

一种高双折射高非线性多零色散波长光子晶体光纤*

王二垒¹⁾ 姜海明^{1)†} 谢康¹⁾ 张秀霞¹⁾²⁾

1)(合肥工业大学, 仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

2)(北方民族大学, 电气信息工程学院, 银川 750021)

(2013年12月27日收到; 2014年2月25日收到修改稿)

设计了一种高双折射高非线性多零色散波长的全内反射光子晶体光纤, 采用有限元法研究了这种光纤的有效模面积、非线性、色散和双折射特性. 计算结果表明, 通过设置合适的结构参数, 该光纤可在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处获得 2.54×10^{-2} 的双折射, 也可在 X, Y 偏振方向分别获得 $50.22\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 $54.61\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 的高非线性系数. 另外, 该光纤在近红外波段出现了两个零色散波长, 其中的一个零色散波长出现在 $1.55\ \mu\text{m}$ 附近. 本设计为获得高双折射高非线性多零色散波长的光子晶体光纤提供了一种新的结构, 其在偏振控制、非线性光学、色散管理和超连续谱传输方面具有广泛的应用前景.

关键词: 光子晶体光纤, 高双折射, 高非线性, 零色散

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

DOI: 10.7498/aps.63.134210

1 引言

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF), 又称微结构光纤或多孔光纤, 与普通光纤相比, 具有无限单模传输、高双折射、高非线性和色散管理等特性^[1-2], 被广泛应用于光纤传感、光通信及非线性光学等领域.

高双折射 PCF 在高性能光纤激光器及激光传感等方面具有重要的应用价值, 因此其成为 PCF 领域的研究热点之一. PCF 的主导结构是平行四边形晶格构成的六重对称结构, 该结构下的光子晶体光纤基模是简并的, 因此破坏 PCF 的对称结构是提高其双折射的主导方法, 如在包层中引入半径不同的孔, 改变纤芯或包层空气孔形状^[3-7]等. Liang 等^[8]在纤芯处引入一排椭圆空气孔, 该结构虽然获得了 2.18×10^{-3} 的双折射, 但是其非线性系数还需进一步提高. Chen 等^[9]设计了三空气孔结构的 PCF, 通过改变结构参数在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波

长处实现了 1.17×10^{-2} 的高双折射, 并且降低了 PCF 的限制损耗. So Eun Kim 等^[10]设计出了全椭圆结构的 PCF, 在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长处, 其双折射达到 1.94×10^{-2} , 同时具有负色散平坦特性. Mohit Sharma 等^[11]设计了一种类矩形纤芯 PCF, 其双折射约为 2.22×10^{-2} , 但该光纤在可见光波长范围只有一个零色散波长, 而且其色散平坦特性有待提高.

本文以全内反射型光子晶体光纤为研究对象, 在空气包层中引入椭圆和半椭圆结构, 设计了一种高双折射高非线性的 PCF, 并采用有限元法研究了这种光纤 X, Y 偏振方向的双折射、有效模面积、非线性和色散特性. 通过设置合理的结构参数, 该光纤在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处获得了 2.54×10^{-2} 的高双折射, 也可在 X, Y 偏振方向分别获得很高的非线性系数. 另外, 该光纤在近红外波段出现了两个零色散波长, 其中一个零色散波长出现在 $1.55\ \mu\text{m}$ 附近, 同时, 随着孔间距 A 的增大, 零色散波长出现红移现象.

* 国家自然科学基金 (批准号: 60588502, 60607005, 60877033, 51365001) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: hmjiang@hfut.edu.cn

2 基本理论

PCF的分析方法很多,如平面波展开法^[12,13]、有效折射率法^[1,14-17]、有限差分法^[18,19]和有限元法^[10,11,20,21]等,其中有限元法适用于不同形状空气孔任意排列的PCF的计算,其建模和计算比较方便,而且精度较高.因此,本文采用有限元法并结合完美匹配层吸收边界条件对图1所示的PCF结构模型(具体结构参数见下文陈述)进行理论计算.

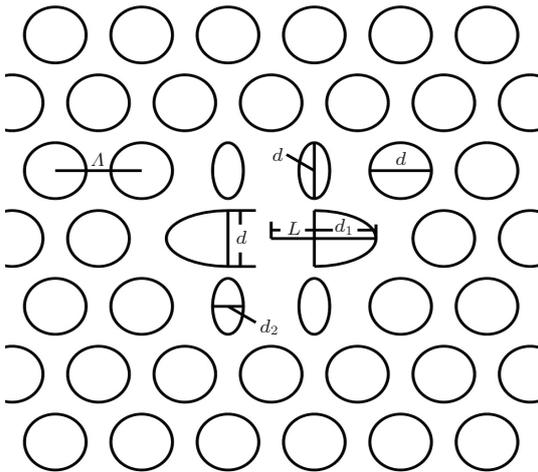


图1 PCF的结构图

有限元法的电磁波方程为

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

其中, \mathbf{E} 为电场强度, μ_r 和 ϵ_r 分别为介质的磁导率和相对介电常数, c 和 ω 分别为光在真空中的光速和频率. 通过对(1)式的求解可以计算传播常数 β 和模式的有效折射率 n_{eff} , 进而可以对PCF的色散、双折射、非线性和有效模面积等特性进行计算.

通过 n_{eff} 我们可以得到对应模式的色散

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

其中, λ 为波长, $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 为对应模式有效折射率的实部.

模式双折射 B 是光纤偏振特性的重要指标, 可以表示为

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

其中, n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别为 X 和 Y 偏振方向基模有效折射率.

非线性是光纤性能的重要参数, 其衡量标准是

非线性系数 γ 的大小, 计算公式为

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (4)$$

其中, n_2 为石英材料的非线性折射率系数, 取 $3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, A_{eff} 为有效模面积, 可以通过下式求出:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint_{\Omega} E^2 dx dy \right)^2}{\iint_{\Omega} E^4 dx dy}, \quad (5)$$

其中, E 为横截面上的电场分布, Ω 为光纤的整个横截面.

3 数值模拟和结果分析

本文以目前最常用的平行四边形晶格结构设计PCF, 如图1所示, 其中圆形空气孔直径 $d = 1 \mu\text{m}$, 孔间距为 Λ . 第一层圆形空气孔被椭圆和半椭圆空气孔取代, 四个小椭圆空气孔的中心仍旧为原空气孔的圆心, 其长轴和短轴的长度分别为 d 和 d_2 , 其椭圆度 $\eta = 1 - d_2/d$. 半椭圆的位置参数为 L (距该光纤的几何中心的距离), 其尺寸参数为 d_1 (半椭圆长轴长), 半椭圆短轴长为 d . 本文设计的为纯石英玻璃的PCF, 石英的折射率可由 Semllmeier^[22] 公式得到, 因此可以系统的计算PCF的色散, 同时, 上述结构破坏了PCF的对称性, 有利于提高PCF的双折射.

3.1 模场分布特性

在PCF中, 光波的能量集中在纤芯传播, 即以基模的形式进行传输, 因此基模模场分布是衡量光纤特性的重要标准. 图2给出了在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处, $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$ 时不同偏振方向的基模模场分布情况. 从图中可以看出, 对于 X, Y 偏振方向, 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处模场能量集中在纤芯, 满足光纤单模传输的要求.

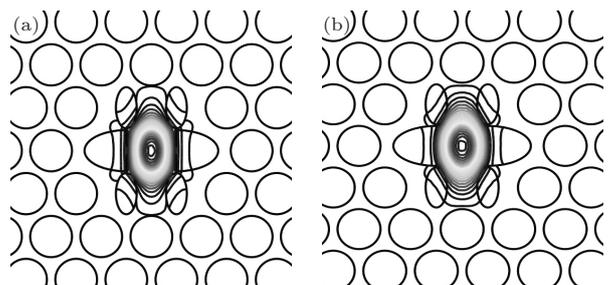


图2 PCF的模场分布图 (a) X偏振方向; (b) Y偏振方向

3.2 有效模面积

图3给出了不同孔间距 Λ 下, PCF X, Y偏振方向的有效模面积 A_{eff} 随波长的变化情况. 由图可知, 相同的 Λ 下, A_{eff} 随着波长和 Λ 的增加而增大, 但X偏振态 A_{eff} 的增加幅度略大, 在孔间距 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$, 波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处, X, Y偏振方向的有效模面积 A_{eff} 分别为 $2.86 \mu\text{m}^2$ 和 $2.45 \mu\text{m}^2$, 相比较参考文献[8, 9, 23]而言, 具有更小的基模模场面积.

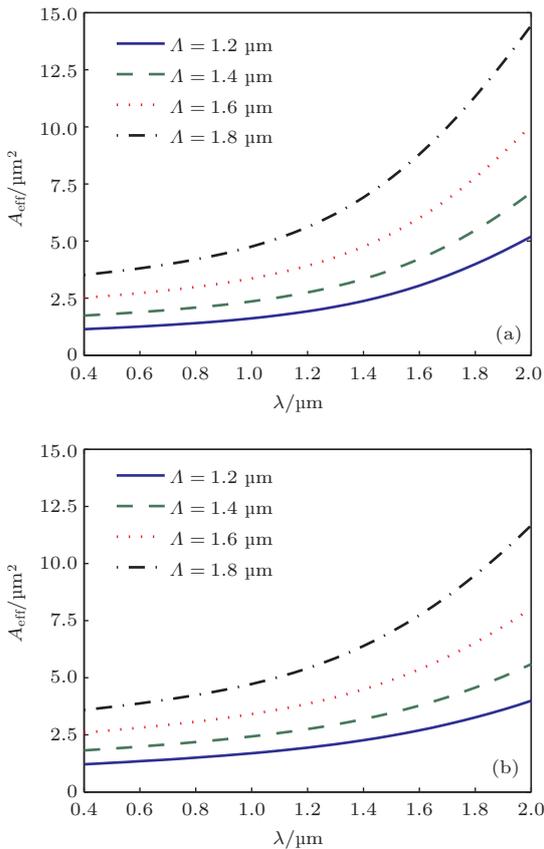


图3 不同孔间距下的有效模面积 (a) X偏振方向; (b) Y偏振方向

3.3 非线性特性

不同孔间距PCF的非线性系数 γ 随波长的变化如图4所示, 从图中可以得出, 光纤的 γ 值随着波长的增加而逐渐减小, 随着 Λ 的减小而增大, 因此我们可以根据需要的非线性特性设计相应的PCF结构. 同时, 在孔间距 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$, 波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处X, Y偏振态的非线性系数 γ 分别为 $45.36 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 $50.33 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, 与文献[8, 23]报道的非线性相比较, 采用本文结构的PCF具有更高的非线性, 其在光孤子通信、光纤器件和超连续

光谱的产生等方面具有重要的作用.

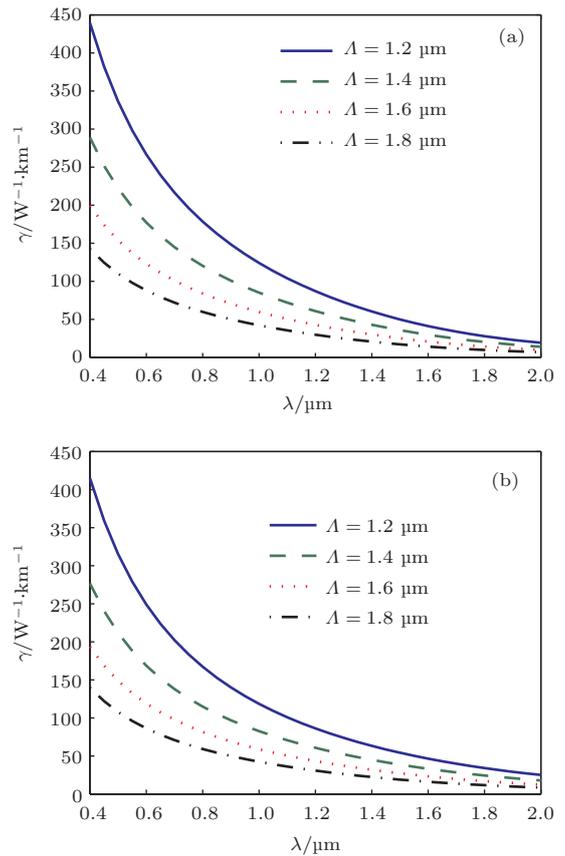


图4 不同孔间距下的非线性系数 (a) X偏振方向; (b) Y偏振方向

3.4 色散特性

光纤色散会导致光脉冲在传播过程中展宽, 使前后脉冲互相交叠, 引起信号的码间串扰, 因此色散是限制光通信速率进一步提高的因素之一. 图5为不同孔间距 Λ 下的X, Y偏振态的色散特性, 从图中可以看出, 在近红外波段, X, Y偏振态都出现了两个零色散波长, 这在高功率超连续光谱的产生方面具有重要应用. 同时, 随着孔间距 Λ 的增加, 零色散波长出现红移. 更重要的是, 在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处的总色散非常小, 完全可以通过结构参数的设置使该光纤通信波长处的总色散为零.

3.5 双折射特性

高双折射PCF在光通信和光纤传感器中有重要的应用, 本文孔间距PCF的双折射随波长的变化情况如图6所示. 由图可知, 双折射 B 随波长的增大而增大, 随孔间距 Λ 的增大而减小. 当孔间距 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$ 、椭圆度 $\eta = 0.5$ 、半椭圆长轴 $d_1 = 1 \mu\text{m}$ 和半椭圆位置 $L = 0.6 \mu\text{m}$ 时, 其在波

长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处的双折射可达 2.54×10^{-2} , 与已知文献 [8—11] 相比, 本文所提 PCF 具有更大的双折射.

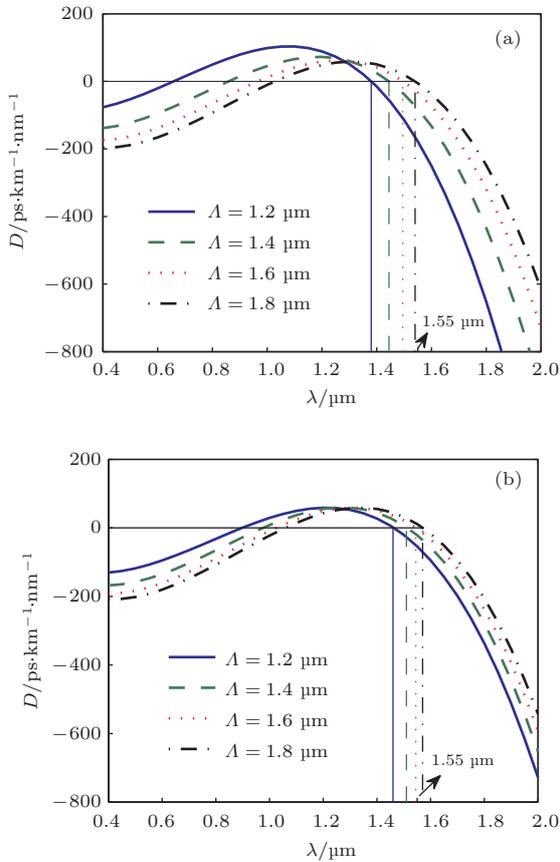


图5 不同孔间距下的色散曲线 (a) X 偏振方向; (b) Y 偏振方向

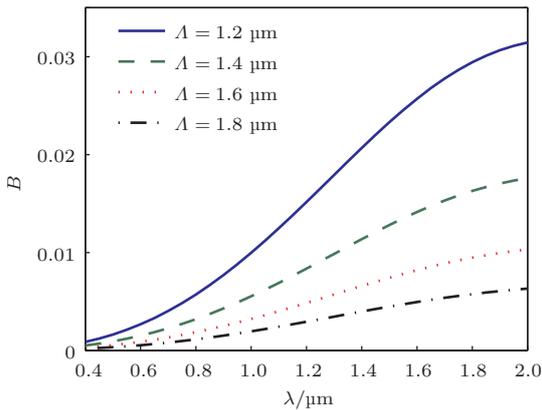


图6 不同孔间距的双折射曲线

此外, 大量的数值计算结果表明, 其他参数如半椭圆空气孔的尺寸、位置和椭圆空气孔的椭圆度也对所提出的新型光子晶体光纤的上述性能有不

同程度的影响. 比如, 1) 随着 d_1 的减小, $1.55 \mu\text{m}$ 附近的零色散波长左移, 且短波长域的色散变得平坦, 但非线性系数基本保持不变, 而且双折射 B 小幅度减小. 2) 半椭圆空气孔的位置 L 决定零色散波长的个数, 在 $L = 0.4 \mu\text{m}$ 时 X 偏振方向只有一个零色散波长点, 而 Y 偏振方向无零色散波长点. 另外, 随着 L 的减小, X 和 Y 偏振方向的非线性系数基本保持不变, 但双折射 B 增大, 且增大幅度明显. 3) 随着椭圆度 η 的减小, X 偏振方向在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近的零色散波长向长波方向小幅移动, 但 Y 偏振方向在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近的零色散波长基本保持稳定, 而且其双折射 B 基本保持不变, 但是该光纤的非线性系数增大, 当椭圆度 $\eta = 0.4$ 时, X 和 Y 偏振方向的非线性系数值分别为 $50.22 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $54.61 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 高于文献 [8] 和 [23] 报道的数值. 作为示例, 半椭圆尺寸 d_1 对双折射 B 的影响情况、半椭圆位置 L 对 Y 偏振方向色散的影响情况和椭圆度 η 对 Y 偏振方向非线性系数的影响情况分别如图 7—图 9 所示.

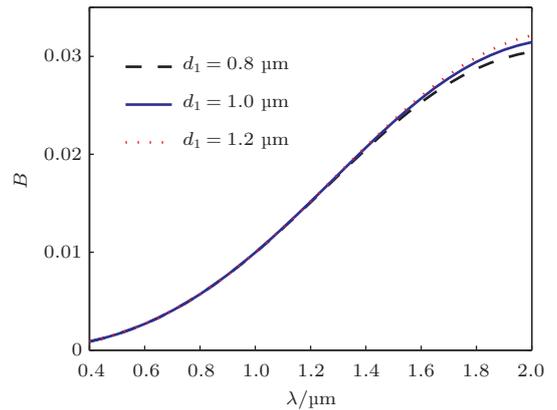


图7 半椭圆尺寸对双折射 B 的影响

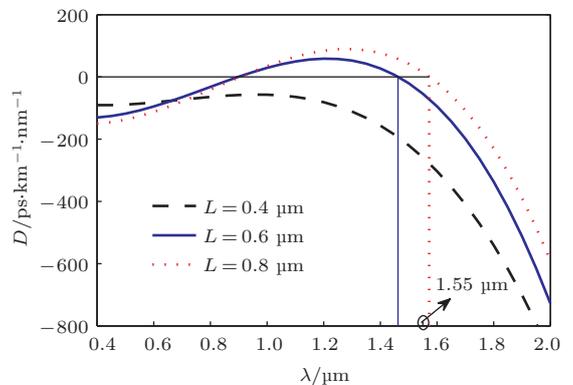


图8 半椭圆位置对 Y 偏振方向色散的影响

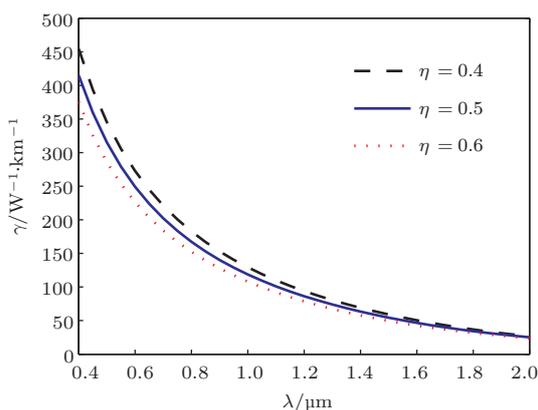


图9 椭圆度对Y偏振方向非线性系数的影响

4 结 论

本文设计了一种新结构的光子晶体光纤, 并采用具有完美匹配层吸收边界条件的有限元法对该结构不同偏振方向的特性进行数值计算. 当孔间距 $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$ 、椭圆度 $\eta = 0.5$ 、半椭圆尺寸 $d_1 = 1 \mu\text{m}$ 和半椭圆位置 $L = 0.6 \mu\text{m}$ 时, 该光纤在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处获得 2.54×10^{-2} 的高双折射. 当椭圆度 $\eta = 0.4$ 时, 在 X, Y 偏振方向分别获得 $50.22 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $54.61 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的高非线性系数. 除此, 半椭圆的位置决定零色散波长的个数, 通过合理设置其位置参数, X, Y 偏振方向都出现了两个零色散波长, 其中的一个零色散波长出现在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近. 本光纤的结构设计为获得高非线性、高双折射和多零色散波长光纤的设计提供了一种新的方法, 该光纤将在光孤子通信、光纤器件、光纤传感、高速光网络和超连续谱传输等方面发挥重要的作用.

参考文献

[1] Knight J C, Birks T A, Russell PSJ, Atkin DM 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547
 [2] Knight J C, Birks T A, Cregan R F, Russell P St. J, de Sandro J P 1998 *Electron. Lett.* **34** 1437
 [3] Li S G, Xing G L, Zhou G Y, Hou L T 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 238 (in Chinese) [李曙光, 邢光龙, 周桂耀, 侯蓝田 2006 物理学报 **55** 238]

[4] Liu X Y, Zhang F D, Zhang M, Ye P D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 301 (in Chinese) [刘小毅, 张方迪, 张民, 叶培大 2007 物理学报 **56** 301]
 [5] Zhang X J, Zhao J L, Hou J P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4668 (in Chinese) [张晓娟, 赵建林, 侯建平 2007 物理学报 **56** 4668]
 [6] Xia C M, Zhou G Y, Han Y, Liu Z L, Hou L T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094213 (in Chinese) [夏长明, 周桂耀, 韩颖, 刘兆伦, 侯蓝田 2011 物理学报 **60** 094213]
 [7] Xu Q, Miao R C, Zhang Y N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234210 (in Chinese) [许强, 苗润才, 张亚妮 2012 物理学报 **61** 234210]
 [8] Liang J, Yun M J, Sun X, Zhang W F, Xi S X 2011 *Optik.* **122** 2151
 [9] Chen D, Liu X A, Wu G 2012 *J. Electromagnet. Wave.* **26** 1864
 [10] So Eun Kim, Bok Hyeon Kim, Chung Ghiu Lee 2012 *Opt. Exp.* **20** 1385
 [11] Mohit Sharma, Nitu Borogohain, S. Konar 2013 *J. Lightw. Tech.* **31** 3339
 [12] Ferrando A, Silvestre E, Miret J J 1999 *Opt. Lett.* **24** 276
 [13] Lou S Q, Ren G B, Yan F P, Jian S S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1229 (in Chinese) [娄淑琴, 任国斌, 延凤平, 简水生 2005 物理学报 **54** 1229]
 [14] Jiang H M, Kang X, Wang Y F 2009 *Sci. China, Ser. E: Technol. Sci.* **39** 1256 (in Chinese) [姜海明, 谢康, 王亚非 2009 中国科学 **39** 1256]
 [15] Li S G, Liu X D, Hou L T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2811 (in Chinese) [李曙光, 刘晓东, 侯蓝田 2003 物理学报 **52** 2811]
 [16] Zhao X T, Hou L T, Liu Z L, Wang W, Wei H Y and Ma J R 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2275 (in Chinese) [赵兴涛, 侯蓝田, 刘兆伦, 王伟, 魏红彦, 马景瑞 2007 物理学报 **56** 2275]
 [17] Fang H, Lou S Q, Guo T Y, Yao L, Li H L, Jian S S 2008 *Chin. Phys. B* **17** 232
 [18] BRECHET F, MARCOU J, PAGNOUX D 2000 *Opt. Fiber Technol.* **6** 181
 [19] Zhang X J, Zhao J L, Hou J P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4668 (in Chinese) [张晓娟, 赵建林, 侯建平 2007 物理学报 **56** 4668]
 [20] KOSHIBA M. IEEE. T 1992 *Microw. Theory.* **40** 371
 [21] Lou S Q, Wang X, Lu W L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 84216 (in Chinese) [娄淑琴, 王鑫, 鹿文亮 2013 物理学报 **62** 84216]
 [22] I. H. MALITSON 1965 *J. Opt. Soc. Am.* **55** 1205
 [23] Cao Y, Li R M, Tong Z R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084215 (in Chinese) [曹晔, 李荣敏, 童峥嵘 2013 物理学报 **62** 084215]

Photonic crystal fibers with high nonlinearity, large birefringence and multiple zero dispersion-wavelength*

Wang Er-Lei¹⁾ Jiang Hai-Ming^{1)†} Xie Kang¹⁾ Zhang Xiu-Xia¹⁾²⁾

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

2) (School of Electronics and Information Engineering, Beifang University of Nationalities, Yinchuan 750021, China)

(Received 27 December 2013; revised manuscript received 25 February 2014)

Abstract

A novel kind of total internal reflection photonic crystal fiber (TIR-PCF) with highly nonlinear, large birefringence and multiple zero-dispersion wavelengths is designed. Characteristics such as birefringence, effective mode areas, nonlinearity and dispersion are investigated by finite element method (FEM). Numerical results demonstrate that the birefringence is 2.54×10^{-2} at the wavelength of $1.55 \mu\text{m}$, and high nonlinear coefficients ($50.22 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ and $54.61 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ in X, Y polarization directions respectively) are obtained by setting the appropriate structure parameters. In addition, two zero-dispersion wavelength points appear in the infrared band, one of which emerges near the wavelength of $1.55 \mu\text{m}$. The design provides a new structure for large birefringence, highly nonlinear and photonic crystal fiber with multiple zero-dispersion wavelengths, and it could be widely used in polarization control, nonlinear optics, dispersion management and super-continuum generation.

Keywords: photonic crystal fiber, large birefringence, highly nonlinear, zero-dispersion

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

DOI: 10.7498/aps.63.134210

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60588502, 60607005, 60877033 and 51365001).

† Corresponding author. E-mail: hmjiang@hfut.edu.cn