

一种近红外波段的高双折射高非线性光子晶体光纤

杨天宇, 姜海明*, 王二垒, 谢康*

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:提出了一种具有中心缺陷孔的新型非对称椭圆光子晶体光纤,采用全矢量有限元法研究了其双折射、色散和非线性等特性。通过改变第一层椭圆孔的角度,加强了结构的双折射性能,同时还能改善结构的色散表现。分析计算结果得出,设计合适的结构参数可在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处获得 3.05×10^{-2} 的高双折射,同时在 X 和 Y 偏振方向获得较高非线性系数。此外,在保持高双折射的同时,此 PCF 也可获得 $1000 \sim 1550 \text{ nm}$ 近 550 nm 的负色散平坦区。该新型近红外波段的高双折射高非线性负平坦色散的光子晶体光纤在偏振控制、非线性光学及光纤通信等领域具有广泛的应用前景。

关键词:光子晶体光纤;全矢量有限元法;双折射;非线性

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A

Photonic crystal fibers with large birefringence and high nonlinearity in near-infrared band

YANG Tian-Yu, JIANG Hai-Ming*, WANG Er-Lei, XIE Kang*

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, HeFei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A novel type of asymmetric elliptical-hole photonic crystal fiber (PCF) with a central defect hole was proposed. The full vector finite element method was adopted to investigate its birefringence, dispersion and non-linear characteristics. By changing angle of the first layer of the elliptic hole, birefringence properties of the structure are strengthened, which also can improve the dispersion performance of the structure at the same time. The analysis results demonstrated that fibers with a value of 3.05×10^{-2} for birefringence at the wavelength of $1.55 \mu\text{m}$ can be obtained by setting suitable structure parameters, meanwhile with high nonlinear coefficients in both X and Y polarization directions. Furthermore, while maintaining the high birefringence, the proposed PCF also has negative flat dispersion of nearly 550 nm from 1000 nm to 1550 nm . The photonic crystal fiber with the new structure has wide applications for the polarization control, nonlinear optics and optical fiber communication.

Key words: photonic crystal fiber, the full vector finite element method, high birefringence, high non-linearity

PACS: 42.70.Mp, 42.81.Qb, 42.81.Gs, 81.05.Ni

引言

近年来,光子晶体光纤(photonic crystal fibers, PCFs)的研究引起了广泛的兴趣。与传统光纤相比,通过灵活变动横截面结构,PCFs 可实现超平坦色散、无限单模传输、高双折射、高非线性、低限制损

耗和大有有效模场面积等特性^[1-3]。目前,PCFs 被广泛用于光通信、非线性光学及光纤传感等领域。

高双折射的 PCFs 在制作保偏光纤及高性能激光器等方面具有重要的应用,然而传统保偏光纤仅能获得 10^{-4} 数量级的双折射^[4],已无法满足光通信高速发展的需求,因此探寻高双折射的光纤成为

收稿日期:2014-10-31,修回日期:2015-04-24

基金项目:国家自然科学基金(60588502, 60607005, 60877033)

Foundation items: Supported by National Natural Science of China (60588502, 60607005, 60877033)

作者简介(Biography): 杨天宇(1990-),男,安徽淮北人,研究生,主要研究领域为光子晶体光纤。E-mail: m15551195130@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: kangxie@hfut.edu.cn, hmjiang@hfut.edu.cn

Received date: 2014-10-31, revised date: 2015-04-24

PCFs 领域的一个热点。一般情况下,光子晶体光纤主要是由三角晶格构成的六重对称结构,在理论上此类结构下的 PCFs 的基模是简并的,因此通过破坏包层或纤芯对称性可以提高 PCFs 的双折射,其数值达 10^{-3} 数量级^[5]。为了进一步提高 PCFs 的双折射,M. J. Steel^[6] 提出了椭圆空气孔光子晶体光纤,使得双折射达到了 10^{-2} 数量级,但限制损耗较大。Cao^[7] 和 Wang^[8] 都通过将椭圆孔与圆孔组合使用来设计高双折射 PCFs,双折射分别为 1.53×10^{-2} 和 2.54×10^{-2} ,但以目前的制造工艺还无法在 PCF 中同时实现椭圆孔与圆孔。

基于纯石英材料设计了一种新型结构的全内反射型光子晶体光纤。采用全矢量的有限元法研究了这种光纤的双折射、非线性和色散等特性。研究表明,不同的结构参数对此 PCF 的性能具有不同程度的影响,分析结果并设计出最佳的结构参数,使得该光子晶体光纤获得优良的双折射性能,同时在和偏振方向获得较高非线性。此外,该光子晶体光纤可在近红外波段内获得 1 000 ~ 1 550 nm 波长范围的负平坦色散。

1 光纤结构与基本理论

对 PCF 的研究方法有很多,比如平面波展开法、多极法、有效折射率法和有限元法等。这些方法均有各自的优点,其中有限元法可以用于横截面空气孔任意排布,空气孔形状任意调整的情况,并且计算方便,结果精确。因此,本文采用有限元法对图 1 所示结构模型进行理论模拟。

有限元法的计算原理是基于麦克斯韦方程组导出的光子晶体光纤的电磁波本征方程

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

其中, H 为磁场强度, ε_r 和 μ_r 分别为介质的相对介电常数和磁导率, ω 和 c 分别为光波的角频率和光在真空的光速。用有限元法建立模型,结合完美匹配层吸收边界条件对式(1)进行求解可以求得模式的有效折射率 n_{eff} ,进而对 PCF 的双折射、非线性和色散等特性进行计算。

模式双折射 B 是衡量光纤偏振特性的重要指标,可以表示为

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

其中 n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别为模式在 X 和 Y 偏振方向上的有效折射率。

非线性是光纤性能的重要参数,在分析光子晶

体光纤非线性效应时,非线性系数 γ 的计算公式为

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad , \quad (3)$$

其中, n_2 为石英的非线性折射率系数,在本文中取值为 $3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, λ 为光波波长, A_{eff} 为有效模场面积,计算公式如下:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\iint_{\Omega} E^2 dx dy}{\iint_{\Omega} E^4 dx dy} \quad , \quad (4)$$

其中, Ω 为光纤的横截面, E 为横截面上的电场分布。

同样,通过模式的有效折射率可以计算得到 PCF 的色散

$$D = - \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2} \quad , \quad (5)$$

其中, $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 为模式的有效折射率的实部。

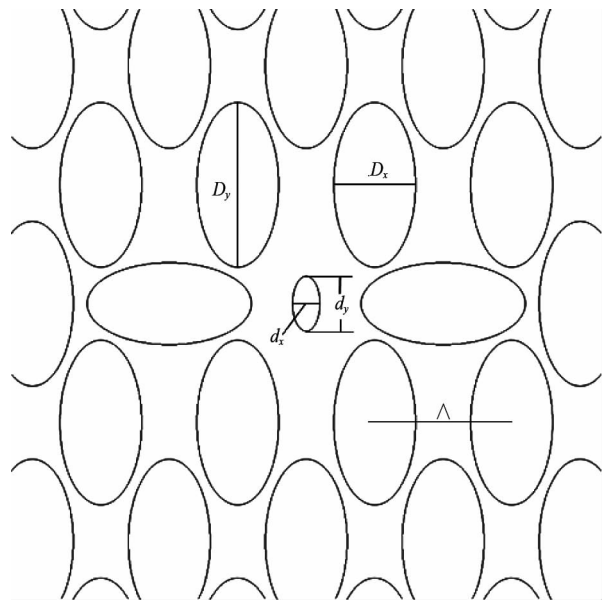


图 1 PCF 的结构

Fig. 1 The structure of the PCF

2 数值模拟和结果分析

本文设计的 PCF 为纤芯有椭圆孔缺陷的三角晶格全椭圆空气孔阵列结构,其结构如图 1 所示。在纤芯引入一个小的椭圆空气孔缺陷的同时,将第一层包层中的两个椭圆空气孔旋转 90° ,从而进一步破坏结构的六重旋转对称性,有利于获得更高的双折射。包层中的椭圆空气孔一共有六层,晶格常数为 Λ ,长轴和短轴的长度分别为 D_y 和 D_x ,纤芯的小椭圆空气孔的长轴和短轴的长度分别为 d_y 和 d_x ,

大小椭圆空气孔的椭圆率均为 $\eta = D_y/D_x = d_y/d_x$ 。本文设计的光纤为纯石英材料, 折射率可由 Sellmeier^[9] 公式求得。

在 PCF 中光波的能量是以基模的形式在纤芯中传输, 因此基模的模场分布是否集中在纤芯, 是衡量 PCF 特性好坏的基准。图 2 为在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\Lambda = 1.4 \mu\text{m}$, $D_x = 0.6\Lambda$, $d_x = D_x/3$, $\eta = 2$ 时, 基模在 X 和 Y 偏振方向上的电场强度分布图。由图中可以看出, 在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时, X 和 Y 偏振方向的光波能量均能很好被束缚在纤芯。

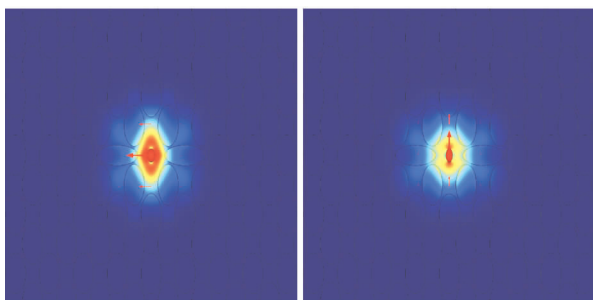


图 2 PCF 的磁场强度分布图 (a) X 偏振方向; (b) Y 偏振方向

Fig. 2 Magnetic field distributions of polarized modes in the X direction (a) and the Y direction (b), respectively

2.1 双折射特性

在晶格常数 Λ 不同的情况下, PCF 的双折射随着波长变化的曲线图如图 3 所示。从图中可知, PCF 的双折射随着 Λ 的增大而减小, 随着波长的增大而增大。因此, 为了在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处获得较高的双折射, 应尽量减小 Λ 的大小。当晶格常数 $\Lambda = 1.4 \mu\text{m}$, $D_x = 0.6\Lambda$, $d_x = D_x/3$, $\eta = 2$ 时, 此 PCF 在波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的双折射可达到 3.05×10^{-2} , 在近红外波段内的双折射均保持 10^{-2} 的数量级。同时, 应用上述仿真得到的有效折射率的虚部可以计算^[10] 得出 X 和 Y 偏振方向的泄漏损耗分别为 $9.1 \times 10^{-3} \text{ dB/km}$ 和 $4.9 \times 10^{-4} \text{ dB/km}$ 。

2.2 非线性特性

图 4 显示了在晶格常数 Λ 不同时, PCF 在 X 和 Y 偏振方向上的非线性系数随波长的变化曲线, 由图可知, 非线性系数随着 Λ 增大而减小, 随波长的增大而减小。因此可以根据非线性系数的需要来设计 PCF 的结构参数。在晶格常数 $\Lambda = 1.4 \mu\text{m}$, $D_x = 0.6\Lambda$, $d_x = D_x/3$, $\eta = 2$ 时, X 和 Y 偏振态的非线性系数分别为 $43.6 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $41.71 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 相比文献[7], 此结构再拥有更高双折射的同时, 非线性

系数也更高。具有高非线性效应的 PCFs 在高功率脉冲压缩、光孤子通信、超连续谱产生等方面有重要应用价值。

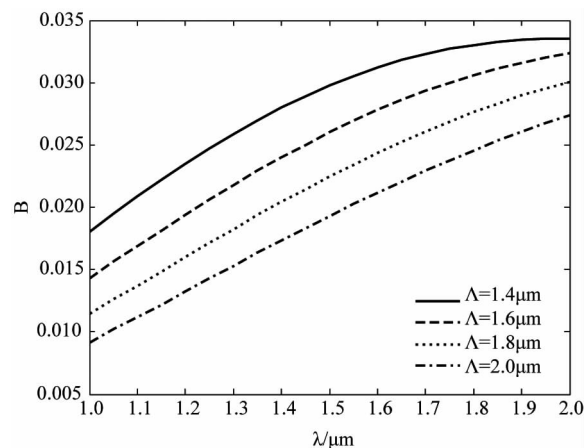


图 3 晶格常数不同的双折射曲线

Fig. 3 Dependence of birefringence on the wavelength for different lattice constant Λ

2.3 色散特性

PCFs 色散会造成光波在传播过程中展宽, 将直接导致光信号在光纤传输过程中的畸变, 色散对光纤传输系统有着非常不利的影 响, 限制了系统传输速率和传输距离的增加。图 5 为在不同晶格常数下, PCF 的总色散随波长变化的曲线图。可以看出, 而且随着晶格 Λ 的增大, 负平坦色散的波段变宽。在晶格常数 $\Lambda = 1.6 \mu\text{m}$, $D_x = 0.6\Lambda$, $d_x = D_x/3$, $\eta = 2$ 时, PCF 不仅有 2.69×10^{-2} 的高双折射, 同时, 在近红外波段内的 $1000 \sim 1550 \text{ nm}$ 之间具有良好的负平坦色散特性, 可用于色散补偿, 以保证光纤线路的总色散近似为零, 从而实现高速度、大容量、长距离通信。

为了进一步分析其他结构参数对本文设计的 PCF 的影响, 通过大量数据的计算发现: 1) 在其他参量保持不变的情况下, D_y 和 D_x 等比例 ($\eta = 2$) 增大将使 PCF 的双折射随之增大, 如图 6 所示, 这是因为包层椭圆孔增大使纤芯和包层的折射率差异更加明显, 从而使模场更加集中在纤芯, 模场将受到更多椭圆孔的影响。2) 随着中心椭圆孔缺陷的长短轴 d_y 和 d_x 成比例 ($\eta = 2$) 增大, 其他参数保持不变, PCF 的双折射也会增大, 如图 7 所示, 但是当 $d_x = D_x/2$ 时, 虽然可以获得更大的双折射, 但是基模的模场不能很好的汇聚在纤芯, 不利于光的传输。因此, 为了尽可能在获得高双折射的同时保证结构的

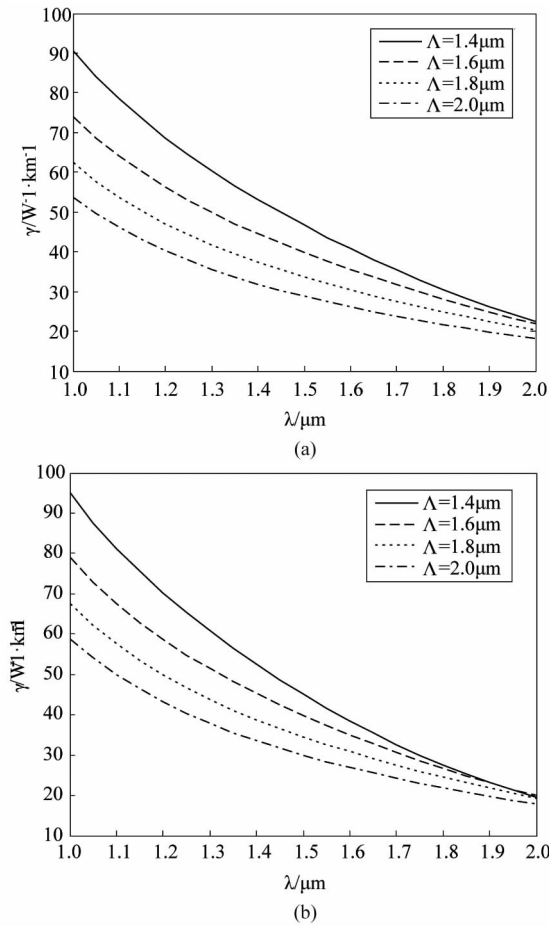


图4 不同晶格常数下的非线性系数 (a) X 偏振方向; (b) Y 偏振方向
Fig.4 Nonlinear coefficient of the (a) X and (b) Y polarized modes for different lattice constant Λ

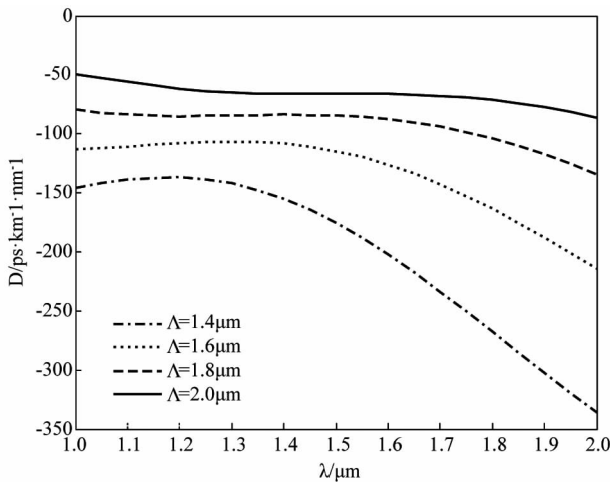


图5 不同晶格常数下的色散曲线图
Fig.5 Group velocity dispersion of the proposed PCF for different lattice constant Λ

可行性,将结构参数取 $D_x = 0.6\Lambda, d_x = D_x/3, \eta = 2$ 。3)包层第一层左右椭圆空气孔对 PCF 的双折射有

显著影响,在其他参数保持不变时,减小左右椭圆空气孔的椭圆率会增大 PCF 的双折射,但为了降低光纤的制作难度,本文将左右孔的椭圆率设定与包层中其他椭圆空气孔相同。4) d_y 和 d_x 成比例增大,会使 PCF 的非线性系数减小,如图 8 所示,在晶格常数 $\Lambda = 1.4 \mu\text{m}, D_x = 0.6\Lambda, d_x = D_x/4, \eta = 2$ 时,其非线性系数 X 和 Y 偏振态的非线性系数分别为 $49.16 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $48.27 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

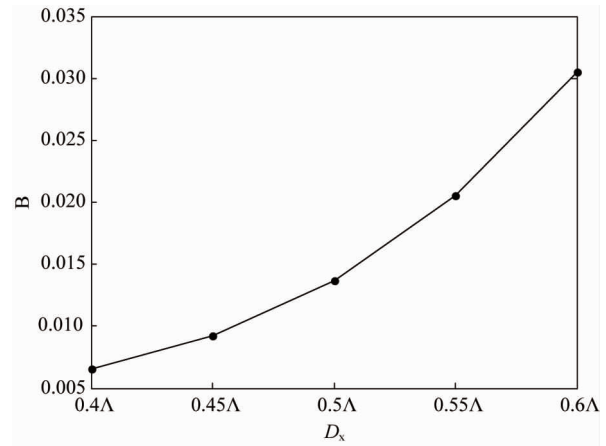


图6 不同 D_x 对应不同双折射 B
Fig.6 Dependence of birefringence on the minor axis D_x of ellipse of the photonic lattice

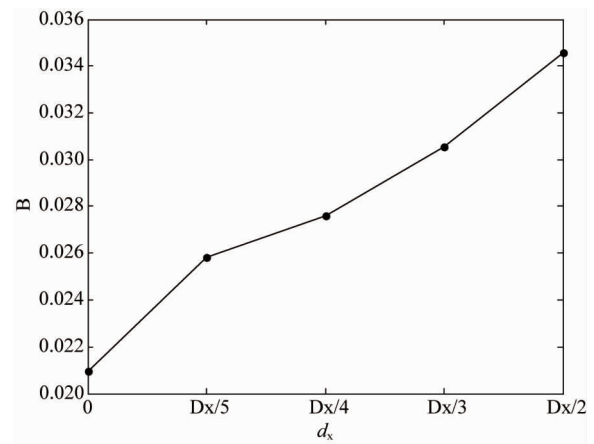


图7 不同 d_x 对应不同双折射 B
Fig.7 Dependence of birefringence on the minor axis d_x of the elliptic air pore defects in the fiber

3 结论

设计了一种纤芯具有椭圆空气孔缺陷的非对称光子晶体光纤,采用全矢量有限元法结合完美匹配层吸收边界条件对该结构的模场分布、双折射、非线性系数和色散等特性进行了数值分析。当晶格常数

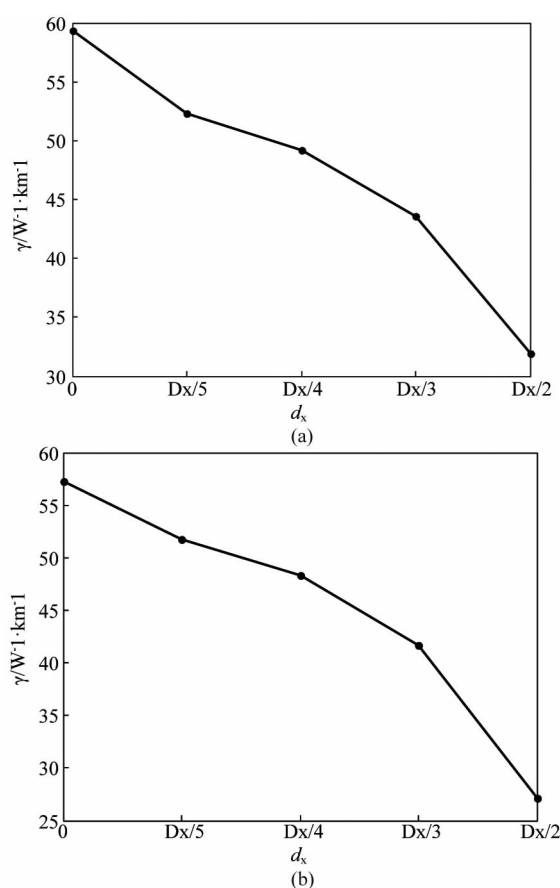


图8 不同 d_x 对应不同非线性系数 γ , a) X 偏振方向; b) Y 偏振方向

Fig. 8 Nonlinear coefficient of the (a) X and (b) Y polarized modes for different minor axis d_x of the elliptic air pore defects in the fiber

$\Lambda = 1.4 \mu\text{m}$, 包层椭圆孔短轴 $D_x = 0.6\Lambda$, 纤芯椭圆孔短轴 $d_x = D_x/3$, 椭圆率 $\eta = 2$ 时, 此 PCF 在波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的双折射可高达 3.05×10^{-2} , 相比于文献[7-8]报道的双折射不仅得到的结果更突出, 而且全椭圆孔结构较多形状孔混合的结构更具有可行性, 通过棒钻孔法^[11]和铸造法^[12]可以制作此 PCF 的预制棒, 同时具有 $43.6 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的高非线性系数高于文献[7]报道的结果。此外, 当晶格常数 $\Lambda = 1.6 \mu\text{m}$ 时, 此 PCF 不仅达到 2.69×10^{-2} 的高双折射, 在近红外波段内的 $1000 \sim 1550 \text{ nm}$ 之间还具有良好的负平坦色散特性, 可用于色散补偿。高双折射光子晶体光纤作为新型的高性能保偏光纤, 可用于光纤水听器、光纤陀螺等传感器和密集波分复用、

掺铒光纤放大器等光纤通信系统。本文通过计算, 为高双折射高非线性负色散平坦光纤的设计提供了一种新的可能, 此光纤将在光纤传感、光孤子通信和超连续谱产生等方面发挥重要作用。

References

- [1] Knight J C, Birks T A, Russell PSJ, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt. Lett.* 1996, **21**(19):1547-1549.
- [2] Birks T A, Knight J C, Russell P St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.* 1997, **22**(13):961-963.
- [3] CUI Hai-Yan, HOU Lan-Tian, HAN Ying. Generation of infrared ultra-wide band continuum spectrum photonic crystal fiber [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (崔海燕, 侯蓝田, 韩颖. 光子晶体光纤红外超宽带连续谱的研究. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(6):445-451.
- [4] GUAN Rong-Feng, LI Zhan-Tao, HOU Bing, *et al.* Analysis on stress-inducing birefringence of "pseudo-rectangle" polarization-maintaining optical fiber [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (关荣锋, 李占涛, 侯斌等. 类矩形保偏光纤应力双折射分析. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(1):45-48.
- [5] Ju J, Jin W, Demokan M S. Properties of a highly birefringent photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(10):1375-1377.
- [6] Steel M J, Osgood R M. Elliptical-hole photonic crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(4):229-231.
- [7] CAO Ye, LI Rong-Min, TONG Zheng-Rong. Investigation of a new kind of high birefringence photonic crystal fiber [J]. *Acta Phys. Sin.* (曹晔, 李荣敏, 童峥嵘. 一种新型高双折射光子晶体光纤特性研究. *物理学报*), 2013, **62**(8):084215.
- [8] WANG Er-Lei, JIANG Hai-Ming, XIE Kang, *et al.* Photonic crystal fibers with high nonlinearity, large birefringence and multiple zero dispersion-wavelength [J]. *Acta Phys. Sin.* (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. *物理学报*), 2014, **63**(13):134210.
- [9] MALITSON I. H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, **55**(10):1205-1209.
- [10] HE Li-Na, ZHANG Ye-Jin, YANG Si-Gang, *et al.* Study of properties of highly birefringent microstructured optical fibers [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2006, **48**(5):940-944.
- [11] Nader A. Issa, Martijn A. van Eijkelenborg, Matthew Fellow, Felicity Cox, Geoff Henry, and Maryanne C. J. Large, Fabrication and study of microstructured optical fibers with elliptical holes [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **29**(12):1336-1338.
- [12] Coulombier Q, Brilland L, Houizeot P, *et al.* Fabrication of low losses chalcogenide photonic crystal fibers by molding process [J]. *Proc. of SPIE*, 2010, **75989**:1-9.