

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(ZD201401)

作者简介: 谷芊志(1990—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体光纤方面的研究。E-mail: 15663404288@163.com

导师简介: 励强华(1963—),男,博士,教授,主要从事光子晶体光纤方面的研究。E-mail: lqh0118@126.com(通信联系人)

圆率为 0.6 时,得到了 10^{-2} 的高双折射和 2.4×10^{-2} dB/km 的限制损耗;在 1300~1500 nm 范围内获得了 1 个零色散点。此新型光纤的性能优于传统光纤,在光通信及光纤传感等领域有一定的应用前景。

2 研究方法 with 结构模型

光子晶体光纤的分析方法有很多,如有效折射率法^[5]、全矢量平面波法^[6]、时域差分法^[7]及有限元法^[8]。此处采用全矢量有限元法,该方法可以用于不同形状空气孔排列的光子晶体光纤的计算,计算精度较高,建模比较方便,适用于各种复杂的光纤计算。

常见的光子晶体光纤为六边型,其横截面包括包层和纤芯两部分。基底材料为纯石英,包层是由圆形空气孔排列而成的三角晶格结构,纤芯为内层空气孔围成的区域。所设计的光子晶体光纤改良了常见光子晶体光纤的内层空气孔,增大了内层空气孔的直径,提高了其对光场的束缚能力。

改良的光子晶体光纤如图 1 所示,最内层椭圆空气孔的横向直径为 a ,纵向直径 b 为 $1.0 \mu\text{m}$,外层空气孔直径 d 为 $0.8 \mu\text{m}$,空气孔间距 Λ 为 $1.2 \mu\text{m}$ 。包层内部空气孔折射率为 1,基底折射率为 1.45。

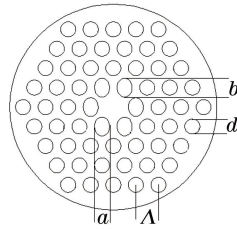


图 1 改良的光子晶体光纤截面图

Fig. 1 Sectional diagram of improved PCF

3 数值模拟与结果分析

将六边形光子晶体光纤中心处的一圈空气孔设计成椭圆形状,如图 1 所示。逐渐改变 a 的大小,使中心处空气孔的椭圆率 $\eta = a/b$ 逐渐改变,进而观察其功率分布、有效折射率、双折射、色散及损耗的变化。

3.1 功率分布

有限元法电磁波方程^[9]为

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times \mathbf{H} \right) = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \mu_r \mathbf{H}, \quad (1)$$

式中 H 为磁场强度, ϵ_r 、 μ_r 分别为介质的介电常数和磁导率, ω 为光波的角频率, c 为真空中的光速。利用 (1) 式和数值分析软件 COMSOL, 可得出场特性随波长改变的变化规律。图 2 为传输波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时功

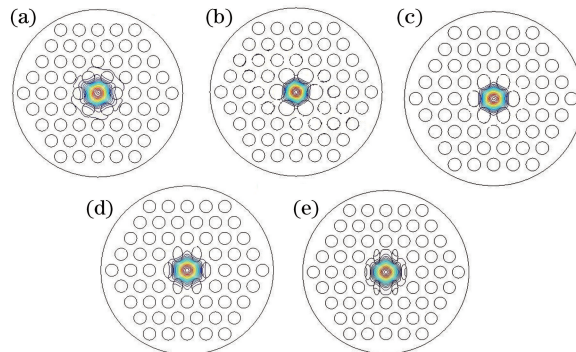


图 2 传输波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时功率分布与椭圆率的关系。

(a) $a = b = 0.8 \mu\text{m}$; (b) $b = 1.0 \mu\text{m}, \eta = 1.0$; (c) $b = 1.0 \mu\text{m}, \eta = 0.8$; (d) $b = 1.0 \mu\text{m}, \eta = 0.6$; (e) $b = 1.0 \mu\text{m}, \eta = 0.4$

Fig. 2 Relationship between power distribution and ellipticity with transmission wavelength of $1.55 \mu\text{m}$.

(a) $a = b = 0.8 \mu\text{m}$; (b) $b = 1.0 \mu\text{m}, \eta = 1.0$; (c) $b = 1.0 \mu\text{m}, \eta = 0.8$;

(d) $b = 1.0 \mu\text{m}, \eta = 0.6$; (e) $b = 1.0 \mu\text{m}, \eta = 0.4$

率分布与 η 的关系,其中(a)表示 $a=b=0.8 \mu\text{m}$ 、未改变大孔直径时横电磁模(HE_x 与 HE_y)合场强功率分布的情况;(b)~(e)表示 $b=1.0 \mu\text{m}$ 、未改变外部空气孔形状和大小的情况下, η 分别为 1.0,0.8,0.6,0.4 时椭圆空气孔对光纤功率分布的影响。对比图 2(a)、(b)可以看出,随着中心空气孔逐渐增大,能量被很好地束缚在纤芯中,功率较为集中,在一定程度上降低了功率分布分散所造成的损耗。加入椭圆空气孔后,随着 η 的减小, HE_x 方向对场的束缚能力变弱,且其在 HE_y 方向上逐渐扩散,在一定程度上提高了由于椭圆空气孔带来的不对称性造成的双折射效应,但随着 η 的减小损耗也在逐渐增加。

3.2 基模有效折射率

基模有效折射率是波长的函数,结合 Sellmeier 公式,当归一化直径 $d/\Lambda=0.333$ 、 $b=0.5 \mu\text{m}$,且在 HE_x 、 HE_y 混合偏振模式下,随着 η 从 0.4 以步长 0.2 增加到 1.0,有效折射率整体减小,同一波长处对应的有效折射率逐渐减小。图 3 为 η 不同时有效折射率随波长的变化,由图可见,随着波长的逐渐增加,该光子晶体光纤的折射率出现由大逐渐减小的趋势。随着 η 的逐渐增大,光子晶体光纤包层的空气孔逐渐增大,这是使光纤有效折射率减小的主要原因。

图 4 为 $\eta=0.4$ 且在 HE_x 、 HE_y 混合偏振模式下的有效折射率曲线。由图可见,在 HE_y 偏振模式下有效折射率发生突变,原因是 $\eta=0.4$ 时对 y 方向上场的束缚能力较弱,场在 y 方向发生了溢漏,产生突变,这也是图 3 中 $\eta=0.4$ 情况下曲线产生突变的原因。

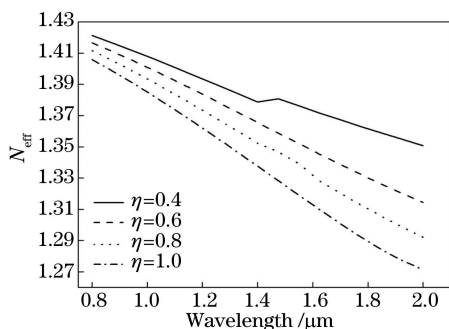


图 3 η 不同时有效折射率随波长的变化
Fig. 3 Variation of effective refractive index with wavelength at different η

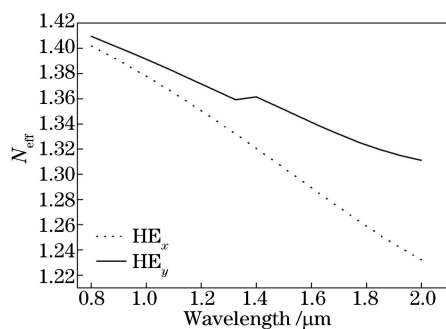


图 4 $\eta=0.4$, HE_x 、 HE_y 混合偏振情况下有效折射率随波长的变化
Fig. 4 Variation of effective refractive index with wavelength in the case of $\eta=0.4$ and polarizations of HE_x and HE_y

3.3 双折射特性

图 5 为光子晶体光纤的双折射特性随波长及 η 的变化曲线, B 表示模式双折射^[10],即 x 、 y 方向基模有效折射率的差,是衡量光纤偏振特性的重要参数,可以表示为

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

式中 $n_{\text{eff},x}$ 、 $n_{\text{eff},y}$ 分别代表 x 、 y 方向基模的有效折射率, Re 代表实部。

由图 5 可见,当波长一定时,中心处包层 η 的变化对双折射有重要的影响, η 越大光子晶体光纤的双折射越低,当 $\eta=1.0$ 时光纤的双折射几乎为 0。这主要是因为 η 逐渐增大时,该光子晶体光纤内部逐渐成为对

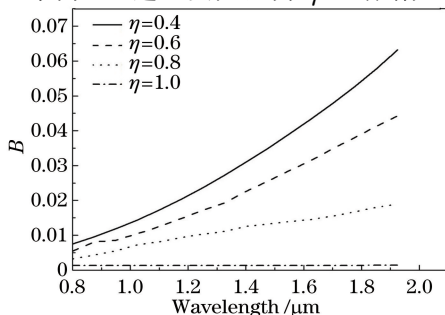


图 5 η 不同时,双折射随波长的变化
Fig. 5 Variation of birefringence with wavelength at different η

称性结构,因而双折射逐渐降低; $\eta=1.0$ 时为完全对称的光子晶体光纤,因此不具有双折射特性。从图5中还可以发现,此光子晶体光纤的双折射基本可达到 10^{-2} 的数量级,在 $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$ 、 $\eta=0.6$ 时双折射为0.0285,满足高双折射的要求,且双折射随着传输波长的增加而增加。光纤的偏振特性受光纤双折射的影响,较高的双折射特性可以应用于对偏振性要求较高的精密光纤传感器等。

3.4 色散特性

在得到有效折射率 n_{eff} 的基础上,利用其实部和光纤的色散波导公式^[11]

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

结合 MATLAB 曲线拟合法对此光子晶体光纤的色散进行仿真,结果如图6所示。

从图6中可以看出,该光子晶体光纤在 $0.8\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 波段之间出现了1个色散点,且随着 η 的增大,色散零点向短波方向移动; $\eta=0.4$ 时色散零点在 $1.475\sim 1.4\ \mu\text{m}$ 附近,且 $\eta=1.0$ 时色散零点在 $1.25\sim 1.175\ \mu\text{m}$ 附近。通过控制 η 来控制色散零点的变化,可为光通信在 $1300\sim 1500\ \text{nm}$ 处的传输提供参考。

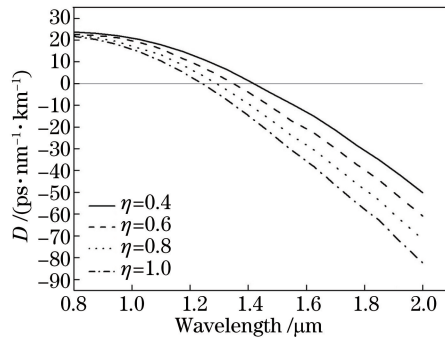


图6 η 不同时色散随波长的变化

Fig. 6 Variation of dispersion with wavelength at different η

3.5 损耗特性

由图2可知,随着椭圆率的逐渐变小,空气孔对功率的束缚能力逐渐减弱,损耗不断增大,因此实现较低的损耗特性对实现光通信的传输有重要意义^[12]。为了达到较低的损耗,结合 n_{eff} 的虚部与模约束损耗^[13]

$$\mathcal{L}_c(\lambda) = \frac{2 \times 10^7}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (4)$$

进行图像仿真,可得到不同 η 时约束损耗随波长的变化,如图7所示。由图7可见,波长为 $1.2\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 时随 η 的减小,损耗快速增加。当 $\eta=1.0$ 、 $\lambda > 1.8\ \mu\text{m}$ 时,损耗突然增加,这是由于随着波长的增加场特性不断变化,进而发生场溢漏,导致损耗的增加。

图8为图7在波长为 $1.35\sim 1.70\ \mu\text{m}$ 处的扩大图像,由图可见, $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$ 、 $\eta=0.6$ 时损耗为 $2.4 \times 10^{-2}\ \text{dB/km}$,比文献[3]的结果高出1个数量级,较低损耗的光子晶体光纤对远距离光传输的实现很有帮助。

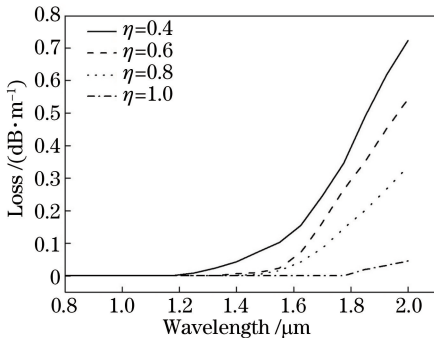


图7 η 不同时损耗随波长的变化

Fig. 7 Variation of loss with wavelength at different η

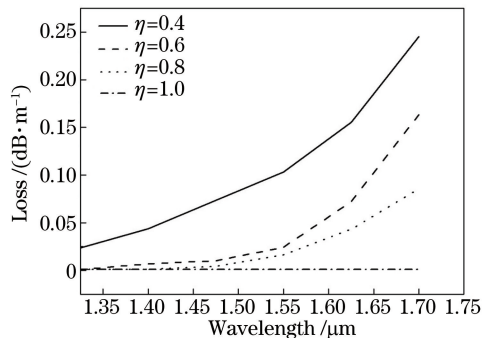


图8 波长 $1.35\sim 1.70\ \mu\text{m}$ 范围内 η 不同时损耗随波长的变化

Fig. 8 Variation of loss with wavelength at different η when wavelength is in range from $1.35\ \mu\text{m}$ to $1.70\ \mu\text{m}$

4 结 论

基于全矢量有限元法,针对光纤通信及光纤传感系统中高双折射、色散零点控制、低损耗的应用需求,设计了一种新型光子晶体光纤。对该模型的数值分析表明,通过改变椭圆率的大小可以实现对光纤在 1300~1500 nm 范围内的色散点控制;该光纤在椭圆率为 0.6 的情况下可实现 2.8×10^{-2} 的高双折射,提高了保偏光纤的偏振质量,且在该椭圆率下得到了 2.4×10^{-2} dB/km 的限制损耗。结果表明,所设计光纤的性能优于现有的传统光纤,在光通信以及光纤传感等方面具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Wang Wei, Yang Bo, Song Hongru, *et al.* Characteristic analyses of high birefringence and two zero dispersion points photonic crystal fiber with octagonal lattices[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(14): 144601.
王伟, 杨博, 宋鸿儒, 等. 八边形高双折射双零色散点光子晶体光纤特性分析[J]. *物理学报*, 2012, 61(14): 144601.
- [2] Zhang Yani. Design and optimization of low-loss low-nonlinear high negative-dispersion photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(8): 084213.
张亚妮. 低损低非线性高负色散光子晶体光纤的优化设计[J]. *物理学报*, 2012, 61(8): 084213.
- [3] Zhou Minghao, Huang Yonglin. Highly birefringent photonic crystal fiber based on elliptic layer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(3): 0306002.
周铭皓, 黄勇林. 椭圆高双折射光子晶体光纤的双折射及损耗研究[J]. *光子学报*, 2016, 45(3): 0306002.
- [4] Li Deyue, Zhou Guiyao, Xia Changming, *et al.* Theoretical investigation of photonic crystal fiber with highly nonlinear and birefringent[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1105003.
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.
- [5] Zhang Desheng, Dong Xiaoyi, Zhang Weigang, *et al.* Studies on the dispersion in photonic crystal fiber using the step effective index model[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(3): 1235-1240.
张德生, 董孝义, 张伟刚, 等. 用阶跃有效率模型研究光子晶体光纤的色散特性[J]. *物理学报*, 2005, 54(3): 1235-1240.
- [6] Fang Hong, Lou Shuqin, Guo Tieying, *et al.* Novel high birefringence photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 0202-0206.
方宏, 娄淑琴, 郭铁英, 等. 一种新型结构高双折射光子晶体光纤[J]. *光学学报*, 2007, 27(2): 0202-0206.
- [7] Zhao Yan, Shi Weihua, Jiang Yuejin. Effect of defects outside the centre on dispersive properties of photonic band gap guiding photonic crystal fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(9): 6279-6283.
赵岩, 施伟华, 姜跃进. 中心外缺陷对带隙型光子晶体光纤色散特性的影响[J]. *物理学报*, 2010, 59(9): 6279-6283.
- [8] Song Jingming, Sun Kang, Xu Xiaobin. Scattering loss analysis and structure optimization of hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(11): 1105003.
宋镜明, 孙康, 徐小斌. 空芯光子带隙光纤散射损耗特性及结构优化特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1105003.
- [9] Wang Erlei, Jiang Haiming, Xie Kang, *et al.* Photonic crystal fibers with high nonlinearity, large birefringence and multiple zero dispersion-wavelength[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(13): 134210.
王二垒, 姜海明, 谢康, 等. 一种高双折射高非线性多零色散波长光子晶体光纤[J]. *物理学报*, 2014, 63(13): 134210.
- [10] Li Shanshan, Zhang Hao, Bai Jinjun, *et al.* Ultrahigh birefringence terahertz porous fibers based on interlacing layered infiltration method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(15): 154201.
李珊珊, 张昊, 白晋军, 等. 隔行分层填充的太赫兹超高双折射多孔光纤[J]. *物理学报*, 2015, 64(15): 154201.
- [11] Shi Weihua, Wang Mengyan. Generation and control of supercontinuum in photonic crystal fiber with three-zero dispersion wavelengths[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0805009.
施伟华, 王梦艳. 三零色散光子晶体光纤中超连续谱的产生与控制[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0805009.

- [12] Cao Ye, Wang Jiangyun, Tong Zhengrong. High birefringence and low confinement loss photoic crystal fiber with multiple zero dispersion points based on micro-structured core[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905005.
曹 晔, 王江昀, 童峥嵘. 基于微结构纤芯的超低损耗多零色散点的高双折射光子晶体光纤[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905005.
- [13] Cao Yuan, Shi Weihua, Xu Guanjie, *et al.* Design of bend-resistant large-mode-area dual-mode photonic crystal fiber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 100602.
曹 原, 施伟华, 徐冠杰, 等. 抗弯曲大模场面积双模光子晶体光纤的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 100602.