

doi: 10.3788/gzxb20144307.0706020

一种基于肖特玻璃的新型高双折射光子晶体光纤

王江昀¹, 曹晔¹, 逯艳杰², 童峥嵘¹

(1 天津理工大学 薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384)

(2 北京京侨通信工程设计院有限公司石家庄分公司, 石家庄 050000)

摘 要:设计了一种基于肖特玻璃 SF57 的新型高双折射光子晶体光纤, 在纤芯和包层同时引入椭圆空气孔, 并且在包层的最内层对称地引入两个圆形空气孔. 通过改变空气孔的间距和椭圆率, 采用全矢量有限元法研究了该光纤的双折射、限制损耗和色散特性. 数值研究发现, 在纤芯中引入小椭圆空气孔, 可极大地提高双折射的数值. 通过优化光纤的结构参数, 当孔间距 Λ 为 $1.60 \mu\text{m}$, 椭圆率 η 为 0.5 时, 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 双折射高达 5.22×10^{-2} , 限制损耗低至 $8.82 \times 10^{-10} \text{ dB/m}$, 且该光纤在 $1.0 \sim 2.2 \mu\text{m}$ 的波长范围内保持正常色散, 可用于宽带色散补偿. 该设计对研究新型背景材料的光子晶体光纤具有一定的意义.

关键词:光子晶体光纤; 肖特玻璃; 双折射; 限制损耗; 有限元法

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)07-0706020-5

A Novel High Birefringent Photonic Crystal Fiber Based on Schott Glass

WANG Jiang-yun¹, CAO Ye¹, LU Yan-jie², TONG Zheng-rong¹

(1 Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

(2 Beijing Jingqiao Communication Engineering Design Institute Co., Ltd. Shijiazhuang branch, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: A novel design of high birefringent photonic crystal fiber based on schott glass with elliptical air holes in the core and cladding is proposed, and two circular air holes are introduced in the innermost layer of the cladding. Using the finite element method, its birefringence, confinement loss and dispersion characteristics are investigated simultaneously by changing the pitch of air holes and ellipticity of elliptic air holes. Numerical results show that the value of birefringence can be improved by introducing a small elliptical air hole in the core, the birefringence and confinement loss are respectively about 5.22×10^{-2} and $8.82 \times 10^{-10} \text{ dB/m}$ at $1.55 \mu\text{m}$ with the cladding air holes pitch size of $1.6 \mu\text{m}$ and the ellipticity ratio of 0.5. In addition, the fiber keeps normal dispersion in a wavelength range from $1.0 \mu\text{m}$ to $2.2 \mu\text{m}$. In conclusion, this proposed photonic crystal fiber are significant for the further research on the new background material photonic crystal fiber.

Key words: Photonic crystal fiber; Schott glass; Birefringence; Confinement loss; Finite element method

OCIS Codes: 060.2280; 060.2310; 060.2420

0 引言

光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF) 又称为微结构光纤或者多孔光纤, 与传统光纤相比, 石英材质的 PCF 其具有许多独特的光学性质, 诸如: 无截止

波长的单模传输特性、极低的损耗、可调的非线性、良好的色散性质、高双折射特性、产生超连续谱等^[1-5], 故受到广泛的关注.

近年来, 非硅材质光纤逐渐成为研究热点. Bhawana Dabas^[6]等提出了一种以 As_2Se_3 为背景材料的光纤, 双

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61107052)、天津市高等学校科技发展基金计划项目 (2012) 和天津市自然科学基金 (No. 11JCYBJC00100) 资助

第一作者: 王江昀 (1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光子晶体光纤通信. Email: yunyatou2007@163.com

导师: 曹晔 (1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为光纤通信和光纤传感等. E-mail: cynever@163.com

收稿日期: 2013-10-29; 录用日期: 2014-03-23

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

折射可达到 2.2×10^{-3} , 与同一结构的石英玻璃 PCF 相比, 具有低损耗和大负色散性. 刘永兴等^[7] 研究了 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 硫系玻璃光子晶体光纤的中红外色散特性, 通过优化光纤的结构参量, 可实现色散平坦特性. 王晓琰等^[8] 设计了一种 As_2S_3 光子晶体光纤, 数值研究发现可实现高双折射、高非线性性和宽带正常色散, 且可将传输波段扩展到中红外 $3 \sim 10 \mu\text{m}$. Kumar 等^[9] 分析了亚碲酸盐光纤的制作和波导特性. Mohamed Farhat O. Hameed 等人^[10] 分析了具有液晶纤芯的肖特玻璃 SF57 光子晶体光纤, 数值模拟得出, 改变液晶的温度其双折射可高达 4.5×10^{-2} . 由以上分析可得, 这种新型软玻璃材料的光子晶体光纤具有很多石英玻璃不具备的特性, 如高折射率系数、高非线性和中红外波段传输等特性, 在未来将有十分广阔的应用前景.

本文设计了背景材料为肖特玻璃 SF57 的 PCF, 通过在纤芯和包层引入椭圆空气孔, 且在包层最内层引入两个大的圆形空气孔, 增加了光纤的结构不对称性. 利用全矢量有限元法研究了椭圆空气孔的间距和椭圆率的变化对该光纤的双折射、限制损耗和色散特性的影响. 数值模拟发现, 该结构 PCF 在实现高双折射 ($\sim 10^{-2}$ 量级) 的同时, 具有很低的限制损耗 ($\sim 10^{-10}$ dB/m 量级), 且在所研究波段具有大的负色散数值.

1 光纤设计与理论基础

本文采用全矢量有限元法^[11-12] 对所设计的 PCF 进行模拟, 图 1 是该 PCF 的横截面示意图. 光纤采用三角晶格排列, 其背景材料为肖特玻璃 SF57, 其折射率由 Sellmeier 公式求得, 空气孔的折射率设定为 1. 包层椭圆孔的短轴长度为 $A=0.96 \mu\text{m}$, B 为长轴长度, 孔间距为 Λ . 椭圆空气孔的椭圆率为 $\eta=A/B=a_0/b_0$, 而纤芯的小椭圆孔短轴长度为 $a_0=A/2=0.48 \mu\text{m}$, b_0 为长轴长度. 另外, 为了进一步的提高双折射, 在光纤包层的最内层对称的引入两个大圆空气孔, 其直径 $D=1.50 \mu\text{m}$.

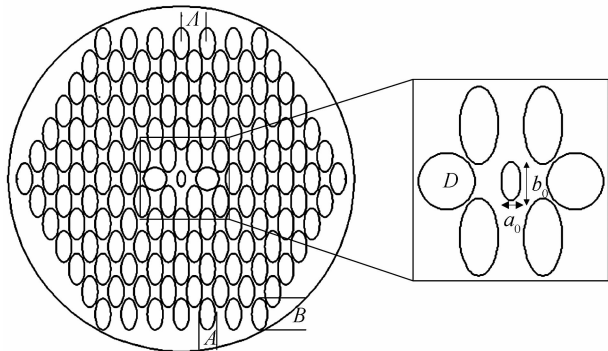


图 1 光子晶体光纤的几何截面图

Fig. 1 Cross section of the proposed PCF

本文以肖特玻璃为基质材料, 其折射率可由 Sellmeier 公式表达为^[13]:

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{a\lambda^2}{\lambda^2 - b} + \frac{c\lambda^2}{\lambda^2 - d} + \frac{e\lambda^2}{\lambda^2 - f}} \quad (1)$$

式中 n 为材料折射率, λ 为波长, 对于肖特玻璃 SF57, 系数 $a = 1.8165$, $b = 0.01437$, $c = 0.4289$, $d = 0.05928$, $e = 1.072$, $f = 121.42$. 图 2 是根据 Sellmeier 公式获得的材料折射率随波长的变化曲线. 由图可见, SF57 玻璃的折射率并不是一个固定的常数, 而是不同的传输波长对应不同的值.

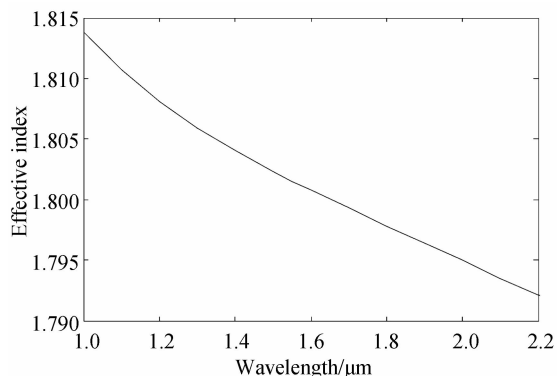


图 2 SF57 玻璃有效折射率随波长的变化曲线

Fig. 2 Effective index of SF57 as a function of wavelength

2 数值模拟与结果分析

利用有限元法建立适当的模型, 可以直接得到纤芯基模的模场分布和模式有效折射率 n_{eff} 的复数形式. 用 Matlab 软件对所得到的数据进行后期处理, 从而得到 PCF 的双折射值、限制损耗及色散数值随波长和结构参数的变化曲线, 并分析其特性.

2.1 双折射

模式双折射 B 是衡量光纤偏振特性的重要参数, 基模的模式双折射可表示为^[14]

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

式中, n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别表示 x 偏振方向和 y 偏振方向基模的有效折射率, Re 表示实部. 图 3 给出了双折射随波长的变化曲线. 当结构参数一定时, 双折射随着波长的增大而增大.

图 3(a) 给出了孔间距 $\Lambda = 1.6 \mu\text{m}$, 椭圆率 $\eta = 0.5$ 时, 纤芯有无小椭圆, 双折射与波长之间的关系. 由图可以看出, 纤芯中没有引入椭圆的光纤在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处, 双折射的值仅为 1.07×10^{-2} , 明显低于引入椭圆空气孔的值. 这是因为, 在纤芯中引入椭圆空气孔, 增大了纤芯的不对称性, 基模模场受光纤的不对称纤芯和非对称包层空气孔的影响增大, 故可获得较高的双折射.

图 3(b) 给出了椭圆率 $\eta = 0.5$ 时, 孔间距 Λ 从 $1.6 \mu\text{m}$ 增加到 $2.0 \mu\text{m}$ 时, 双折射随波长的变化曲线. 由图可以看出, 双折射随着孔间距的增大而减小. 这是因为 Λ 的增大, 会导致纤芯面积变大, 从而使得模场与

内层气孔的作用减弱,双折射减小.由图 3(c)可以看出,当孔间距 $\Lambda=1.6 \mu\text{m}$,改变椭圆率的大小, η 增大则双折射的值相应的减小.这是因为,随着椭圆率 η 的增大,空气孔更加趋向于圆形,光纤的非对称性减弱,使得双折射减小.综上所述,该 PCF 在孔间距 $\Lambda=1.6 \mu\text{m}$,椭圆率 $\eta=0.5$,波长 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 时,其双折射较高,可达到 5.22×10^{-2} .

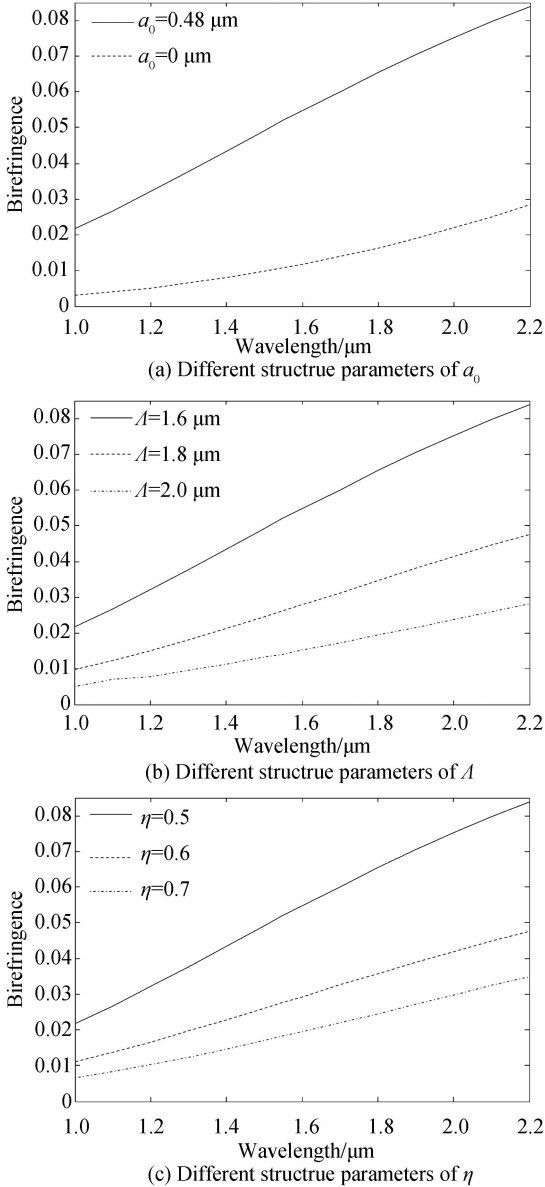


图 3 双折射随波长和结构参数的变化

Fig. 3 The birefringent of the PCF as a function of the wavelength in the case of different structure parameters

2.2 限制损耗

通过模式有效折射率 n_{eff} 的虚部可以得到该模式所对应的光纤的限制损耗^[15],其与波长的关系为(其单位为 dB/m)

$$L = \frac{20}{\ln(10)} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^6 \quad (3)$$

式中 λ 的单位为 μm , Im 表示虚部.

图 4 给出了该 PCF 在不同结构参数条件下, x 偏振方向的限制损耗变化曲线.从图中可以看出,限制损耗随波长的增大而增加.这是因为 PCF 对短波长具有更强的约束性,光波主要束缚于纤芯内传输,相应的限制损耗小且变化也较平缓,而当波长增大时,光场的泄露程度逐渐增加,相当一部分的能量扩散到包层中,导致限制损耗呈指数增加.由图 4(a)得出,椭圆孔的椭圆率确定为 $\eta=0.5$ 时,限制损耗随着孔间距的减小而减小.这是因为孔间距小的时候,空气孔的排列更加的密集,光波能量主要限制在纤芯内,向包层的泄露减少,相应的限制损耗降低.图 4(b)给出了光纤的孔间距 $\Lambda=1.6 \mu\text{m}$ 时,随着椭圆率 η 的增大,限制损耗也相应的增大.这是因为随着椭圆率的增大,椭圆的归一化面积减小,包层的等效折射率增大,导致包层和纤芯之间的折射率差减小,光波不能被很好地限制在纤芯内使得纤芯面积相应的增大,因此损耗也就增大了.由图可得,当椭圆孔的孔间距 $\Lambda=1.6 \mu\text{m}$,椭圆率 η 为 0.5 时,该结构既可实现高双折射,又可获得较低的限制损耗.在波长 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 处,限制损耗低至 8.82×10^{-10} dB/m,如此低的限制损耗对于实现光的远距离传输是大有益处的.

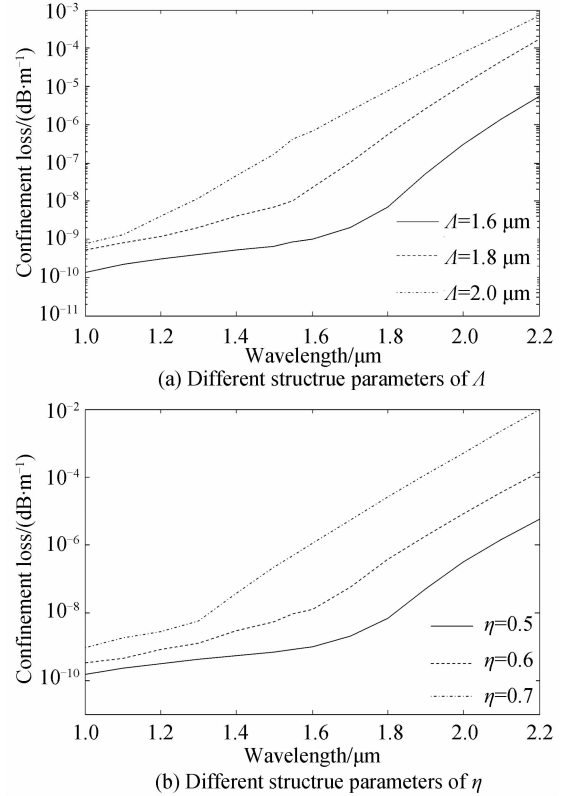


图 4 限制损耗随结构参数和波长的变化

Fig. 4 The confinement loss of the PCF as a function of the wavelength in the case of different structure parameters

2.3 色散特性

在光纤通信中,色散是一个决定通信质量和传输距离的重要参数,因此光子晶体光纤的色散控制是十

分重要的. 光子晶体光纤的色散 D 由两部分组成^[16], 即波导色散 $D_w(\lambda)$ 和材料色散 $D_M(\lambda)$

$$D = D_w(\lambda) + D_M(\lambda) \quad (4)$$

本文采用的是肖特玻璃 SF57 材料, 对于不同结构参量的 PCF, 材料色散 $D_M(\lambda)$ 相同. 材料色散是由于材料的折射率随波长变化而引起的, 主要是由材料折射率 $n = n(\lambda)$ 引起, 可由 Sellmeier 方程计算得到, 即式 (1) 得到. 材料色散 $D_M(\lambda)$ 可表示为^[17]

$$D_M(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n(\lambda)}{\partial \lambda^2} \quad (5)$$

图 5 为 SF57 的材料色散图. 如图所示, 在 $\lambda = 2.0 \mu\text{m}$ 处材料色散近似为零, $\lambda < 2.0 \mu\text{m}$ 范围内为正常色散, 反之 $\lambda > 2.0 \mu\text{m}$ 范围内为反常色散.

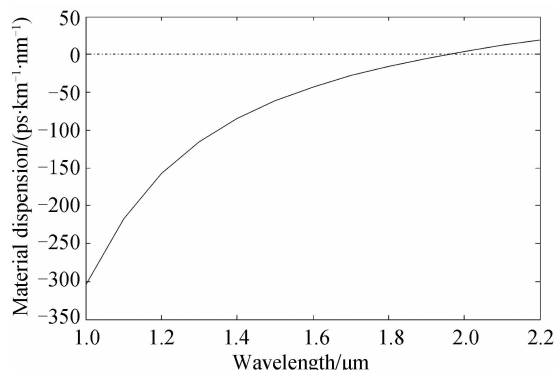


图 5 材料色散随波长的变化

Fig. 5 Material dispersion versus the wavelength

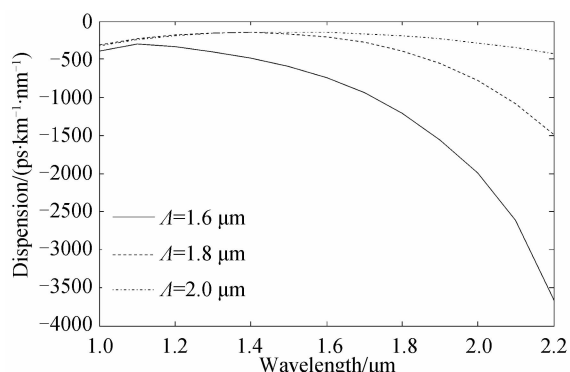
波导色散 $D_w(\lambda)$ 则是根据基模的有效折射率的实部, 采用曲线拟合法计算得到^[18], 即

$$D_w(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{\partial \lambda^2} \quad (6)$$

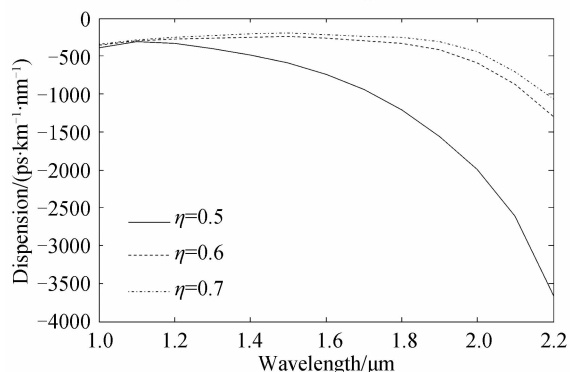
λ 和 c 分别是光在真空中的波长和速度. 通过调节光纤的结构参数可实现对波导色散的调节. 本文同时考虑材料色散和波导色散, 即研究的是光纤的总色散.

图 6(a) 为椭圆率 $\eta = 0.5$ 情况下, 改变孔间距 Λ 的大小, x 偏振方向的总色散值随波长的变化. 由图可知, 结构参数确定时, x 偏振方向的总色散值在 $1.0 \sim 2.2 \mu\text{m}$ 波段内都是负值, 即都处于正常色散区, 且当孔间距 $\Lambda = 1.6 \mu\text{m}$, 波长 $\lambda = 2.2 \mu\text{m}$ 时, 色散值达到了 $-3668 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 可用于宽带色散补偿. 同时, 随着 Λ 的增大, 色散曲线逐渐趋于平坦, 且色散值逐渐增大. 图 6(b) 是孔间距 $\Lambda = 1.6 \mu\text{m}$, 椭圆率 η 变化时 x 偏振方向的总色散值随波长的变化. 由图可知, 随着椭圆率的增加, 色散曲线更加的平坦, 且在所研究波段内都是负值.

此外, 文献^[19]已经成功拉制出了纤芯为单个椭圆孔的 PCF, 故本文所提出的 PCF 在将来是可以制造出来的.



(a) Different structure parameters of Λ



(b) Different structure parameters of η

图 6 色散随波长和结构参数的变化

Fig. 6 The dispersion of the PCF as a function of the wavelength in the case of different structure parameters

3 结论

本文提出了一种在纤芯和包层同时引入椭圆空气孔的新型肖特玻璃材料的光子晶体光纤, 采用全矢量有限元方法研究了它的双折射、限制损耗和色散特性. 数值模拟发现, 在纤芯中引入小椭圆空气孔, 极大地提高了光纤的双折射值. 该结构在孔间距 $\Lambda = 1.6 \mu\text{m}$, 椭圆率 $\eta = 0.5$ 时, 在通信波段 $1.55 \mu\text{m}$ 处, 其双折射高达 5.22×10^{-2} , 限制损耗低至 $8.82 \times 10^{-10} \text{ dB/m}$, 且在 $1.0 \sim 2.2 \mu\text{m}$ 整个波长范围内色散值都是负值, 属于正常色散, 可用于宽带色散补偿. 另外, 在空气孔椭圆率不变时, 双折射随着孔间距的增大而减小, 限制损耗和色散值则相应地增大; 而当包层空气孔孔间距确定时, 随着椭圆率的增加, 双折射逐渐减小, 限制损耗则逐渐增大, 色散曲线也更加的趋于平坦. 综上分析可得, 本文所设计的光纤将高双折射、低限制损耗和宽带正常色散实现了结合, 这对新型材料光子晶体光纤的研究具有一定的意义.

参考文献

- [1] 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.

- [2] WU Wei-qing, CHEN Xun-wen, 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.
- [3] GENG Peng-cheng, ZHANG Wei-gang, ZHANG Shan-shan, *et al.* Design of new type single-polarization single-mode photonic crystal fiber with wide bandwidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7):0706001.
耿鹏程,张伟刚,张珊珊,等.新型宽带偏振单模光子晶体光纤的设计[J].光学学报,2011,**31**(7):0706001.
- [4] HE Zhong-jiao. Highly birefringent photonic crystal fibers based on micro-hole-structured fiber core[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11):2218-2221.
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):2218-2221.
- [5] GUO Xia-rui, YANG De-xing, ZHAO Jian-lin, *et al.* Experimental investigation on the bending loss properties of photonic crystal fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10):1817-1820.
郭夏锐,杨德兴,赵建林,等.光子晶体光纤弯曲损耗特性研究[J].光子学报,2007,**36**(10):1817-1820.
- [6] DABAS B, SINHA R K. Design of highly birefringent chalcogenide glass PCF: A simplest design [J]. *Optics Communications*, 2011, **284**:1186-1191.
- [7] LIU Yong-xing, ZHANG Pei-qing, XU Yin-sheng, *et al.* Dispersion properties of $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ chalcogenide glass photonic crystal fiber for midinfrared region [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5):516-521.
刘永兴,张培晴,许银生,等. $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 硫系玻璃光子晶体光纤的中红外色散特性[J].光子学报,2012,**41**(5):516-521.
- [8] WANG Xiao-yan, LI Shu-guang, LIU Shuo, *et al.* Midinfrared As_2S_3 chalcogenide glass broadband normal dispersion photonic crystal fiber with high birefringence and high nonlinearity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(6):064213.
王晓琰,李曙光,刘硕,等.中红外高双折射高非线性宽带正常色散 As_2S_3 光子晶体光纤[J].物理学报,2011,**60**(6):064213.
- [9] KUMAR V, GEORGE A, Knight J, *et al.* Tellurite photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(20):2641-2645.
- [10] HAMEED M F O, OBAYYA S S A. Modal analysis of a novel soft glass photonic crystal fiber with liquid crystal core[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(1):96-102.
- [11] LI De-yue, ZHOU Gui-yao, XIA Chang-ming, *et al.* Theoretical investigation of photonic crystal fiber with highly nonlinear and birefringent [J]. *Chinese Journal of Laser*, 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.
- [12] FUJISAWA T, KOSHIBA M. Finite element characterization of chromatic dispersion in nonlinear holey fibers[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(13):1481-1489.
- [13] ROCHA-MENDOZA I, LANGBEIN W, BORRI P. Coherent anti-Stokes Raman micro-spectroscopy using spectral focusing with glass dispersion[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(20):201103-1-3.
- [14] ZHANG Lei, LI Shu-guang, YAO Yan-yan, *et al.* Characteristics of nano-structures photonic crystal fibers with high birefringence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(02):1101-1107.
张磊,李曙光,姚艳艳,等.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**(02):1101-1107.
- [15] ZHANG Mei-yan, LI Shu-guang, YAO Yan-yan, *et al.* Influence of micro-structured core on characteristics of photonic crystal fibers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(05):3278-3284.
张美艳,李曙光,姚艳艳,等.微结构纤芯对光子晶体光纤基本特性的影响[J].物理学报,2010,**59**(05):3278-3284.
- [16] WANG Y, ZHANG X, REN X, *et al.* Design and analysis of a dispersion flattened and highly nonlinear photonic crystal fiber with ultralow confinement loss[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(3):292-297.
- [17] LI Wei, CHEN Hui, CHEN Ming. High symmetry of the mode field distribution photonic crystal fiber with high birefringence [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2012, **39**(2):0205002.
黎薇,陈辉,陈明.高对称性模场分布的高双折射光子晶体光纤[J].中国激光,2012,**39**(2):0205002.
- [18] WANG Wei, YANG Bo. Dispersion and birefringence analysis of photonic crystal fiber with rhombus air-core structure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(6):064601.
王伟,杨博.菱形纤芯光子晶体光纤色散与双折射特性分析[J].物理学报,2012,**61**(6):064601.
- [19] BELARDI W, BOUWMANS G, PROVINO L, *et al.* Form-Induced birefringence in elliptical hollow photonic crystal fiber with large mode area[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2005, **41**(12):1558-1564.