

doi: 10.3788/gzxb20164501.0106002

石墨烯包层结构光子晶体光纤的高双折射特性

吴宵宵, 范万德, 廖文英, 唐文海, 隋佳男, 曹学伟, 李乙钢

(南开大学 物理科学学院, 天津 300071)

摘要: 将 PG 玻璃材料制作成的椭圆纤芯引入光子晶体光纤中心, 设计了一种石墨烯包层结构的高双折射光子晶体光纤. 基于有限元法对该光纤的双折射特性进行了数值模拟, 研究了光纤孔径比、孔间距和纤芯椭圆对双折射特性的影响, 并以该光子晶体光纤的模场面积和限制性损耗为依据进行了优化. 研究表明: 在波长 1 550 nm 处, 光纤双折射率高达 0.13, 满足高双折射要求; 两偏振方向模场面积小于 $0.7 \mu\text{m}^2$, 限制性损耗低于 10^{-6} dB/km. 该光纤可有效保持光在传输系统中的偏振状态, 为高稳定性超连续谱的产生提供依据.

关键词: 高双折射; 石墨烯包层结构; 光子晶体光纤; 椭圆纤芯; 有限元法

中图分类号: O437

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0106002-4

High Birefringence in Graphene Structure Photonic Crystal Fiber

WU Xiao-xiao, FAN Wan-de, LIAO Wen-ying, TANG Wen-hai, SUI Jia-nan,

CAO Xue-wei, LI Yi-gang

(School of Physics, College of Science, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: By introducing the elliptical hole doped with PG glass into the core of photonic crystal fiber, a graphene structure photonic crystal fiber with high refractive index was proposed. Numerical simulation based on finite element analysis was performed to calculate birefringence in the proposed structure with implementation of different parameters. The effects of air aperture ratio, hole pitch and fiber core ellipse on the fiber's birefringent characteristics were studied. Meanwhile, the optimization was performed by the mode areas and confinement loss of photonic crystal fiber. The results show that, at 1 550 nm wavelength, the high birefringence is 0.13, while mode areas are less than $0.7 \mu\text{m}^2$ and the confinement loss are less than 10^{-6} dB/km in two modes. The fiber efficiently can protect the polarization in light transmission, providing basis for the realization of super-continuum spectrum of high-stability.

Key words: High birefringence; Graphene cladding structure; Photonic crystal fibers; Elliptical hole; Finite element method

OCIS Codes: 060.2420; 060.5295; 060.2400; 060.2310

0 引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)^[1]是一种依赖于微型结构材料的新型光纤, 结构灵活多变, 具有近零色散平坦、小模场面积、高非线性、低损耗等优点. 光纤受到不对称应力, 导致光波导的各向异性, 因光弹效应引起光的偏振态在传输过程中无规则变化, 产生波导偏振双折射. 对于光子晶体光纤, 在受到应力作用时, 光纤包层空气孔产生形变, 引起折射率分

布的变化, 从而影响其传输特性. 高双折射光纤有利于解决这种问题, 在通讯和传感系统中具有广泛的应用前景^[2]. 尤其近年来, 光纤陀螺在军事领域、民用领域中取得了巨大的发展, 制作高双折射光子晶体光纤显著提高了光纤陀螺的准确度, 有利于光纤陀螺的微型化, 为航空航天和军事提供高性能传感器^[3].

光纤的双折射特性由光纤截面结构的非对称性引起. 2000 年, A. Ortigosa-Blanch 首次提出了高双折射光子晶体光纤^[4], 并得到 3.7×10^{-3} 的双折射, 比传统

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 11174154, 11074131)和国家基础科学人才培养基金(No. J1103208)资助

第一作者: 吴宵宵(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为现代光纤光学. Email: 987719247@qq.com

导师(通讯作者): 范万德(1966-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为现代光通信与光纤传感, Email: wdfan@nankai.edu.cn

收稿日期: 2015-07-09; 录用日期: 2015-09-02

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

保偏光纤高一个数量级. 通过对包层空气孔排列或纤芯形状的调整, 打破光纤结构的圆对称性, 实现了光纤的双折射特性. 如今光子晶体光纤的双折射率^[5-7]能够达到 $\times 10^{-2}$. 可通过在包层空气孔中采用两种不同的直径^[8]将纤芯引入椭圆空气孔^[9-10], 或采用纤芯掺锗高非线性保偏光纤^[11]等方式来增大光纤双折射. 新型高双折射微结构光纤包层中空气孔采用椭圆形、葡萄柚形^[12]等, 仅由包层孔的不对称性^[13]获得双折射一般比传统保偏光纤高一个数量级. 包层孔采用椭圆形可进一步加强光纤包层的不对称性, 使双折射增加到 10^{-2} 量级, 但限制性损耗较高.

本文设计了一种新型高双折射光子晶体光纤, 包层空气孔按石墨烯结构排列, 纤芯为填充了 PG ($80\text{PbO} \cdot 20\text{Ga}_2\text{O}_3$) 玻璃材料的椭圆芯, 包层结构易于排列, 并可采用传统工艺拉制, 在波长 1 550 nm 处, 模式双折射率 B 高达 0.13, 比普通椭圆纤芯光纤^[14]提高了一个数量级, 两偏振方向模场面积小于 $0.7 \mu\text{m}^2$, 限制性损耗控制在 10^{-6} 量级.

1 结构设计和基本理论

双折射光子晶体光纤结构见图 1, 基底采用 SiO_2 材料, 包层采用圆形空气孔, 排列方式基于石墨烯结构, 中心引入椭圆形状纤芯. 石墨烯包层结构呈六角蜂巢结构周期性排列, 其 y 轴方向空气孔排列方式和数量均与 x 轴方向不同, 具有六重旋转对称性和平移对称性. 同时, 椭圆纤芯的设计使两轴向线偏振光传输时产生相位差, 以获取更高的双折射. 包层圆形空气孔直径为 d , 相邻空气孔间距为 Λ , 中心缺失一个圆形空气孔, 采用高折射率材料填充的椭圆代替形成纤芯, 椭圆长轴为 d_y , 椭圆率 $\eta = d_y/d_x$, 纤芯材料 PG^[15] 玻璃 ($80\text{PbO} \cdot 20\text{Ga}_2\text{O}_3$) 具有高折射率和高热稳定性的优良特性. 所设计的光子晶体光纤空气孔形状采用有序排列的圆形, 且大小均匀, 所以从拉制光纤的传统工艺角度来说并不增加难度.

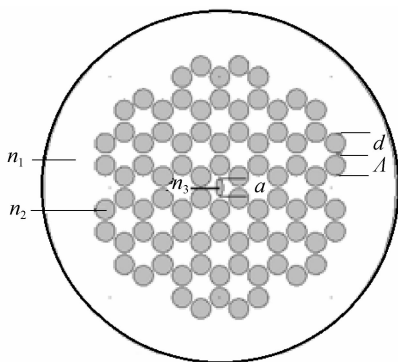


图 1 双折射光子晶体光纤结构

Fig. 1 Structure of high birefringence photonic crystal fiber
二氧化硅基底折射率为 n_1 由 Sellmeier 方程给出, 即

$$n_i(\lambda) = \left[1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \lambda^2}{\lambda^2 - b_i^2} \right] \quad (1)$$

式中 a_i^2, b_i^2 为材料的折射率系数.

PG 玻璃材料折射率 n_3 为^[15]

$$n(\lambda) = \frac{A}{\lambda^4} + \frac{B}{\lambda^2} + C + D\lambda^4 + E\lambda^3 \quad (2)$$

式中, A, B, C, D, E 为 PG 折射率曲线系数, $A = 4.8503 \times 10^{-3}, B = 3.1819 \times 10^{-2}, C = 2.1627, D = -2.0276 \times 10^{-3}, E = 1.5045 \times 10^{-5}$. λ 单位为 nm. 材料色散可根据折射率推出, 1 550 nm 处 PG 玻璃材料折射率为 2.172, 材料色散系数为 $-180.33 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$. 在完全对称情况下, 单模光传输两个相互垂直偏振的模式, 两者模式简并. 这两个基模具有相同的传播常量, 即具有相同有效折射率. 但因为几何形状的不完全对称与光纤内部受力不平衡, 光纤中存在几何双折射与应力双折射两种双折射现象. 光子晶体光纤双折射的大小用模式双折射 B 来衡量, B 为两个偏振模式下的有效折射率差, 双折射 B 越大, 两偏振模式之间耦合系数越小, 越有利于线性偏振模式, 即越有利于偏振态的保持, B 的表达式为

$$B = |\text{Re}(n_{\text{eff}}^x) - \text{Re}(n_{\text{eff}}^y)| \quad (3)$$

采用有限元法模拟得到光子晶体光纤基模两个偏振方向的有效折射率 n_{eff}^x 和 n_{eff}^y , 通过比较包层旋转不同角度下的折射率曲线, 得到当包层与纤芯的 y 轴方向重合时能够得到更大的双折射, 结构如图 2. 同时, 两偏振方向的有效折射率能够得到模场面积 A_{eff} 为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\iint I(x, y) dx dy \right]^2}{\iint I^2(x, y) dx dy} \quad (4)$$

式中 $I(x, y)$ 是基模的光场能量分布. 因为光子晶体光纤的结构灵活可变, 光纤有效模场面积与非线性系数呈反比, A_{eff} 可以通过结构设计控制在微米量级, 这是提高光子晶体光纤非线性的有效方式, 对双折射光子晶体光纤产生超连续谱具有重要意义.

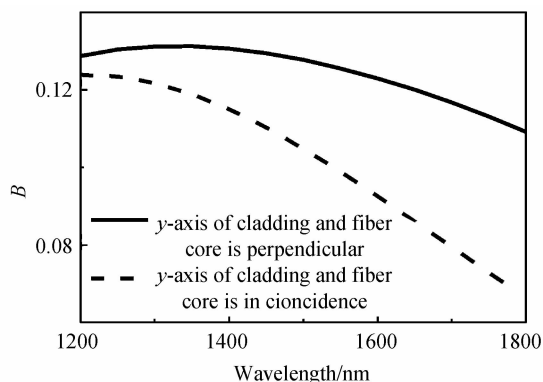


图 2 包层两种旋转角度下的双折射曲线

Fig. 2 Birefringence against direction of rotation

2 光纤结构及特性

对于横截面空气孔排列方式一定的双折射光子晶体光纤,其传输特性由结构参量径比 d/Λ 、孔间距 Λ 、椭圆长轴 d_x 、短轴 d_y 共同决定。

本文设计的新型光子晶体光纤空气孔直径 $d = 1.08 \mu\text{m}$,孔间距 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$,纤芯椭圆长轴 $d_y = 1.2 \mu\text{m}$,椭圆率 $\eta = d_y/d_x = 2.5$. 光纤双折射曲线如图 3,随着波长的增大,光子晶体光纤的椭圆度增大,两个偏振方向的有效折射率差增大,当波长增大到与纤芯尺寸相当后,能量产生泄露,双折射减小. 在波长为 1550 nm 处,双折射值为 0.1314 ,处于峰值位置,两偏振方向模场面积分别低至 $0.6265 \mu\text{m}^2$ 和 $0.4340 \mu\text{m}^2$. 图 3 中两个插图分别是 x 和 y 偏振方向基模模场图,可以看出光场能量被很好地限制在纤芯,限制性损耗分别在 10^{-6} dB/km 量级和 10^{-7} dB/km 量级,光纤具有极低的损耗,满足高双折射和小模场面积的特征,有利于在保持光的偏振特性的同时为超连续谱光源的产生提供可靠的依据。

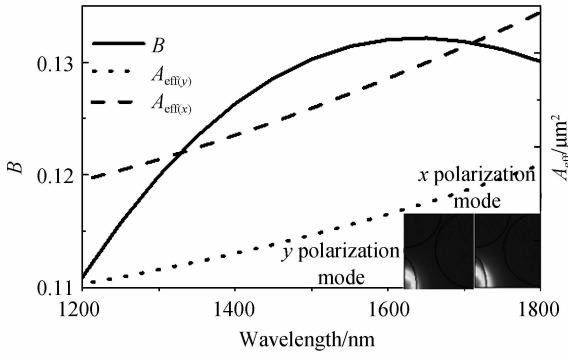


图 3 光子晶体光纤的双折射和模场特性曲线
Fig. 3 Birefringence and mode areas curves of photonic crystal fiber

2.1 空气孔径比对光纤双折射特性的影响

图 4 为空气孔间距 $\Lambda = 1 \mu\text{m}$ 、椭圆参量不变情况下,空气孔径比分别为 $d/\Lambda = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ 的双折射曲线. 光子晶体光纤对短波的局限能力较强,短波光波传播时其模场区域更靠近纤芯,波长的增加使得有效折射率逐渐减小. 孔径比的增大使空气孔所占面积增大,纤芯区域占比减小,光更多地在空气孔中传播,导致有效折射率随着孔径比的增大减小. 从图 4 可知,对于一定结构参量的光子晶体光纤,存在一固定波长 λ ,当波长小于 λ 时,双折射随着波长增大同步增大,此后双折射逐渐变小,这是因为光纤对短波的强束缚能力将基模模场限制在纤芯中央,光纤的非对称性在这种强作用下并不能对基模模场造成很大影响,随着波长的增大,基模模场在纤芯所占比例慢慢变大,双折射光纤对其影响慢慢增大,表现为光纤双折射的增大;当波长大于特定值后,基模模场不能被很好地

限制在纤芯,一部分模场能量外扩到了包层中去,高折射率椭圆纤芯的非对称作用相比于包层的非对称性要强,因此当模场随着波长的增大向纤芯外扩散时,光子晶体光纤双折射逐渐减小. 另一方面,包层空气孔增大能够有效阻止纤芯能量的泄露,较大的孔径比能够较基模更好地束缚在纤芯中,纤芯束缚能力的增大带来了双折射的提高. 波长在 $1000 \text{ nm} \sim 2000 \text{ nm}$ 范围内,孔径比越小,双折射效应越大,且越平坦,在双折射峰值处可取到 10^{-1} 量级,拥有很好的双折射效应。

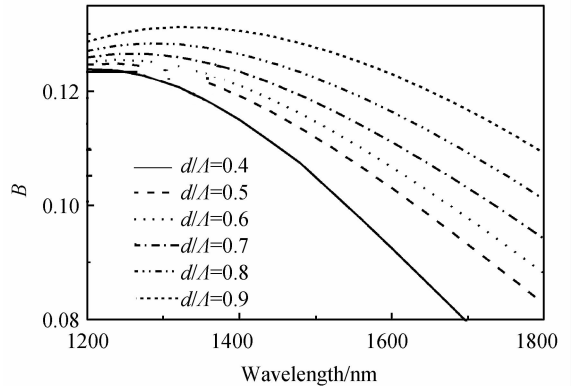


图 4 双折射随孔径比变化
Fig. 4 Birefringence against aperture ratio

2.2 孔间距对光纤双折射特性的影响

固定各参量比例不变,即固定孔径比 $d/\Lambda = 0.9$ 、中心椭圆长轴长和空气孔直径比为 $8/9$ 、椭圆率 $\eta = 2.5$ 不变,孔间距取 $0.8 \mu\text{m}, 1.0 \mu\text{m}, \Lambda = 1.2 \mu\text{m}, 1.6 \mu\text{m}, 1.8 \mu\text{m}, 2.0 \mu\text{m}$,可实现光纤按比率增大. 空气孔间距按比例增大时,纤芯横截面的面积增大,更多的光被限制在纤芯,两偏振方向有效折射率增大,对其处理得到双折射曲线,如图 5. 双折射随波长先增大,后减小,随着孔间距的增大向右移动,因为随着波长的增大,光纤基模的椭圆度变大,使得两个偏振方向的有效折射率差也越大. 在波长值大到一定程度后,随着波长的继续增大有效折射率平稳后减小,是因为光子晶体光纤的拍长达到最小值导致了双折射达到了最大值. 当孔间距为 $1.2 \mu\text{m}$ 时,波长为 1550 nm 处,峰值达 0.12 以上。

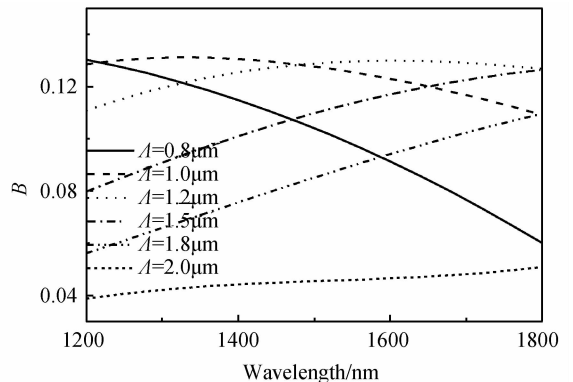


图 5 双折射随孔间距的变化
Fig. 5 birefringence against hole pitch

2.3 纤芯椭圆长轴对光纤双折射特性的影响

固定其他参量不变,改变椭圆长轴长为 0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0 μm 。由图 6 可知,随着椭圆长轴的增大,双折射提高,这是因为高折射率椭圆纤芯对光子晶体光纤对称性的破坏最大,当椭圆占比增大时,光纤非对称部分占比增大,不对称性增强,导致光子晶体光纤的双折射增大。另一方面,双折射峰值对应的波长随着椭圆纤芯尺寸的增大向长波移动,因为在基模场全部限制在纤芯的情况下,面积与椭圆纤芯面积越接近的模场能表现出更好的双折射效应,相对纤芯面积过小的模场受光纤非对称性影响很小,基模面积大于纤芯时则由于部分模场能量外扩至包层减弱了双折射效应,根据这一规律,可以通过适当调整纤芯的尺寸得到特性波长的高双折射效应。

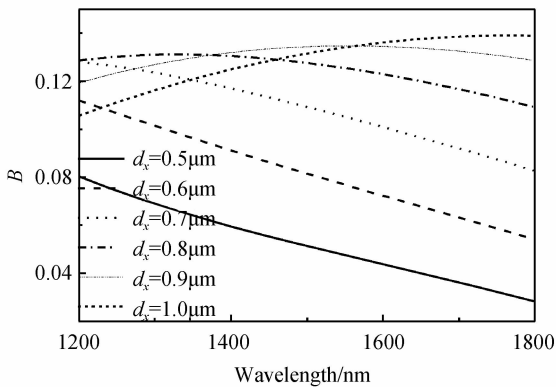


图 6 双折射随椭圆长轴变化

Fig. 6 Birefringence against length of long axis

3 结论

引入石墨烯包层结构和高折射率椭圆纤芯,设计了一种高双折射的光子晶体光纤,利用有限元法对光子晶体光纤的有效折射率、有效模场面积和限制性损耗特性进行数值模拟,在波长 1550 nm 处,双折射率高达 0.13。已有文献表明,中心椭圆缺陷空气孔 PCF 在 1550 nm 处双折射为 5.49×10^{-2} ^[14],葡萄柚空气孔包层 PCF 双折射峰值为 2.42×10^{-2} ^[12],本文所设计的 PCF 比文献[12,14]提高了一个数量级,满足高双折射要求;两偏振方向有效模场面积小于 $0.7 \mu\text{m}^2$,限制性损耗能有效控制在 10^{-5} dB/km 以内,这为设计高非线性光子晶体光纤奠定了基础,为高稳定性的超连续谱的产生提供了依据,在光纤通讯和传感等领域具有重要的应用价值。

参考文献

[1] RUSSELL P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, **299** (5605): 358-362.
 [2] CHEN D, WU G. Highly birefringent photonic crystal fiber based on a double-hole unit[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**

(9):1682-1686.
 [3] YIN Jian-ling, LU Jun, LIU Jun. Photonic crystal fiber and its applications in fiber optic gyroscope[J]. *Sensor World*, 2010, **16**(05): 6-10.
 殷建玲, 鲁军, 刘军. 光子晶体光纤及其在光纤陀螺中的应用[J]. *传感器世界*, 2010, **16**(05):6-10.
 [4] ORTIGOSA B A, KNIGHT J C, W J, *et al.* Highly birefringent photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(18): 1325-1327
 [5] FU Bo, LI Shu-Guang, YAO Yan-Yan, *et al.* Coupling characteristics of dual-core high birefringence photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(11): 7708-7715.
 付博, 李曙光, 姚艳艳, 等. 双芯高双折射光子晶体光纤耦合特性研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(11): 7708-7715.
 [6] ZHANG Lei, LI Shu-Guang, YAO Yan-Yan, *et al.* Characteristics of nano-structured photonic crystal fibers with high birefringence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(2): 1101-1107.
 张磊, 李曙光, 姚艳艳, 付博, 张美艳, 郑义. 高双折射纳米结构光子晶体光纤特性研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(2): 1101-1107.
 [7] LI Xiao-yan, HUANG Yong-li. Investigation on high birefringence photonic crystal fiber [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, **36**(02):250-254.
 李小燕, 黄勇林. 高双折射光子晶体光纤及其特性研究[J]. *半导体光电*, 2015, **36**(02):250-254.
 [8] HANSEN K P, JENSEN J R, JACOBSEN C, *et al.* highly nonlinear photonic crystal fiber with Zero-Dispersion at 1.55 μm [J]. *Nonlinear Optics*, 2003, **11**(13): 1503-1509.
 [9] WANG Jiang-yun, CAO Ye, LU Yan-jie, *et al.* A novel high birefringent photonic crystal fiber based on schott glass[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(7): 0706020.
 王江响, 曹晔, 逯艳杰, 等. 一种基于肖特玻璃的新型高双折射光子晶体光纤[J]. *光子学报*, 2014, **43**(7): 0706020.
 [10] JIANG Ling-hong, ZHENG Yi, ZHENG Kai, *et al.* Investigation of a liquid-core photonic crystal fiber with high birefringence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 906003.
 姜凌红, 郑义, 郑凯, 等. 液芯高双折射率光子晶体光纤的特性研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(9): 906003.
 [11] HSU J M, YE G S, YE D L. Birefringence and loss consideration for a highly birefringent photonic crystal fiber [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2012, **31**(1):11-22.
 [12] SU Wei, LOU Shu-Qin, ZOU Hui, *et al.* Highly birefringent ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF photonic quasi-crystal fiber with twin grapefruits holes[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(14): 144202.
 苏伟, 娄淑琴, 邹辉, 等. 一种带葡萄柚空气孔的高双折射 ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF 光子准晶光纤[J]. *物理学报*, **63**(14): 144202.
 [13] FANG Hong, LOU Shu-qin, GUO Tie-ying, *et al.* Novel-high birefringence photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **27**(2): 202-206.
 方宏, 娄淑琴, 郭铁英, 等. 一种新结构高双折射光子晶体光纤[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 202-206.
 [14] JIANG Ling-hong, ZHENG Yi, HOU Lan-tian, *et al.* Design and optimization of highly birefringent PCF with low effective mode area [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, **34**(6):990-994.
 姜凌红, 郑义, 侯蓝田, 等. 低有效模场面积的高双折射 PCF 的优化设计[J]. *半导体光电*, 2013, **34**(6): 990-994.
 [15] TAKAYUKI M, SHIGERU F, HIROMICHI T, *et al.* Refractive index and material dispersions of multi-component oxide glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1996, **210**(1997):155-162.