

一种高双折射高负平坦色散压缩型光子晶体光纤

武丽敏, 宋朋, 王静, 张海鹏, 周城, 陈涛, 张峰

(济南大学物理科学与技术学院, 山东 济南 250022)

摘要: 设计了一种具有高负平坦色散特性的压缩型高双折射光子晶体光纤。为了获得高双折射特性, 光纤包层采用压缩三角格子和椭圆空气孔的结构; 为了提高控制色散的灵活性, 在纤芯加入小的缺陷空气孔。基于超格子构造法, 详细地模拟分析了光纤的双折射、色散特性。研究表明: 在波长 1.3~1.8 μm 的宽波段范围内, 可获得高负平坦色散且色散值约为 $-667 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 色散值在 $\pm 7 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的范围内变化; 双折射在波长研究范围内都实现了 10^{-2} 的高数量级, 且在 1.55 μm 处可达到 2.21×10^{-2} 。基于此种光纤的高负色散特性和高双折射在光传输系统及光纤传感有广泛应用。

关键词: 光子晶体光纤; 高双折射; 高负平坦色散; 超格子构造法

中图分类号: TN252 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.S120001

A squeezed lattice high negative dispersion and high birefringence photonic crystal fiber

Wu Limin, Song Peng, Wang Jing, Zhang Haikun, Zhou Cheng, Chen Tao, Zhang Feng

(School of Physics and Technology, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: A squeezed high birefringence Photonic Crystal Fiber (PCF) with high negative flattened dispersion characteristics was proposed. In order to obtain the high birefringence characteristics, the cladding of PCF was made of squeezed triangular lattice and elliptical air holes. In order to improve the flexibility of controlling the dispersion, the core of PCF was added into a small defect air hole. The birefringence and dispersion characteristics were analyzed by super lattice method. The simulation results show that the designed PCF offers ultra flattened negative dispersion ($-667 \pm 7 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$) in a broad range of wavelengths from 1.3 μm to 1.8 μm , the birefringence can be reached the magnitude of 10^{-2} and the high birefringence can be reached 2.21×10^{-2} at 1.55 μm . Based on the high negative dispersion and high birefringence characteristic, PCF will be widely used in optical transmission system and optical fiber sensing.

Key words: photonic crystal fiber; high birefringence; high negative flattened dispersion; supercell lattice method

收稿日期: 2016-02-09; 修订日期: 2016-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(61308057); 山东省优秀青年科学家科学基金(BS2012DX003); 山东省高等学校科技计划项目(J13LJ03)

作者简介: 武丽敏(1989-), 女, 硕士生, 主要从事光子晶体光纤设计方面的研究。Email: liminverygood@163.com

导师简介(通讯作者): 宋朋(1980-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事特种光纤的设计与应用、光纤器件的设计与应用以及光纤通信方面的研究。Email: song_p1980@163.com

0 引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)自 1996 年问世以来,由于其优越的传输特性一直受到国内外科研工作者的关注,如高双折射^[1]、可调色散^[2]、无限单模传输^[3]、高非线性^[4]等特性。

具有高双折射高负色散特性的光子晶体光纤在波分复用系统、偏振保持传输系统及信号控制系统中都有很高的应用潜能。此类光子晶体光纤已有很多报道, M. Samiul Habib 等人^[5-6]设计了一系列具有高负色散特性的光子晶体光纤,其中一种光纤的双折射可达到 2.11×10^{-2} 且在宽波段范围内具有高负色散,但是该光纤的色散随波长变化很大;另有一种光纤可在 $0.98 \sim 1.580 \mu\text{m}$ 的波长范围内实现平坦色散,其色散值达到 $-138 \pm 6 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。M. I. Hasan 等人^[7]设计了一种包层具有混合格子的高双折射负色散补偿光子晶体光纤,其双折射高达 3.79×10^{-2} ,但色散斜率变化比较大,其包层由于采用了多种晶格加大了光纤拉制难度。Yashar E. Monfared 等人^[8]设计了一种双芯高双折射色散补偿光子晶体光纤,其色散值高达 $-2.305 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,但双折射较低且色散补偿的波段范围较窄。

设计了一种具有宽波段色散补偿特性的高双折射光子晶体光纤。采用压缩三角格子和在纤芯中增添一个小椭圆空气孔的简单结构来获得高负色散特性和高双折射特性。运用超格子构造法数值计算了光子晶体光纤的双折射和色散等传输特性,研究结果表明:光纤具有 10^{-2} 量级的高双折射,同时在宽波段内具有平坦高负色散特性。值得一提的是,此类光子晶体光纤的结构变化对双折射特性影响很小,而且在宽波段内具有高负平坦色散。

1 理论基础

PCF 横截面结构如图 1 所示。其结构包含椭圆孔和压缩三角格子,所有椭圆空气孔具有相同的椭圆度。椭圆孔的长轴定义为 D_y ,短轴定义为 D_x ,中心小孔的长轴定义为 d_y ,短轴定义为 d_x 。为了表征椭圆孔空气孔的压缩程度,定义椭圆度(Elliptical Ratio, ER):

$$\text{ER} = \frac{D_y}{D_x} = \frac{d_y}{d_x} \quad (1)$$

压缩三角格子 x 轴方向的孔间距表示为 L_x , y 轴方向的孔间距表示为 L_y 。为了表征晶格压缩程度,定义晶格压缩比(Squeezing Ratio, SR):

$$\text{SR} = \frac{2L_y}{L_x} \quad (2)$$

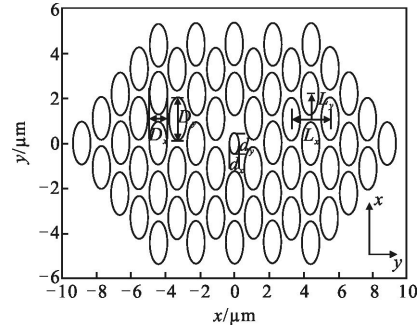


图 1 PCF 的横截面结构示意图

Fig.1 Cross-sectional view of the proposed PCF

采用超格子构造法数值计算出光纤 x -偏振基模和 y -偏振基模的有效折射率,分别用 $n_{\text{eff}x}$ 和 $n_{\text{eff}y}$ 表示,则光纤双折射 B 定义为:

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

光纤的色度色散 D 包括材料色散 D_w 和波导色散 D_M ,其公式为:

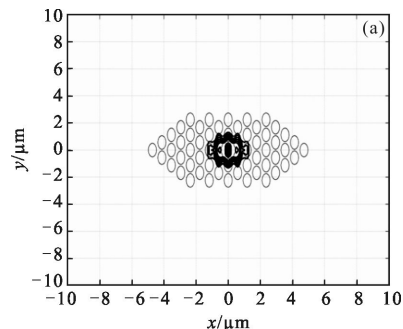
$$D = D_w + D_M \quad (4)$$

式中:材料色散 D_M 可以由 Sellmeier 公式获得。光纤波导色散系数 $D_w(\lambda)$ 由公式(5)表示:

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

2 模拟结果和讨论

为了研究光纤参数对双折射和色散特性的影响,设定工作波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。图 2 为包层中空气孔 x 轴孔间距 $L_x = 1.18 \mu\text{m}$ 、 $\text{SR} = 0.95$ 、 $D_x = D = 1 \mu\text{m}$ 、 $d_x = d = 0.48 \mu\text{m}$ 时光场能量的横截面分布。由图 2 可以看出, x -偏振基模和 y -偏振基模的光场能量都被很好地束缚在光纤纤芯中。



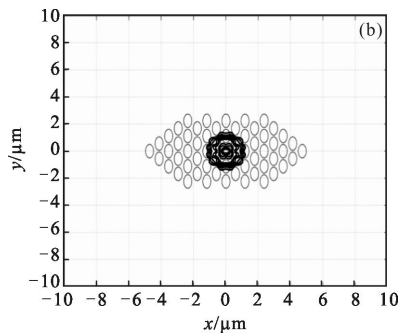


图 2 x-偏振模的模场分布和 y-偏振模的模场分布

Fig.2 Electric field distributions of respectively x- and y-polarization modes

2.1 空气孔椭圆度对光纤特性的影响

光纤包层和纤芯中的椭圆空气孔对光纤特性有着重要影响。设定 $L_x=1.18 \mu\text{m}$, $SR=0.95$, $D_x=D=1 \mu\text{m}$, $d_x=d=0.48 \mu\text{m}$, ER 的变化范围为 $(1.85, 2.0)$ 。图 3(a) 描述了 ER 对光纤双折射和有效折射率的影响。从图 3 中可以看出, y -偏振基模的有效折射率总是大

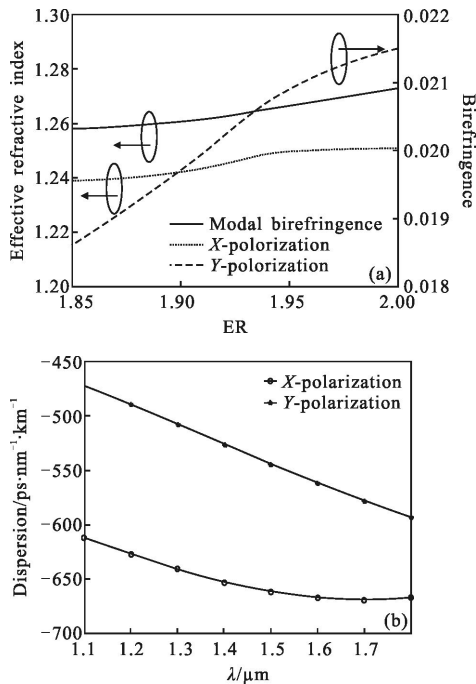


图 3 有效折射率和双折射随 ER 的变化规律及 $ER=2$ 时 x -和 y -偏振基模的色散曲线

Fig.3 Effective refractive index and modal birefringence versus ER , the dispersion with λ of x - and y -polarization modes when $ER=2$

于 x -偏振基模的有效折射率, 双折射随着 ER 增大而单调增大, 当 $ER=2$ 时其双折射 $B=2.15 \times 10^{-2}$ 。图 3(b)

描述的是 $ER=2$ 时 x -偏振基模和 y -偏振基模的色散系数随波长的变化规律。从图中可以看出, x -偏振基模和 y -偏振基模都具有高负色散系数, 在 $1.3 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 的波长范围内 y -偏振模的色散高于 $-600 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 并且在此波长范围内随波长的变化较平坦。

2.2 包层空气孔对光纤特性的影响

双折射随包层大空气孔孔径 D 的变化规律如图 4(a) 所示。设定 $L_x=1.18 \mu\text{m}$, $ER=2$, $SR=0.95$, $d_x=d=0.48 \mu\text{m}$ 。双折射随包层大空气孔直径的增大而单调增大。图 4(b) 描述的是在不同包层大空气孔 D 时 y -偏振模式色散随波长的变化规律。从图中可以看出, 色散在波长 $1.1 \sim 2 \mu\text{m}$ 的宽波段内可以实现平坦高负色散特性。当 $D=0.98 \mu\text{m}$ 时色散在较宽波长范围内比较平坦, 并且色散大于 $-600 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

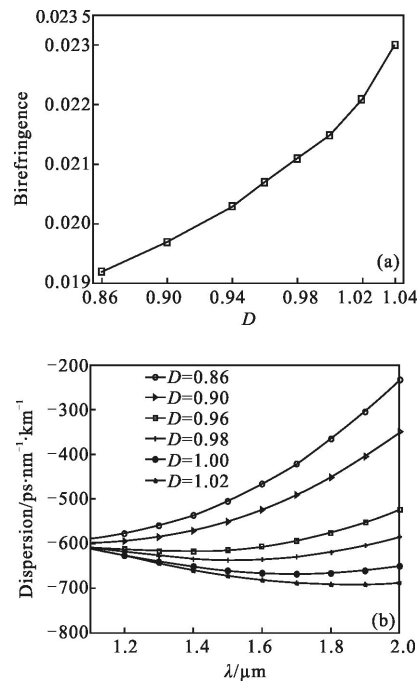


图 4 双折射 D 的变化规律和色散随波长的变化规律

Fig.4 Modal birefringence versus D and the dispersion with λ

2.3 中心空气孔对光纤特性的影响

图 5(a) 描述了波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时光纤双折射随中心空气孔孔径 d 的变化规律。中心空气孔直径 d 的变化范围为 $(0.48 \mu\text{m}, 0.56 \mu\text{m})$ 。由图可得, 中心空气孔的直径 d 对双折射的影响很小, 双折射在此条件下达到 2.16×10^{-2} 。图 5 (b) 展示了 PCF 在 $L_x=1.18 \mu\text{m}$, $ER=2$, $SR=0.95$, $D=1.0 \mu\text{m}$, 不同中心空气

孔 d 时色散随波长的变化规律。由图可见,在 $1.1\sim 2\mu\text{m}$ 的宽波段内,通过设置合适的 $d=0.5\mu\text{m}$ 值可以获得平坦高负色散特性。值得注意的是,在波长为 $1.5\mu\text{m}$ 时,光纤色散值随中心空气孔直径 d 的变化保持恒定,这样的现象说明了 PCF 在此工作波长时,光纤的结构参数波动对光纤色散特性的影响较小,有利于降低拉制过程中的工艺难度,减小制作误差对色散特性的影响。

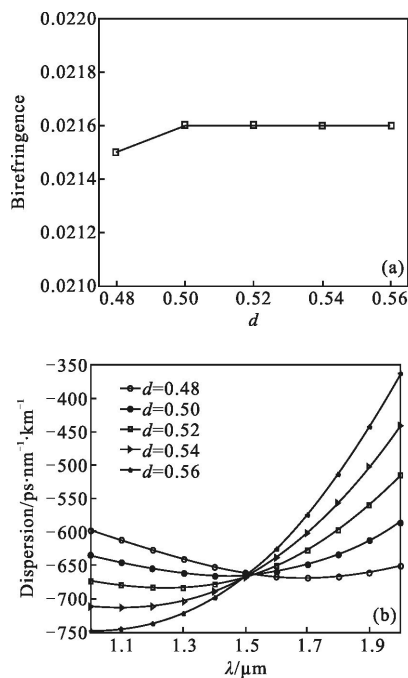


图 5 双折射随包层小空气孔的变化和色散随波长的变化
Fig.5 Modal birefringence versus d and the dispersion with λ

2.4 晶格压缩比对光纤特性的影响

对于 PCF 的晶格压缩比及空气孔的值而言,两者都不能无限制地增大或减小,要选择适当的参数来避免空气孔重叠。图 6(a)描述了双折射随晶格压缩比的变化规律,其中压缩比的变化范围为 $(0.93, 0.96)$, $L_x=1.18\mu\text{m}$, $D=1.0\mu\text{m}$, $d=0.5\mu\text{m}$, $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 。可以看出双折射随压缩比 SR 增大而单调减小,但是总的来说变化幅度不大,最大值与最小值相差 0.0015 。图 6(b)描述了在不同晶格压缩比时色散随波长的变化规律。可以看出晶格压缩比发生微小变化时色散特性发生较大的变化。结合晶格压缩比对双折射的影响规律,选取 $SR=0.94$ 作为优化参数,此时光纤双折射可达到 2.21×10^{-2} ,在 $1.3\sim 1.8\mu\text{m}$ 的宽波段内光纤色散可达到 $-667\pm 7\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。

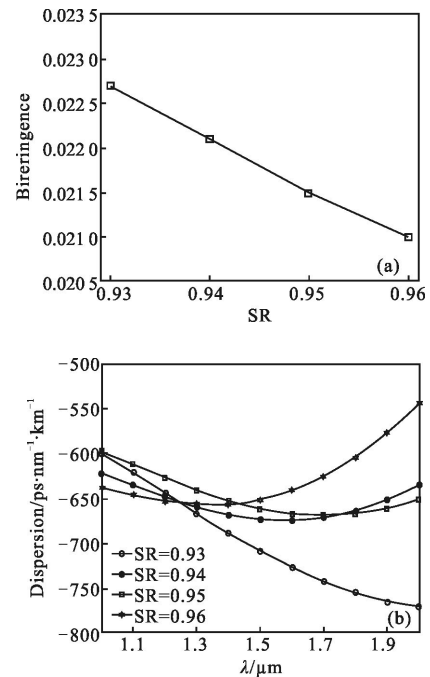


图 6 晶格压缩比对双折射的影响规律和不同晶格压缩比时光纤色散随波长的变化规律

Fig.6 Modal birefringence versus SR and the dispersion with λ

3 结论

运用压缩三角格子和椭圆空气孔设计了一种平坦高负色散、高双折射光子晶体光纤。运用超格子构造法数值计算了空气孔椭圆度、空气孔直径及晶格压缩比对 PCF 传输特性的影响。研究表明:设定合适的结构参数,PCF 可以获得高双折射高负平坦色散特性,在波长 $1.55\mu\text{m}$ 处双折射可达到 2.21×10^{-2} , y -偏振基模的色散可在较宽波段内实现 $-667\pm 7\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 的高负色散。基于其高双折射和高负色散特性,此种 PCF 在波分复用系统、偏振保持系统等有潜在应用。

参考文献:

- [1] Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Wadsworth W J, et al. Highly birefringent photonic crystal fibers [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(18): 1325-1327.
- [2] Díaz-Soriano A, Ortiz-Mora A, Dengra A. A new low-dispersion and large-effective-area PCF based on a fractal design [J]. *Optik*, 2015, 21: 69-72.
- [3] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, et al. Single-mode photonic band gap guidance of light in air [J]. *Science*,

- 1999, 285(5433): 1537–1539.
- [4] Wei Shuai, Yuan Jinhui, Yu Chongxiu, et al. Design on a highly birefringent and highly nonlinear tellurite ellipse core photonic crystal fiber with two zero dispersion wavelengths [J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20: 320–324.
- [5] Habib M S, Ahmad R, Habib M S, et al. Design of single polarization single mode dispersion compensating photonic crystal fiber[J]. *Optik*, 2014, 125: 4313–4318.
- [6] Habib M S, Habib M S, Hasan M I, et al. A single mode ultra flat high negative residual dispersion compensating photonic crystal fiber [J]. *Optik*, 2014, 20:328–332.
- [7] Hasan M I, Habib M S, Habib M S, et al. Highly nonlinear and highly birefringent dispersion compensating photonic crystal fiber [J]. *Optik*, 2014, 20: 32–38.
- [8] Monfared Y E, Mojtahedinia S A. Highly birefringent photonic crystal fiber with high negative dispersion for broadband dispersion compensation [J]. *Optik*, 2014, 125 (20): 5969–5972.