

具有压缩三角格子的高双折射色散补偿光子晶体光纤

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: 设计了一种具有高双折射和高负色散特性的光子晶体光纤。在包层中, 采用压缩三角格子和两种不同大小椭圆空气孔。基于超格子构造法, 研究了光子晶体光纤的结构参数对双折射特性和色散特性的影响。数值研究结果表明: 双折射在 1.1~1.9 μm 的宽波段范围内达到 10^{-2} 的高数量级, 色散在 1.4~1.8 μm 的宽波段范围内实现了高负色散, 而且在传输窗口波长 1.55 μm 处, 双折射可达到 3.4×10^{-2} , x -和 y -偏振基模色散分别为 -127 ps/nm/km 和 -428 ps/nm/km 。此外, 双折射、色散和有效面积特性随光子晶体光纤结构的变化也进行了详细的研究。基于其高双折射和高负色散特性, 此种光纤可以广泛用于色散补偿光纤和偏振依赖型通讯系统。

关键词: 光子晶体光纤; 高双折射; 高负色散; 超格子构造法

中图分类号: TN252 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0173-05

High birefringence and dispersion compensation photonic crystal fiber with squeezed triangular lattice

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 high birefringence and high negative dispersion photonic crystal fiber (PCF) was investigated, which adopted both squeezed triangular lattice and two kinds of elliptical air holes in the cladding. The supercell lattice method was used to investigate the influence of the fiber parameters on the birefringence and dispersion properties. The simulation results show that the birefringence can reach the magnitude of 10^{-2} in a broad range of wavelengths from 1.1 μm to 1.9 μm , and the dispersion can achieve high negative dispersion in a broad range of wavelengths from 1.4 μm to 1.8 μm . This PCF also has high birefringence (3.4×10^{-2} at 1.55 μm), high negative dispersion (-428.2 ps/nm/km and -126.9 ps/nm/km and in y - and x - polarizations at 1.55 μm , respectively). Moreover, the effective area was also discussed. This PCF can be widely used as dispersion compensation PCF and polarization dependent communication system.

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

收稿日期: 2015-10-20; 修订日期: 2015-11-23

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: 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

在过去的几十年中,光子晶体光纤由于其结构设计的高自由度和优越的光学特性,越来越受到科研工作者的关注。光子晶体光纤^[1]可实现传统光纤中难以实现的奇异特性,如高双折射^[2]、可调谐色散^[3]、高非线性^[4]和无限单模传输等。

色散会引起脉冲展宽、增大信号误码率,一直都是光纤传输系统急需解决的难题之一。目前,高负色散补偿光子晶体光纤是解决色散问题最有效的方法。其原理是通过在光纤链路中接入较短长度的高负色散补偿光纤,从而补偿很大长度光纤产生的色散,而且其接入损耗也相对较低。关于高负色散光子晶体光纤的报道已有很多,目前已报道的结构采用的方案有:在包层中引入多种不同形状或尺寸的空气孔^[5];在包层中设计不同的晶格格点^[6];采取双包层或多包层光纤结构^[7]。由于结构复杂,上述光纤结构虽然增大了负色散,但同时也加大了光纤制造的难度。

双折射是光子晶体光纤重要传输特性之一。高双折射光子晶体光纤在很多方面都有重要用途,如在远距离传输系统保持光子晶体光纤模式的偏振特性,可以制造偏振分束器,且在研制波分复用系统、光纤放大器、光纤陀螺等领域也具有广泛的应用前景。高双折射光子晶体光纤的设计原理主要是增大光子晶体光纤横截面垂直方向的不对称性。已报道的高双折射光子晶体光纤采用的方案主要有:在包层中包含不同形状的空气孔或掺杂不同的材料^[8];采用不同包层晶格格点等^[9]。

设计了一种高双折射高负色散补偿光子晶体光纤。包层中采用压缩三角格子和椭圆空气孔,同时减小光纤横截面垂直方向的椭圆空气孔。设置合适的参数可以获得高双折射和高负色散,同时可以降低光子晶体光纤拉制难度。基于超格子构造法^[10]数值分析了光子晶体光纤传输特性。模拟结果显示:在宽波段范围内双折射可达到 2×10^{-2} 量级以上;在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处, x -和 y -偏振基模色散分别为 -127 ps/nm/km 和 -428 ps/nm/km 。

1 理论基础

光子晶体光纤的横截面结构如图 1 所示,其结构由压缩三角格子和椭圆孔构成。光子晶体光纤的

基底材料为二氧化硅,其折射率为 1.45,空气的折射率为 1。通过压缩三角格子和具有不同直径空气孔的双重效应获得高双折射和高负色散。包层中三角格子在 x 轴和 y 轴方向上空气孔与空气孔中心之间的距离分别用 $L_x(=L)$ 和 L_y 表示,晶格压缩的程度用晶格压缩比(SR)来表示,其定义为 $SR=2L_y/L_x$ 。包层中大空气孔的长轴和短轴分别为 D_x 和 D_y ,小空气孔的长轴和短轴分别为 d_x 和 d_y ,两种不同尺寸的空气孔有相同的椭圆度(ER)。 ER 用来表征椭圆空气孔压缩的程度,其定义为 $ER=D_y/D_x=d_y/d_x$ 。

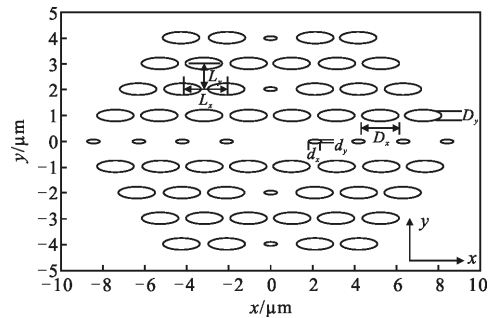


图 1 光子晶体光纤的横截面结构

Fig.1 Cross-sectional view of the proposed PCF

采用超格子构造法模拟计算出光纤 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:

$$B=|n_{\text{eff}y}-n_{\text{eff}x}| \quad (1)$$

光纤的色度色散 $D_{\text{总}}$ 包括材料色散 D_M 和波导色散 D_W ,其公式为:

$$D_{\text{总}}=D_M+D_W \quad (2)$$

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(3)表示:

$$D_W(\lambda)=-\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \quad (3)$$

有效面积是衡量光纤非线性的重要指标。在光纤中有效面积越小,光功率越集中,越会引起较强的非线性效应。另外有效面积还决定了数值孔径 NA 、宏弯损耗以及熔接损耗等。因此有效面积是光纤设计中的重要参量。光纤有效面积定义为光纤横截面有效面积 A_{eff} ,由公式(4)表示:

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

式中: $E(x,y)$ 为光纤中的横向电场分量。

2 模拟计算与数据分析

为了研究光纤参数对双折射、色散和有效面积的影响,文中光纤工作波长为 $1.55\ \mu\text{m}$,包层中大空气孔间距 $\Lambda=2.1\ \mu\text{m}$ 。图 2 所示为包层中大空气孔长轴 D_x 为 0.9Λ 、小空气孔长轴 d_x 为 0.3Λ 、椭圆度 $ER=0.55$ 、晶格压缩比 $SR=0.8$ 时,光纤横截面光场能量分布。由图 2 可以看出,光能量被很好地束缚在光纤纤芯中。通过设定不同的结构参数,研究晶格压缩比、椭圆度和空气孔直径等参数对光纤特性的影响。

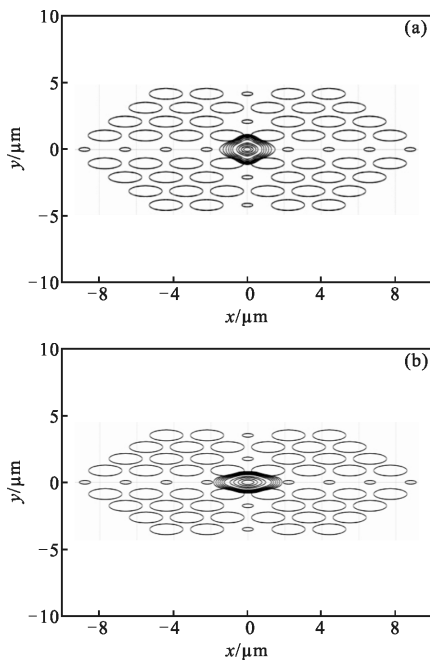


图 2 x -偏振基模场分布和 y -偏振基模场分布
Fig.2 x -polarized modes and y -polarized modes

2.1 晶格压缩比对光纤特性的影响

为了研究 SR 对双折射、色散和有效面积的影响,光纤工作波长为 $1.55\ \mu\text{m}$,包层中大空气孔长轴 D_x 为 0.9Λ ,小空气孔长轴 d_x 为 0.3Λ 。图 3 所示为 $ER=0.55$ 、变化范围为 $(0.8, 1)$ 时, SR 对有效折射率、双折射、色散和有效面积的影响。由图 3(a)可得, x -偏振基模的有效折射率始终大于 y -偏振基模的有效折射率,且随着 SR 的增大, x -与 y -偏振基模的折射率差值减小,即随着 SR 的变小光纤双折射 B 逐渐变大。当 $SR=0.8$ 时,双折射达到 1.6×10^{-2} 。由图 3(b)可得,随着 SR 的减小光纤色散数值逐渐变大。当 $SR=0.8$ 时 y -偏振基模的色散达到 $-428\ \text{ps}/\text{nm}/\text{km}$, x -偏振基模的色散达到 $-127\ \text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 。 x -偏振基模

的色散变化较为平坦, y -偏振基模的色散变化较大。图 3(c)所示为 SR 的变化对光纤有效面积的影响。在 SR 逐渐变大的过程中, x -偏振基模的有效面积变化不大,在 $3.2\ \mu\text{m}^2$ 附近微小变化,而 y -偏振基模的有效面积随 SR 的变化从 $2.65\ \mu\text{m}^2$ 线性增大到 $3.70\ \mu\text{m}^2$ 。由此可见, SR 对 x -偏振基模的色散和有效面积的影响较小,而 y -偏振基模受 SR 的影响较大。

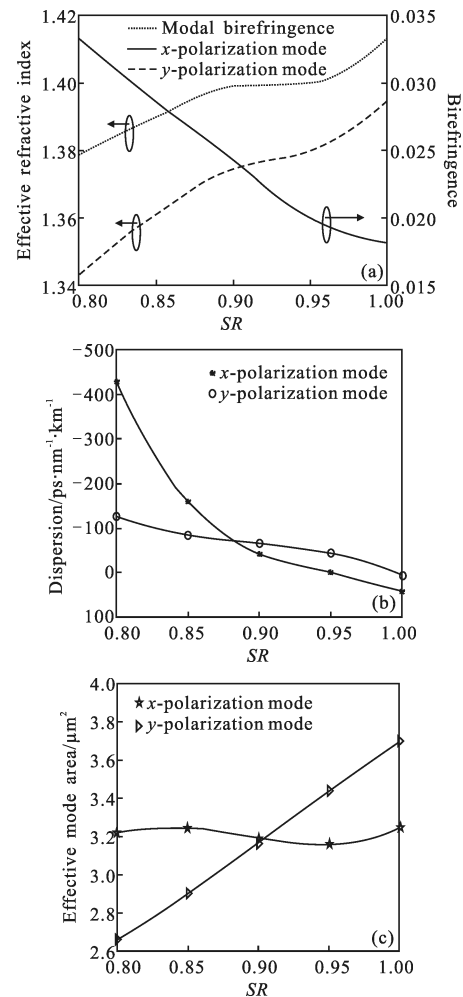
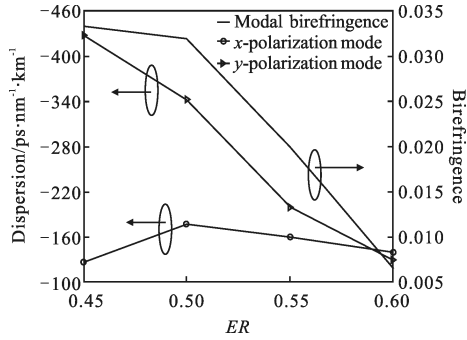


图 3 有效折射率、双折射、色散和有效面积随 SR 的变化规律
Fig.3 Effective refractive index, modal birefringence, the dispersion and effective mode area versus SR

2.2 空气孔椭圆度对光纤特性的影响

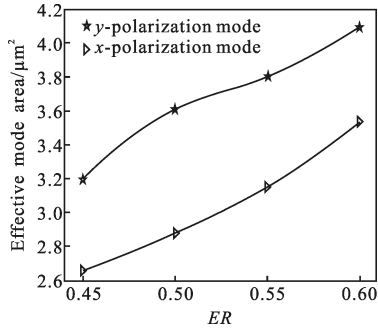
图 4 所示为空气孔 ER 对双折射、色散和有效面积的影响。考虑到实际拉制等因素,设定 $SR=0.8$, ER 的数值范围为 $(0.45, 0.6)$ 。由图 4(a)可得,光纤的双折射数值随着 ER 的变大先缓慢变小而后急剧变小,在 $ER=0.45$ 时双折射可达到 3.3×10^{-2} 。 y -偏振基模的色散随着 ER 的变大快速变小,在 $ER=0.45$ 时 y -偏振基模具有高负色散,其数值可达 $-425\ \text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 。 x -

偏振基模的色散在 -160 ps/nm/km 附近平坦变化。图 4(b) 表明, x -和 y -偏振基模的有效面积都随着 ER 的增大而增大。



(a) 色散和双折射随 ER 的变化规律

(a) Modal birefringence and the dispersion versus ER



(b) 有效面积随 ER 的变化规律

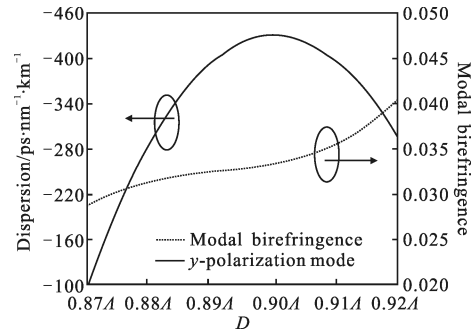
(b) Effective mode area versus ER

图 4 色散、双折射和有效面积随 ER 的变化规律

Fig.4 Dispersion, modal birefringence and effective mode area versus ER

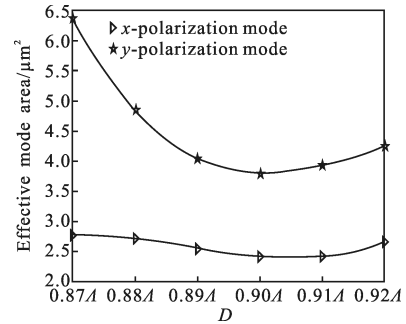
2.3 空气孔直径对光纤特性的影响

包层中含两种具有不同直径的空气孔, 其对光子晶体光纤特性的影响分别如图 5 和图 6 所示。图 5 所示为当 $ER=0.45$ 、 $SR=0.8$ 、 $d_x=0.3A$ 时, 包层中 $D_x=D$ 对光子晶体光纤特性的影响。图 6 所示为当 $ER=0.45$ 、 $SR=0.8$ 、 $D_x=0.9A$ 时, 包层中 $d_x=d$ 对光子晶体光纤特性的影响。图 5(a) 和图 6(a) 中, 双折射随着包层空气孔的增大而增大, 可以达到 10^{-2} 量级。 y -偏振基模的色散受 D_x 和 d_x 的影响几乎相同, 随着空气孔直径变大, 色散的数值先变大后变小, 色散最大值可以达到 -430 ps/nm/km 。从图 5(b) 和图 6(b) 中可以得到, y -偏振基模有效面积受包层空气孔尺寸的影响较大。由图 5 和图 6 可得, 当 D 为 $0.9A$ 和 d 为 $0.3A$ 时, 双折射达到最大 3.4×10^{-2} , 且 y -偏振基模的色散可达到 -430 ps/nm/km 。



(a) D_x 对双折射和色散的影响

(a) Modal birefringence and the dispersion versus D_x

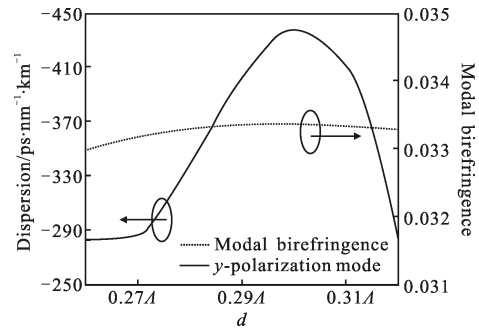


(b) D_x 对有效面积的影响

(b) Effective mode area versus D_x

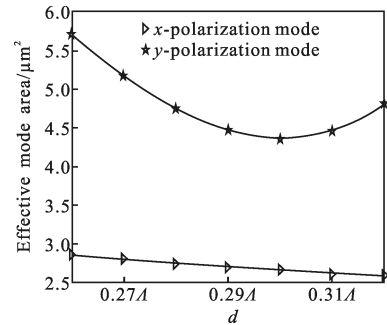
图 5 包层大空气孔 D_x 对双折射、色散和有效面积的影响

Fig.5 Modal birefringence, dispersion and effective mode area versus D_x



(a) d_x 对折射率和色散的影响

(a) Modal birefringence and the dispersion versus d_x



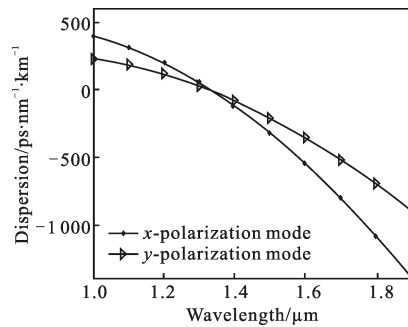
(b) d_x 对有效面积的影响

(b) Effective mode area versus d_x

图 6 包层小空气孔 d_x 对折射、色散和有效面积的影响

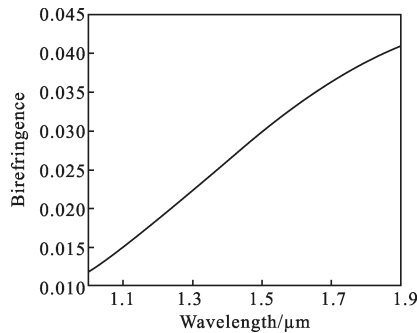
Fig.6 Modal birefringence, dispersion and effective mode area versus d_x

由以上分析,当 $ER=0.45$ 、 $SR=0.8$ 、 $d=0.3\lambda$ 、 $D=0.9\lambda$ 时,可以得到一种具有压缩三角格子高双折射色散补偿光子晶体光纤,其双折射和色散特性随波长的变化如图 7 所示。



(a) x -和 y -偏振基模随波长的变化

(a) Dispersion of x - and y - polarization mode versus wavelength



(b) 双折射随波长的变化

(b) Modal birefringence versus wavelength

图 7 x -偏振基模的色散、 y -偏振基模的色散和双折射随波长的变化

Fig.7 Dispersion of x -and y -polarization mode, and modal birefringence versus wavelength

3 结论

文中提出了一种具有压缩格子和椭圆孔的高双折射高负色散光子晶体光纤。分析了光纤结构参数对光子晶体光纤的色散、双折射和有效面积特性的影响。研究表明,此种光子晶体光纤可以在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处达到 3.4×10^{-2} 的高双折射和 $-430\ \text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 的高负色散。另外,光子晶体光纤还可实现低有效面积。基于其高双折射、高负色散和低有效面积,此类的光子晶体光纤在光信号传输过程、偏振保持传

输系统、超短脉冲产生等方面有很大的潜在应用。

参考文献:

- [1] Knight J C, Birks T A, Russell P St J, et al. All silica single-mode photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 1996, 21 (19): 1547-1549.
- [2] Li Zhiquan, Li Sha, Hao Rui, et al. Hybrid dual-cladding photonic crystal fiber with high birefringence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1044-1049. (in Chinese) 李志全, 李莎, 郝锐, 等. 混合双包层高双折射光子晶体光纤的特性[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 1044-1049.
- [3] Matsui T, Zhou J, Nakajima K, et al. Dispersion-flattened photonic crystal fiber with large effective area and low confinement loss [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(12): 4178-4183.
- [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(4): 320-324.
- [5] Mejbaul Haque M, ShaifurRahman M, Samiul Habib M, et al. Design and characterization of single mode circular photonic crystal fiber for broadband dispersion compensation [J]. *Optik*, 2014, 125(11): 2608-2611.
- [6] Hasan M I, Selim Habib M, Samiul Habib M, et al. Highly nonlinear and highly birefringent dispersion compensating photonic crystal fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(1): 32-38.
- [7] Samiul Habib M, Selim Habib M, Hasan M I, et al. A single mode ultra high negative residual dispersion compensating photonic crystal fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(4): 328-332.
- [8] Rakhi Bhattacharya, Konar S. Extremely large birefringence and shifting of zero dispersion wavelength of photonic crystal fibers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44 (7): 2210-2216.
- [9] Xu Q, Miao R C, Zhang Y N. High birefringence low-dispersion of nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Optik*, 2013, 124(15): 2269-2272.
- [10] Wang Z, Ren G B, Lou S Q, et al. Ultra lattice method for the study of photonic crystal fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(1): 59-63. (in Chinese)