

# 压缩六角点阵椭圆孔光子晶体光纤的 低色散高双折射效应\*

张亚妮<sup>†</sup>

(宝鸡文理学院物理与信息技术系, 宝鸡 721007)

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2009 年 7 月 22 日收到; 2009 年 8 月 15 日收到修改稿)

设计了一种新型结构低色散高双折射光子晶体光纤, 该光纤纤芯缺失一根空气柱, 包层沿光纤长度方向排布压缩六角点阵椭圆空气孔. 采用全矢量平面波法, 对其色散和双折射特性进行了数值模拟. 研究发现, 通过改变光纤结构参数, 即改变六角点阵压缩比  $\xi$ 、相对孔间隔  $f$  和空气孔椭圆率  $\eta$ , 可以调节该光纤低色散高双折射工作波长. 若调整光纤结构参数  $\xi = 0.48$ ,  $f = 0.35$ ,  $\eta = 0.55$ ,  $x$  方向孔间隔  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$  时, 该光纤呈现低色散高双折射效应, 在 1360—1670 nm 波段总色散不大于  $\pm 5 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$ , 且在波长 1550 nm 处双折射高达  $1.5 \times 10^{-2}$ .

**关键词:** 导波与光纤光学, 全矢量平面波法, 低色散高双折射, 六角点阵压缩比

**PACC:** 4281, 4281D, 4281F

## 1. 引 言

近年来, 光子晶体光纤 (PCF) 由于其具有无限单模、超平坦色散、高双折射和独特的非线性效应等特点而备受青睐. 对于 PCF 的研究, 有人关注其超低超平坦色散性能<sup>[1-3]</sup>; 有人则专注于其高双折射<sup>[4]</sup>或单偏振单模特性<sup>[5]</sup>. 然而, 很少有同时关于 PCF 高双折射和色散特性的研究报道. 我们知道, PCF 色散特性的设计可以通过调整光纤结构参数实现; 同时, PCF 高双折射特性的设计可以通过改变两个正交方向空气孔间隔实现<sup>[6]</sup>, 也可在纤芯缺失几个空气孔形成椭圆芯<sup>[7,8]</sup>或用椭圆孔代替包层圆孔而破坏六角对称性实现<sup>[9,10]</sup>. 显然, 不管是色散特性还是双折射特性均强烈地依赖于光纤结构参数, 如孔大小和孔间隔等. 本文设计了一种新型结构 PCF, 光纤包层采用压缩六角点阵椭圆孔排布方式, 中心缺失一根空气柱形成纤芯, 采用全矢量平面波方法 (FV-PWM), 对其双折射和色散特性进行研究. 结果发现, 该光纤同时呈现低色散高双折射特性, 通过调整光纤结构参数 (如六角点阵压缩比  $\xi$ 、相对孔

间隔  $f$  和空气孔椭圆率  $\eta$ ), 可以调整该光纤的低色散高双折射工作波长. 若调整光纤结构参数  $\xi = 0.48$ ,  $f = 0.35$ ,  $\eta = 0.55$ ,  $x$  方向孔间隔  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$  时, 该光纤在 1360—1670 nm 波段总色散不大于  $\pm 5 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$ , 且在波长为 1550 nm 处双折射高达  $1.5 \times 10^{-2}$ .

## 2. 设计原理与理论模型

新设计的低色散高双折射 PCF 端面结构如图 1 所示, 光纤包层沿长度方向按照压缩六角点阵排布

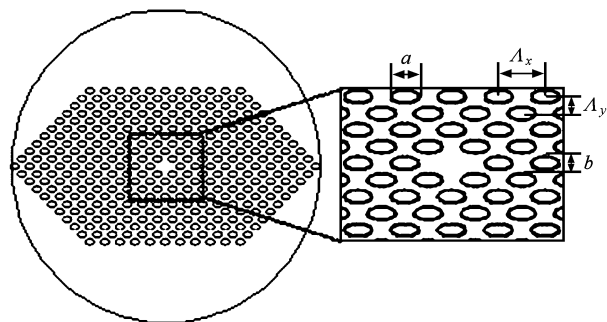


图 1 低色散高双折射 PCF 端面结构示意图及芯部放大图

\* 中国博士后科学基金 (批准号: 20080431258)、瞬态光学与光子技术国家重点实验室研究基金 (批准号: SKLST200913) 和宝鸡文理学院科研计划重点项目 (批准号: ZK0841).

<sup>†</sup> E-mail: zhangyn@opt.ac.cn

着均匀椭圆孔, 纤芯缺失一根椭圆空气柱形成导光区. 采用  $x, y$  轴方向的孔间隔  $\Lambda_x, \Lambda_y$  和  $x, y$  轴方向孔直径  $a, b$  表征光纤结构, 这样超格子计算的基本点阵矢量表示为

$$\begin{aligned} a_1 &= \Lambda_x \hat{x}, \\ a_2 &= \frac{\Lambda_x}{2} \hat{x} + \Lambda_y \hat{y}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $\hat{x}$  和  $\hat{y}$  为单位矢量. 同时, 引入六角点阵压缩比  $\xi$ 、相对孔间隔  $f$  和空气孔椭圆率  $\eta$  表征 PCF 的不对称程度, 并分别被定义为  $\xi = \Lambda_y / \Lambda_x$ ,  $f = b / \Lambda_x$  和  $\eta = b / a$ . 为了避免相邻空气孔沿  $x$  方向或  $y$  方向叠加, 这三个参量之间应该满足

$$f < \min(\sqrt{\eta^2 + 4\xi^2}/2, \eta). \quad (2)$$

考虑到这种结构 PCF 在工艺上的制造难度, 规定孔的椭圆度和 PCF 的六角点阵压缩均沿  $y$  方向, 即六角点阵压缩比  $\xi$  和空气孔椭圆率  $\eta$  应满足  $\xi = \eta / \sqrt{3}/2$ , 这样容易满足(2)式要求的  $f < \eta$ .

模双折射  $B(\lambda)$  是描述光纤偏振特性的重要参量, 可表示为

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

式中  $n_{\text{eff}}^y$  和  $n_{\text{eff}}^x$  分别表示两正交偏振基模有效折射率. 同时, PCF 的波导色散  $D_w(\lambda)$  亦与基模有效折射率  $n_{\text{eff}}$  有关, 可表示为

$$D_w(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 |\operatorname{Re}(n_{\text{eff}})|}{\partial \lambda^2}, \quad (4)$$

式中  $c$  为真空中的光速,  $\lambda$  为光波长. 一般情况下, 基模有效折射率与传播常数  $\beta^{x,y}(\lambda)$  相关, 即  $n_{\text{eff}}^{x,y}(\lambda) = \beta^{x,y}(\lambda) / k_0$ ,  $k_0 = 2\pi / \lambda$  表示自由空间波数. 一旦与基模有效折射率  $n_{\text{eff}}^{x,y}$  相关的传播常数被确定, 模双折射  $B(\lambda)$  和波导色散  $D_w(\lambda)$  就可以确定. 采用 FV-PWM<sup>[11]</sup>, 通过在一个合适的波长求解本征值方程, 可以得到与 PCF 基模相应的传输常数  $\beta^{x,y}(\lambda)$ , 进而根据(3)和(4)式获得模双折射和波导色散. 为了高精度重构 PCF 微结构, 每个偏振态使用  $2^{16}$  个平面波, 使得每个基元的超元胞数达到  $9 \times 9$ .

一般而言, PCF 的总色散  $D(\lambda)$  等于波导色散  $D_w(\lambda)$  和材料色散  $D_m(\lambda)$  之和, 即

$$D(\lambda) = D_w(\lambda) + D_m(\lambda), \quad (5)$$

其中  $D_w(\lambda)$  取决于光纤的波导结构. 对于 PCF, 通过人为改变光纤包层的结构参数很容易调整波导色散  $D_w(\lambda)$ .  $D_w(\lambda)$  与光纤结构参数之间的关系可表示为

$$D_w(\lambda; M\Lambda, f) = \frac{1}{M} D_w\left(\frac{\lambda}{M}; \Lambda, f\right), \quad (6)$$

式中  $\Lambda$  为 PCF 包层孔间隔. (6)式表明, 对于相同的  $f$ , PCF 包层孔间隔放大  $M$  倍, 波长  $\lambda/M$  处的波导色散为原来的  $1/M$ .

### 3. 结果及讨论

为了使所设计的光纤在一个较宽的波长范围内实现色散和双折射调控效应, 采用 FV-PWM 数值研究了该 PCF 色散和双折射与光纤结构参数之间的关系.

首先, 选取相对孔间隔  $f = 0.35$ , 孔椭圆率  $\eta = 0.55$  和六角点阵压缩比  $\xi = 0.48$  不变,  $x$  方向孔间隔  $\Lambda_x$  从  $1.0 \mu\text{m}$  变化到  $1.8 \mu\text{m}$ , 变化步长取  $0.2 \mu\text{m}$ , 图 2(a) 给出了波导色散与孔间隔  $\Lambda_x$  之间的依赖关系. 从图 2(a) 可以看出, 随着  $\Lambda_x$  的增加, 最小

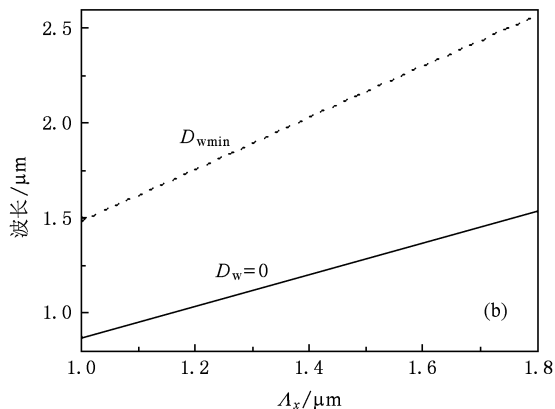
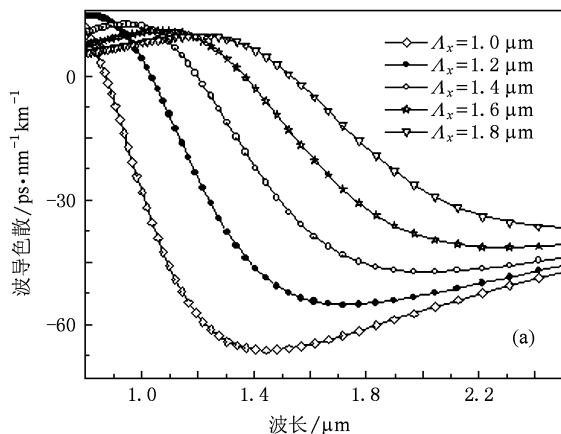


图2 当  $\Lambda_x$  取不同值时波导色散随波长的变化以及零色散和最小色散波长随  $\Lambda_x$  的变化  $f = 0.35, \eta = 0.55, \xi = 0.48$ . (a) 孔间隔  $\Lambda_x$  取不同值时波导色散随波长的变化, (b) 零色散和最小色散波长随孔间隔  $\Lambda_x$  的变化

色散和零色散向长波长方向移动,其零色散 ( $D_w = 0$ ) 波长和最小色散 ( $D_{wmin}$ ) 波长随孔间隔  $\Lambda_x$  的变化呈直线关系,如图 2(b) 所示. 这验证了(6)式表明的波导色散与光纤结构参数之间的线性关系.

其次,选取光纤结构参数  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $\eta = 0.55$  和  $\xi = 0.48$  不变,改变相对孔间隔  $f$ ,波导色散随波长的变化如图 3(a) 所示. 显然,随着  $f$  的增大,最小色散和零色散波长发生红移,其零色散 ( $D_w = 0$ ) 波长和最小色散 ( $D_{wmin}$ ) 波长随  $f$  的变化亦呈线性关系,如图 3(b) 所示. 这再一次验证(6)式表明的波导色散与光纤结构参数之间的线性关系.

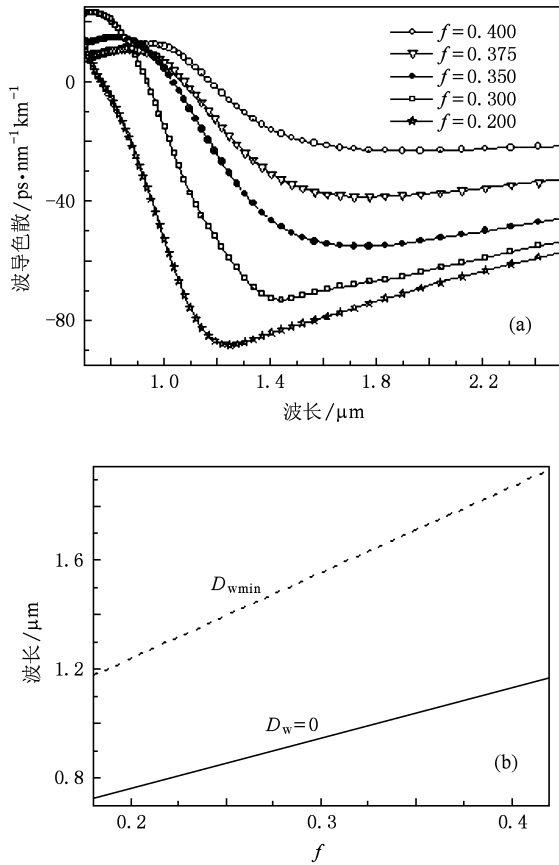


图 3 当  $f$  取不同值时波导色散随波长的变化以及零色散和最小色散波长随  $f$  的变化  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $\eta = 0.55$ ,  $\xi = 0.48$ . (a) 相对孔间隔  $f$  取不同值时波导色散随波长的变化, (b) 零色散和最小色散波长随相对孔间隔  $f$  的变化

再次,选取  $f = 0.35$ ,  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$  时,改变六角点阵压缩比  $\xi$  和孔椭圆率  $\eta$ ,其波导色散随波长的变化关系如图 4 所示. 由图 4 可见,随着  $\xi$  和  $\eta$  描述的 PCF 不对称性的增加,零色散波长和最小色散波长向短波长方向移动. 由图 2、图 3 和图 4 可知,所设计光纤的波导色散在光波导通信波段为负值,

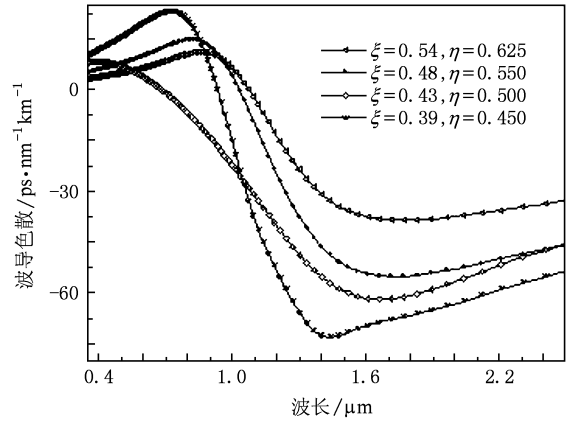


图 4 当六角点阵压缩比  $\xi$  和孔椭圆率  $\eta$  取不同值时波导色散随波长的变化  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $f = 0.35$

因此通过调整光纤结构参数可以实现色散补偿,使得零色散波长发生红移. 首先,选取设计零色散的给定波长(如 1550 nm),根据 Sellmeier 公式计算材料色散  $D_m(\lambda)$  [12]; 其次,依据(2)式计算 PCF 的波导色散  $D_w(\lambda)$ ,大量模拟表明,若选取光纤结构参数  $f = 0.35$ ,  $\eta = 0.55$ ,  $\xi = 0.48$  和  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$  时,波导色散最佳;然后,分别描绘出  $D_m(\lambda)$  和  $D_w(\lambda)$  随波长变化的关系曲线,如图 5 实线和虚线所示;最后,根据(5)式计算总色散. 由图 5 可知,该光纤在波长 1550 nm 处可获得零色散,其总色散在 1360—1670 nm 波段不超过  $\pm 5 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,为其在通信波段实现接近零的超平坦色散提供了可能.

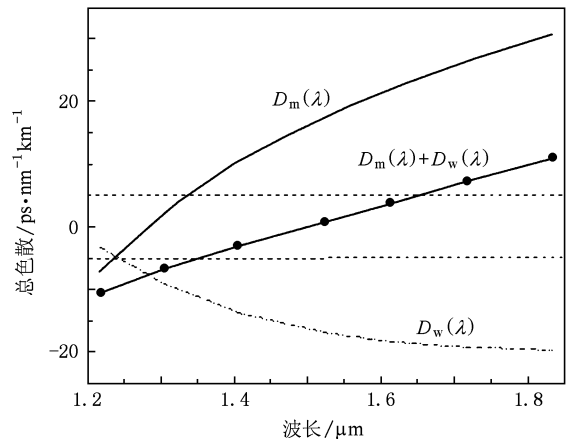


图 5 PCF 总色散随波长的变化  $\xi = 0.48$ ,  $\eta = 0.55$ ,  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $f = 0.35$

一般六角对称 PCF 基模的两个偏振态是简并的,因而对外不呈现双折射. 然而,该光纤由于包层的不对称性将产生强烈的双折射. 为此,图 6 给出

了基模、二阶模和基空间填充模有效折射率随波长的变化关系. 由图6可知, 当波长大于800 nm时, 该光纤二阶模被截止, 因此这里仅讨论基模双折射.

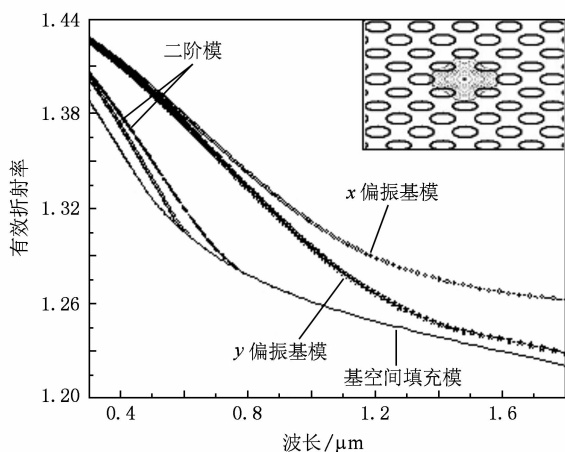


图6 基模、二阶模和基空间填充模折射率随波长的变化  $\xi = 0.48$ ,  $\eta = 0.55$ ,  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $f = 0.35$ . 内插图为偏振基模在波长1550 nm处的模场强度轮廓分布

图7给出了选取光纤结构参数  $f = 0.35$ ,  $\eta = 0.55$ ,  $\xi = 0.48$ ,  $\Lambda_x$  从1.0变化到1.8  $\mu\text{m}$ , 变化步长取0.2  $\mu\text{m}$ 时PCF的双折射. 显然, 对于相同的  $\Lambda_x$ , 随着波长的增加双折射明显增加; 而在同样波长处, 随着  $\Lambda_x$  的增加双折射明显减小. 图8给出了选取  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$  不变时, 改变PCF六角点阵压缩比  $\xi$  时双折射随波长的变化关系. 从图8可以看出, 随着  $\xi$  的减小双折射明显增加. 大量数值模拟表明, 当选取  $f = 0.35$ ,  $\eta = 0.55$ ,  $\xi = 0.48$ ,  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$  时, 该光纤可实现零色散最佳双折射, 在波长1550

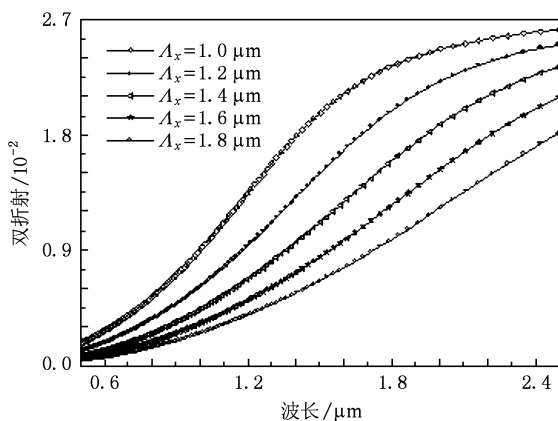


图7 当  $\Lambda_x$  取不同值时双折射随波长的变化  $f = 0.35$ ,  $\eta = 0.55$ ,  $\xi = 0.48$

nm处其双折射高达  $1.5 \times 10^{-2}$ , 这是目前文献报道的最高双折射. 进一步的研究表明, 该光纤  $x$  和  $y$  偏振基模模场是相似的, 图6内插图给出了  $x$  或  $y$  偏振基模在波长1550 nm处的模场强度分布, 显然, 两正交基模被很好约束在光纤芯区.

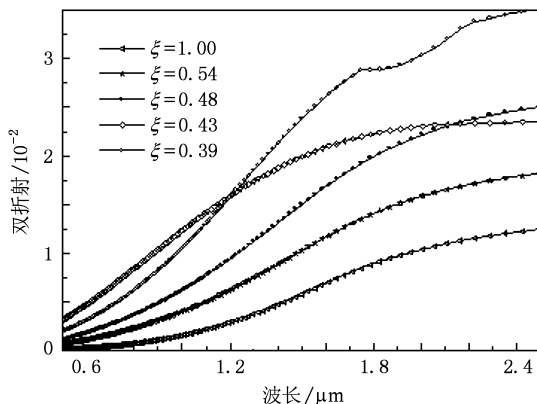


图8 当  $\xi$  取不同值时双折射随波长的变化  $f = 0.35$ ,  $\eta = 0.55$ ,  $\Lambda_x = 1.2 \mu\text{m}$

理论与实验研究表明, 低色散高非线性PCF容易产生四波混频效应<sup>[13,14]</sup>, 进而有效减缓光纤通信链路掺铒光纤放大器中的增益竞争以增强信号频率的均匀性和稳定性<sup>[15,16]</sup>. 四波混频的产生效率, 主要取决于以下两个因素: 一是非线性系数, 非线性系数越大效率越高; 二是色散, 色散越低效率越高. 普通单模光纤通信波段的色散  $D \approx 17 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$ , 该设计光纤的色散值在  $\pm 5 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$  附近; 另外, PCF的非线性系数可表示为<sup>[17]</sup>

$$\gamma(\lambda) = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (7)$$

显然, 非线性系数与其有效模面积成反比. 所设计的光纤由于光纤中心抽取一根空气柱形成纤芯, 因而具有较小的有效模面积和较高的非线性系数. 因此, 该光纤呈现的高非线性低色散高双折射效应, 为其在四波混频中的应用奠定了基础.

## 4. 结 论

采用FV-PWM, 优化设计了一种新型结构PCF, 该光纤具有压缩六角点阵椭圆空气孔. 研究结果表明, 设计光纤同时具有低色散高双折射特性, 通过调整光纤结构参数, 如六角点阵压缩比  $\xi$ , 相对孔间

隔  $f$  和空气孔椭圆率  $\eta$ , 可以调整其低色散高双折射工作波长. 当选取光纤结构参数  $f = 0.35$ ,  $\eta = 0.55$ ,  $\xi = 0.48$  和  $A_x = 1.2 \mu\text{m}$  时, 该光纤呈现低色散高双折射效应, 大约在 1360—1670 nm 波段色散不超

过  $\pm 5 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$ , 且双折射在波长 1550 nm 处可以达到  $1.5 \times 10^{-2}$ . 同时, 设计的光纤所呈现的高非线性低色散高双折射效应, 为其在四波混频中的应用奠定了基础.

- [1] Saitoh K, Koshiba M 2003 *Opt. Express* **11** 843
- [2] Poli F, Cucinotta A, Selleri S, Bouk A H 2004 *IEEE Photon Technol. Lett.* **16** 1065
- [3] Zhao X T, Hou L T, Liu Z L, Wang W, Wei H Y, 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]
- [4] Wang J, Lei N G, Yu C X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 946 (in Chinese) [王健、雷乃光、余重秀 2007 物理学报 **56** 946]
- [5] Zhang F D, Liu X Y, Zhang M, Ye P D 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6447 (in Chinese) [张方迪、刘小毅、张民、叶培大 2006 物理学报 **55** 6447]
- [6] Suzuki K, Kubota H, Kawanishi S, Tanaka M, Fujita M 2001 *Opt. Express* **9** 676
- [7] Zhang C S, Kai G Y, Wang Z, Wang C, Sun T T, Zhang W G, Liu Y G, Liu J F, Yuan S Z, Dong X Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2758 (in Chinese) [张春书、开桂云、王志、王超、孙婷婷、张伟刚、刘艳格、刘剑飞、袁树忠、董孝义 2005 物理学报 **54** 2758]
- [8] Zhang Y N, Miao R C, Ren L Y, Wang H Y, Wang L, Zhao W 2007 *Chin. Phys.* **16** 1719
- [9] Ren L Y, Wang H Y, Zhang Y N, Yao B L, Zhao W 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1298
- [10] Yan F P, Li Y F, Wang L, Gong T R, Liu P, Liu Y, Tao P L, Qu M X, Jian S S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5735 (in Chinese) [延凤平、李一凡、王琳、龚桃荣、刘鹏、刘洋、陶沛琳、曲美霞、简水生 2008 物理学报 **57** 5735]
- [11] Zhang Y N 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5729 (in Chinese) [张亚妮 2008 物理学报 **57** 5729]
- [12] Fleming J W 1978 *IEEE Electron. Lett.* **14** 326
- [13] Liu X, Lu C 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 2541
- [14] Liu W H, Song X Z, Wang Y S, Liu H J, Zhao W, Liu X M, Peng Q J, Xu Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 917 (in Chinese) [刘卫华、宋啸中、王屹山、刘红军、赵卫、刘雪明、彭钦军、许祖彦 2008 物理学报 **57** 917]
- [15] Liu X, Zhou X, Tang X, Ng J, Hao J, Chai T, Leong E 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 1626
- [16] Liu X, Yang X, Lu F, Ng J, Zhou X 2005 *Opt. Express* **13** 142
- [17] Mortensen N A 2002 *Opt. Express* **10** 341

# Low-dispersion high-birefringence effect of squeezed hexagonal lattice elliptical hole photonic crystal fiber\*

Zhang Ya-Ni<sup>†</sup>

(*Department of Physics and Information Technology, Baoji College of Arts and Science, Baoji 721007, China*)

(*State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(Received 22 July 2009; revised manuscript received 15 August 2009)

## Abstract

A new type of photonic crystal fiber for realizing the effect of low dispersion high birefringence is proposed. The fiber is composed of a solid silica core and a cladding with squeezed-hexagonal-lattice elliptical air-hole along the fiber length. Dispersion and birefringence are investigated simultaneously by using the full vectorial plane wave method. Simulations indicate that the wavelength for realizing low-dispersion high-birefringence can be controlled by artificially choosing the structure parameters of photonic crystal fiber, such as the hexagonal lattice squeezing ratio, the relative air hole spacing and the air hole ellipticity. The optimal and feasible parameters of the fiber with low-dispersion high-birefringence are given, with the result of the total dispersion being within  $\pm 5 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \text{ km}^{-1}$  over an ultra broad wavelength range from 1360 to 1670 nm and the corresponding high birefringence being about  $1.5 \times 10^{-2}$  at 1550 nm.

**Keywords:** fiber waveguides, full vectorial plane wave method, low-dispersion high-birefringence, hexagonal lattice squeezing ratio

**PACC:** 4281, 4281D, 4281F

---

\* Project supported by the Science Foundation for Postdoctor of China (Grant No. 20080431258), the Research Foundation of State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, China (Grant No. SKLST200913) and the Key Program of Scientific Research of Baoji College of Arts and Science, China (Grant No. ZK0841).

<sup>†</sup> E-mail: zhangyn@bopt.ac.cn