



DOI: 10.12086/oe.2018.170633

## 正方形空气孔光子晶体光纤特性分析

张学典, 袁曼曼, 常敏\*, 逯兴莲, 陈楠, 聂富坤, 何猛辉, 亓宁宁, 庄松林

上海市现代光学系统重点实验室, 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

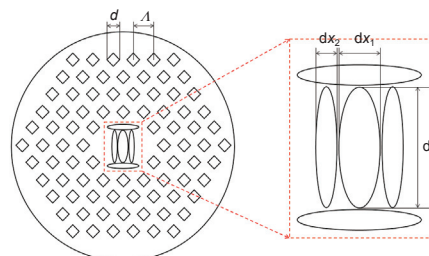
**摘要:** 为了同时获得高双折射和色散平坦特性的光子晶体光纤, 本文提出了一种包层以椭圆空气孔为纤芯, 四周环绕正方形空气孔的光子晶体光纤结构。基于不同纤芯椭圆率、不同纤芯填充材料, 对所提光子晶体光纤结构的双折射、色散、非线性等性能进行了讨论。结果表明, 在波长  $1.55 \mu\text{m}$  处, 当纤芯椭圆率不同, 填充材料相同时, 最大双折射值为 0.37, 最大非线性系数值  $277.76 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ; 当纤芯填充材料不同, 椭圆率相同时, 最大双折射值为 0.34, 最大非线性系数值为  $307 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。在波段  $1.26 \mu\text{m} \sim 1.8 \mu\text{m}$  范围, 色散呈现出近零色散平坦特性, 变化范围不超过  $\pm 12.5 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ , 带宽  $0.6 \mu\text{m}$ 。

**关键词:** 光子晶体光纤; 正方形空气孔; 高双折射; 高非线性

**中图分类号:** O734

**文献标志码:** A

**引用格式:** 张学典, 袁曼曼, 常敏, 等. 正方形空气孔光子晶体光纤特性分析[J]. 光电工程, 2018, 45(5): 170633



## Characteristics in square air hole structure photonic crystal fiber

Zhang Xuedian, Yuan Manman, Chang Min\*, Lu Xinglian, Chen Nan,

Nie Fukun, He Menghui, Qi Ningning, Zhuang Songlin

Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

**Abstract:** In order to obtain photonic crystal fiber with high birefringence and flattened dispersion, we propose a new photonic crystal fiber structure with an elliptical air hole as the core surrounded by square air holes. In this paper, the effects of different fiber core ellipticity and different filled material on birefringence, dispersion and nonlinearity of photonic crystal fiber are discussed. The results show that at the wavelength of  $1.55 \mu\text{m}$ , when the core ellipticity of the filled material is the same, the maximum birefringence value is 0.37 and the maximum value of nonlinear system is  $277.76 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ . When the fiber is filled with different materials, the maximum birefringence value is 0.34 and maximum nonlinear value is  $307 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ . In addition, in the wavelength range of  $1.26 \mu\text{m} \sim 1.8 \mu\text{m}$ , the nearly zero-dispersion flattened characteristics are achieved. The range of variations is no more than  $\pm 12.5 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ , and

收稿日期: 2017-11-17; 收到修改稿日期: 2018-03-02

基金项目: 国家重大仪器专项资助课题(2014YQ09070903)

作者简介: 张学典(1974-), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤传感和光学成像技术的研究。E-mail: xdzhang@usst.edu.cn

通信作者: 常敏(1978-), 女, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感技术、光学精密仪器的研究。E-mail: changmin@usst.edu.cn

the bandwidth is 0.6  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** photonic crystal fiber; square air hole; high birefringence; high nonlinearity

**Citation:** Zhang X D, Yuan M M, Chang M, *et al.* Characteristics in square air hole structure photonic crystal fiber[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(5): 170633

## 1 引言

光子晶体光纤(Photonic crystal fiber, PCF)<sup>[1]</sup>的概念是由 Russell 等人提出的<sup>[2]</sup>,其微结构由硅-空气孔组成。与传统光纤相比,光子晶体光纤最大的特点是结构设计灵活<sup>[3-7]</sup>,包层空气孔的排列方式和空气孔形状可以灵活多变,所以 PCF 有很多优于传统光纤的特性,比如:高双折射、灵活可调的色散特性、良好的非线性等<sup>[8-9]</sup>,因此广泛应用于激光器<sup>[10]</sup>、传感器<sup>[4, 11-12]</sup>以及非线性光学<sup>[13-14]</sup>领域。众所周知,传统光纤很难同时具备高双折射、高非线性和近零色散平坦等特性<sup>[6-7, 14-15]</sup>。由于 PCF 的横截面可以灵活设计,在过去 20 年,光纤领域的研究广泛探讨了如何利用 PCF 克服传统光纤的弊端<sup>[6-7]</sup>,例如采用 PCF 实现超宽单模运算<sup>[14]</sup>、独特的色散性能、高非线性和高双折射<sup>[4]</sup>。改变 PCF 横截面非对称性可以提高双折射特性,通过增大纤芯附近孔的直径、减小横截面空气孔之间的间距、在包层引入椭圆空气孔、增大椭圆率<sup>[7-8, 16]</sup>等都可以提高 PCF 的高双折射特性。已有报道表明,PCF 高双折射能达到  $10^{-2}$  数量级<sup>[4, 7]</sup>,2016 年南开大学吴宵宵<sup>[17]</sup>引入石墨烯包层且纤芯是椭圆结构的 PCF,测得在波长 1.55  $\mu\text{m}$  处,光纤的高双折射可以达到 0.13。对色散的控制,在光纤通信领域也是一个研究热点,PCF 的色散在光纤通信领域有着巨大应用潜力<sup>[15, 18-19]</sup>。近年来近零色散平坦 PCF 结构设计不断涌现,Reeves<sup>[18]</sup>等提出一种新颖的 PCF 结构,在 1  $\mu\text{m}$  ~ 1.6  $\mu\text{m}$  的波段内,零平均色散为  $\pm 1$  ps/(nm·km);Bhawana Dabas<sup>[20]</sup>等提出掺杂硫族化合物  $\text{As}_2\text{Se}_3$  的光子晶体光纤,在波长范围为 1.2  $\mu\text{m}$  ~ 2.5  $\mu\text{m}$  的范围内,可实现零色散平坦特性。

PCF 大多以二氧化硅为背景材料,随着制作工艺的不断发展,越来越多的非硅材质光纤被拉制出来。陈瑰<sup>[21]</sup>等采用化学气相沉积法和气相液相混合掺杂技术制备出掺铋的光纤预制棒;Kumar<sup>[22]</sup>等拉制出了碲化物光子晶体光纤,并测得在波长 1.055  $\mu\text{m}$  处最小的损耗为 2.3 dB/m;刘永兴<sup>[23]</sup>等探究了  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$  硫系玻璃光子晶体光纤的中红外色散特性;陈月娥和侯蓝田<sup>[24]</sup>制备出了掺杂  $\text{Yb}^{3+}$  的双包层光子晶体光纤。

本文提出了一种包层以椭圆空气孔为中心,四周环绕正方形空气孔的 PCF 结构,基于此结构,对不同纤芯椭圆率、不同纤芯填充材料条件下的双折射、色散和非线性等性能展开了研究。

## 2 结构和特性

### 2.1 纤芯为椭圆、包层为正方形空气孔的 PCF 结构设计

为了同时获得高双折射和色散平坦特性的 PCF,本文设计了以二氧化硅为基底、纤芯为椭圆、正方形空气孔组成的六边形包层结构的 PCF。这种结构可以改变 PCF 的对称性,使光纤内部应力分布不均匀,进而使得光纤折射率分布也不均匀,因此可以提高双折射性能。使用正方形空气孔,结构不易变形<sup>[25]</sup>,因而有更稳定的特性,通过文献<sup>[22]</sup>和文献<sup>[26-27]</sup>可知,采用钻孔、溶胶、凝胶和浇铸、锥形和光刻等方法可以制造出正方形空气孔的 PCF。而正方形空气孔的六边形结构是获得高双折射和色散平坦特性的最佳排布方式。本文设计的纤芯采用椭圆空气孔,并且椭圆纤芯上下左右分布有四个完全相同的椭圆。

如图 1 所示,包层正方形空气孔的对角线直径为  $d$ ,两个相邻正方形空气孔的中心间距为  $\Lambda$ ,中心椭圆纤芯的长轴长度为  $d_y$ 、短轴长度为  $d_{x_1}$ ,中心椭圆上下左右分布有四个完全相同的椭圆,这四个椭圆的长轴长度为  $d_y$ ,短轴长度为  $d_{x_2}$ 。中心椭圆纤芯的椭圆率为  $\eta=d_y/d_{x_1}$ ,本文计算过程中椭圆率  $\eta$  分别取 1.4、1.8、2.2、2.6、3,正方形空气孔对角线直径  $d=0.76 \mu\text{m}$ ,两个相邻正方形空气孔中心间距为  $\Lambda=1.2 \mu\text{m}$ , $d_y$  的初始值为 1.2  $\mu\text{m}$ , $d_{x_1}=0.4 \mu\text{m}$ , $d_{x_2}=0.2 \mu\text{m}$ 。测量的波长范围为 0.6  $\mu\text{m}$  ~ 2.0  $\mu\text{m}$ 。图 2 是图 1 所设计的光纤的模场分布图,本文通过寻找单模模式对应的有效折射率,获得波长与有效折射率的关系,利用参数计算公式取得特性表征参数。

为了减小理论研究的误差,采用形成能力和热稳定性<sup>[28-29]</sup>良好的氧化物玻璃作为椭圆纤芯的填充物,本文选择了四种折射率不同的氧化物玻璃,分别为 TT( $20\text{Ti}_2\text{O}_3 \cdot 80\text{TeO}_2$ )、TS( $20\text{Ti}_2\text{O}_3 \cdot 80\text{Sb}_2\text{O}_3$ )、PG( $80\text{PbO} \cdot 20$

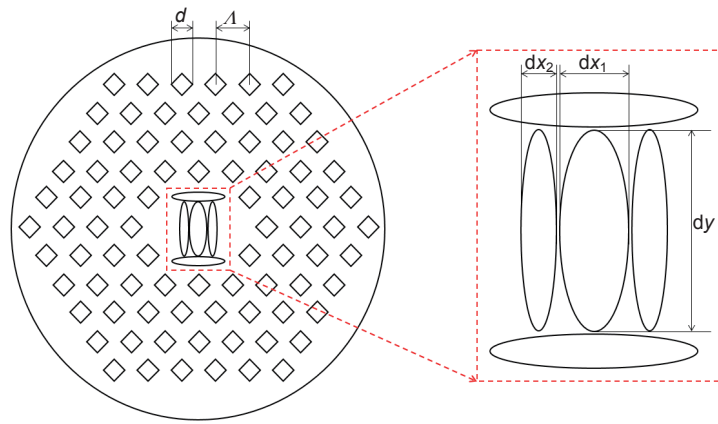


图 1 椭圆纤芯、正方形空气孔包层的 PCF 结构  
Fig. 1 Elliptical core, square air hole cladding PCF structure

Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)和硫化物硫化砷(As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sup>[30]</sup>。二氧化硅基底和纤芯填充物折射率计算公式为<sup>[30]</sup>

$$n(\lambda) = \frac{A}{\lambda^4} + \frac{B}{\lambda^2} + C + D\lambda^2 + E\lambda^4 \quad (1)$$

式中：A、B、C、D、E 为材料的折射率系数，取值如表 1 所示<sup>[30]</sup>。

## 2.2 特性分析

### 2.2.1 双折射

光穿过各向异性的 PCF 时，分裂成  $x$  偏振(LP<sub>01x</sub>)和  $y$  偏振(LP<sub>01y</sub>)波，由于 PCF 内部折射率不同，光沿  $x$  轴和  $y$  轴的传播速度也不同，就会在  $x$ 、 $y$  方向产生相位差<sup>[4,7]</sup>。双折射是这两个线性偏振波的有效模式指标之间的差异。双折射表达式为<sup>[7]</sup>

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

式中： $n_{\text{eff}}^x$  和  $n_{\text{eff}}^y$  分别是  $x$  轴和  $y$  轴偏振基模有效折射率。

### 2.2.2 色散

色散包括材料色散  $D_m$ 和波导色散  $D_w$ ，其中材料色散表达式  $D_m$ 为<sup>[15]</sup>

$$D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_m}{d\lambda^2} \quad (3)$$

式中： $\lambda$  是波长， $c$  是真空中光速， $n_m$  是材料折射率，可由 Sellmeier<sup>[15]</sup>公式得到。

波导色散  $D_w$ 表达式为

$$D_w = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}[n_{\text{eff}}]}{d\lambda^2} \quad (4)$$

式中： $\text{Re}[n_{\text{eff}}]$ 是有效折射率的实部。

### 2.2.3 非线性系数

PCF 的非线性最重要的应用就是超连续谱的产生(supercontinuum generation, SC)<sup>[31-32]</sup>。SC 是一种复杂的物理现象，它使光脉冲在非线性介质中传播的光谱范围扩大<sup>[31]</sup>。非线性系数表达式为<sup>[4]</sup>

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (5)$$

式中： $n_2$ 为光纤包层的折射率， $A_{\text{eff}}$ 为光纤的有效纤芯面积， $A_{\text{eff}}$ 表达式为<sup>[4]</sup>

$$A_{\text{eff}} = \frac{1}{\iint_s |E_t|^4 dx dy} \cdot \left( \iint_s |E_t|^2 dx dy \right)^2 \quad (6)$$

## 3 结果与讨论

本文采用全矢量有限元法与 COMSOL 软件的多物理场详细分析所设计的 PCF 性能。

表 1 材料名称以及各系数值

Table 1 Materials and corresponding coefficients

材料名称	A	B	C	D	E
SiO <sub>2</sub>	3.9×10 <sup>-5</sup>	2.92×10 <sup>-3</sup>	1.45	-3.26×10 <sup>-3</sup>	-3.13×10 <sup>-5</sup>
As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	2.76×10 <sup>-4</sup>	7.07×10 <sup>-3</sup>	1.66	-2.15×10 <sup>-3</sup>	-1.99×10 <sup>-6</sup>
TT(20Ti <sub>2</sub> O.80TeO <sub>2</sub> )	3.11×10 <sup>-3</sup>	2.39×10 <sup>-2</sup>	2.10	-2.28×10 <sup>-3</sup>	7.48×10 <sup>-6</sup>
TS(20Ti <sub>2</sub> O.80Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2.40×10 <sup>-3</sup>	3.04×10 <sup>-2</sup>	2.07	-1.82×10 <sup>-3</sup>	9.88×10 <sup>-7</sup>
PG(80PbO.20Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.85×10 <sup>-3</sup>	3.18×10 <sup>-2</sup>	2.16	-2.02×10 <sup>-3</sup>	1.05×10 <sup>-5</sup>

### 3.1 椭圆率对高双折射、色散和非线性系数影响

#### 3.1.1 椭圆率对高双折射的影响

正方形空气孔 PCF 椭圆纤芯椭圆率  $\eta$  取不同值所对应的双折射如图 2 所示。从图 2 可以看出，双折射的值随着椭圆率  $\eta$  的增大而增大，在 1.55  $\mu\text{m}$  处，椭圆率  $\eta=1.4$ 、1.8、2.2、2.6、3 时，得到的双折射值分别为 0.21、0.27、0.34、0.36、0.39，所得到的双折射值远远高于传统光纤，这是因为纤芯椭圆空气孔的椭圆率增加，纤芯的场具有更高的不对称性，PCF 内部各向异性更明显，当光在光纤中传播时，X、Y 轴上的传播速度差异更大，会产生更大的相位差，因此双折射特性也就越明显，我们可以通过优化结构参数，得出在指定波段的更高的双折射值。

在波长范围 0.6  $\mu\text{m}$  ~ 2  $\mu\text{m}$  之间，双折射的值随着波长的增大先增大后减小，在 1.55  $\mu\text{m}$  附近取得最大值。这种双折射值的变化趋势是由纤芯对基模场束缚能力与光纤非对称结构对基模场影响共同决定的，在某一特定波长  $\lambda$  处双折射是否达到峰值，是由椭圆纤芯和光纤非对称结构等因素对双折射影响效果是否明显决定的。当波长小于特定波长  $\lambda$  时，椭圆纤芯对基模场束缚能力最大，基模模式面积最小，此时光纤包层非对称结构对双折射的影响很小；当波长大于特定波长  $\lambda$  时，基模场不能被全部束缚在纤芯，有一部分基模会泄露到包层空气孔<sup>[33]</sup>，此时椭圆纤芯的非对称性比包层非对称性影响要弱，双折射也不高。

#### 3.1.2 椭圆率对色散特性的影响

正方形空气孔 PCF 纤芯椭圆率  $\eta$  取不同值所对应的色散如图 3 所示。可以看出，当  $\lambda=1.2 \mu\text{m}$ ， $d=0.76$

$\mu\text{m}$ ， $\eta=1.4$ 、1.8、2.2、2.6、3，椭圆率的大小对色散影响不明显，但随着波长的增大，趋于近零色散平坦，从波长 0.6  $\mu\text{m}$  ~ 1.2  $\mu\text{m}$ ，色散曲线呈指数形式增长；在波长 1.2  $\mu\text{m}$  ~ 1.8  $\mu\text{m}$ ，色散近乎接近零色散平坦，色散的变化范围不超  $\pm 12.5 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。近零色散平坦带宽接近 0.6  $\mu\text{m}$ ，可以用于光学中超短脉冲的传输。

#### 3.1.3 椭圆率对非线性系数的影响

纤芯椭圆率  $\eta$  取不同值所对应的非线性系数如图 4 所示，可以看出，不同纤芯椭圆率对非线性系数影响不同。在波长小于 1.33  $\mu\text{m}$  的范围内，纤芯椭圆率越大，非线性系数越小，且非线性系数变化率较大；而在波长大于 1.33  $\mu\text{m}$  时，椭圆率越大，非线性系数越大，且非线性系数变化率较小。在波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  时，椭圆率为 1.4、1.8、2.2、2.6、3，快轴(y~偏振)对应的非线性系数分别为  $111 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $177.30 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $201.04 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $206.18 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $209.12 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ，慢轴(x~偏振)对应的非线性系数分别为  $11.7 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $14.47 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $21.07 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $26.27 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $46.09 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。

当纤芯填充材料相同，椭圆率  $\eta$  不同时，对  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  处双折射值、色散值和非线性系数影响进行了对比，如表 2 所示。由表 2 可知，当纤芯椭圆率越大，双折射值、色散值和非线性系数均越来越大，并且数值均高于普通光纤数值。

通过以上分析可知，纤芯填充物相同时，双折射值随着椭圆率  $\eta$  的增大而增大，当波长  $\lambda < 1.33 \mu\text{m}$  时，非线性系数随着椭圆率的增大而增大；当波长  $\lambda > 1.33 \mu\text{m}$  时，非线性系数随着椭圆率的增大而减小。

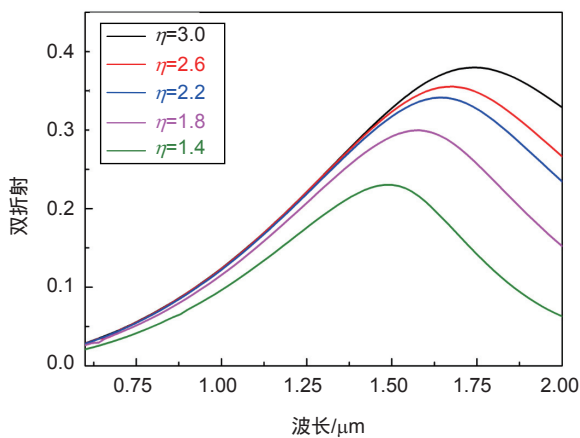


图 2 不同椭圆率  $\eta$  对双折射特性的影响

Fig. 2 Influence of different elliptical rate  $\eta$  on birefringence

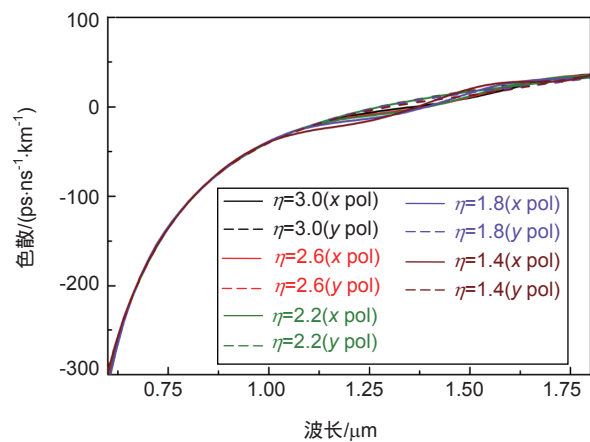


图 3 不同椭圆率  $\eta$  对色散的影响

Fig. 3 Influence of different elliptical rate  $\eta$  on dispersion



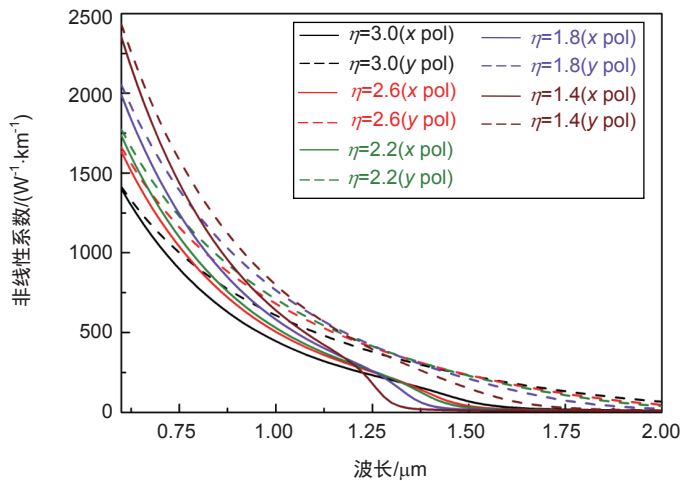


图 4 不同椭圆率  $\eta$  对非线性系数的影响

Fig. 4 Influence of different elliptical rate  $\eta$  on nonlinear coefficient

表 2 不同纤芯椭圆率对双折射值、色散值和非线性系数影响对比( $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ )

Table 2 Comparison of the effects of different core ellipticity on birefringence, dispersion and non-linear coefficients( $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ )

PCF 椭圆 $\eta$	双折射 $n_{\text{Bi}}$	色散 $D/(\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$	非线性系数 $\gamma/(W^{-1}\cdot\text{km}^{-1})$	
			y 轴	x 轴
1.4	0.140	0	111.00	11.70
1.8	0.180	0	177.30	14.47
2.2	0.210	0	201.04	21.07
2.6	0.225	0	206.18	26.27
3	0.240	0	209.12	46.09

### 3.2 填充物对双折射、色散和非线性系数的影响

为了讨论不同纤芯填充材料对 PCF 特性的影响, 本文保持椭圆率  $\eta$  不变, 探究不同折射率的纤芯填充物对双折射、色散和非线性系数的影响。本文分别选取 TT、TS、PG、 $\text{As}_2\text{S}_3$  作为填充物, 由于这几种混合物玻璃相比于其它成分的玻璃有更好的形成能力和热稳定性<sup>[30]</sup>, 因此采用这几种填充材料会大大降低理论研究的误差。在波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  时, 填充材料的有效折射率如表 3 所示。

#### 3.2.1 不同填充物对双折射的影响

不同填充物质对所设计的 PCF 的双折射的影响如图 5 所示。由图 5 可知, 当椭圆率  $\eta=3$  时, 双折射值随着椭圆纤芯填充物折射率的增大而增大, 并且纤芯填充物的折射率越大, 它所对应的双折射曲线变化率就越

大, 在波长  $1.55 \mu\text{m}$  左右取得峰值。在波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  处, 当填充物分别为 TS、TT、PG、 $\text{As}_2\text{S}_3$  时, 双折射值分别为 0.18、0.22、0.25、0.37, 得到的双折射峰值远远高于传统光纤。不同折射率的填充物引起的双折射不同, 这是因为填充物折射率造成 PCF 的非对称性, 折射率越高, PCF 的非对称性越大, 纤芯的场具有更高的不对称性。PCF 内部各向异性更明显, 当光在光纤中传播时, X、Y 轴上的传播速度差异更大, 会产生更大的相位差, 因此双折射特性也就越明显。

在波长  $0.6 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$  之间, 双折射随着波长的增大先增大后减小, 纤芯填充物的折射率越大, 双折射值的变化率也越大。由于双折射特性, 光分裂成具有不同折射率的两个正交偏振分量。此外, 具有高双折射特性的 PCF 在光学传感器、光学滤波器和相干光通

表 3 纤芯填充玻璃材料在  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  处折射率

Table 3 Refractive index of core-filled glass material at  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$

材料名称	$\text{As}_2\text{S}_3$	TT(20Ti <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .80TeO <sub>2</sub> )	TS(20Ti <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .80Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	PG(80PbO.20Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
有效折射率	2.437271706	2.114833102	2.082505791	2.165137141

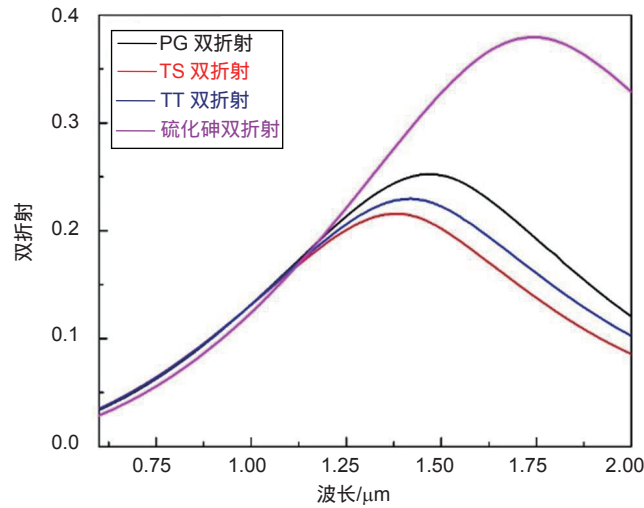


图 5 不同填充物对双折射的影响  
Fig. 5 Influence of different fillers on birefringence

信中具有重要的作用，因此，双折射 PCF 也可用于超连续谱的产生。

### 3.2.2 不同填充物对色散的影响

不同填充物质对 PCF 的色散的影响如图 6 所示。由图 6 可知，当纤芯依次填充 TT、TS、PG、As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>，椭圆率  $\eta=3$  时纤芯填充物折射率对色散影响不明显，但随着波长的增大，趋于近零色散平坦，波长在 0.6  $\mu\text{m}$  ~ 1.2  $\mu\text{m}$  范围内，色散曲线呈指数增长；波长在 1.2  $\mu\text{m}$  ~ 1.8  $\mu\text{m}$  范围内，色散近乎接近零色散平坦。在波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  处，当填充物分别为 TS、TT、PG、As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 时，色散值分别为 20.58、20.80、21、21.70，色散的变化范围不超过  $\pm 12.5 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 。

### 3.2.3 不同填充物对非线性系数的影响

不同填充物对 PCF 的非线性系数影响如图 7 所示。由图 7 可知，在波长 0.6  $\mu\text{m}$  ~ 2  $\mu\text{m}$  范围，波长越大，非线性系数越小。而在同一波长处，填充物折射率越大，非线性系数越大；在波长  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  时，纤芯分别填充 TT、TS、PG、As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 时，快轴 ( $y \sim$  偏振) 对应的非线性系数分别为  $110.82 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $88.5 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $147.88 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $277.76 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ；慢轴 ( $x \sim$  偏振) 对应的非线性系数分别为  $11.7 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $11.4 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $12.7 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 、 $277.76 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。

当纤芯椭圆率  $\eta$  相同、填充材料不同时，对  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  处双折射值、色散值和非线性系数影响进行了对

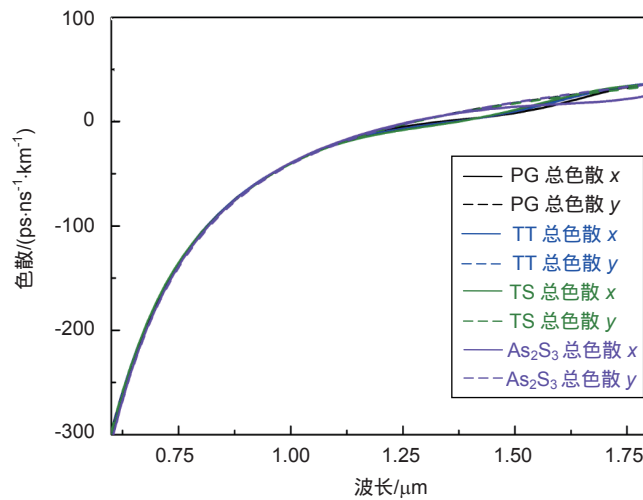


图 6 不同填充物对色散的影响  
Fig. 6 Influence of different fillers on dispersion

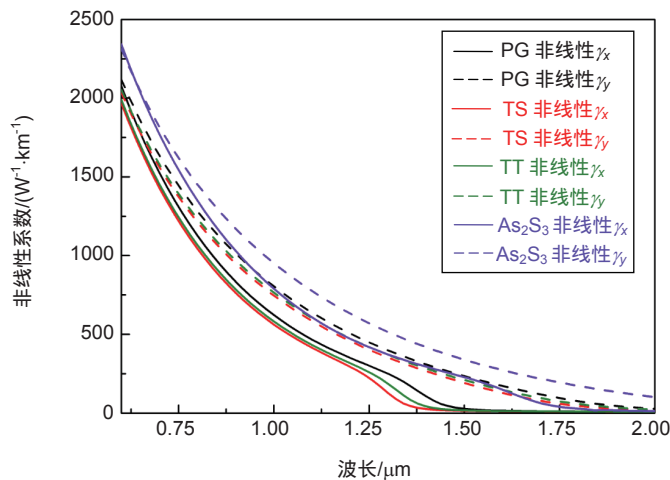


图 7 不同填充物对非线性系数的影响

Fig. 7 Influence of different fillers on nonlinear coefficient

表 4 不同填充物的双折射率、色散值和非线性系数对比(λ=1.55 μm)

Table 4 Comparison of birefringence, dispersion and non-linearity of different fillers (λ=1.55 μm)

填充物	双折射 $n_{Bi}$	色散 $D/(ps \cdot nm^{-1} \cdot km^{-1})$	非线性系数 $\gamma/(W^{-1} \cdot km^{-1})$	
			y 轴	x 轴
TT	0.22	20.80	110.82	11.73
TS	0.18	20.58	88.5	11.4
PG	0.25	21	147.88	12.7
As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	0.37	21.7	277.76	132.07

比, 如表 4 所示。由表 4 可知, 当填充材料折射率越大, 双折射值、色散值和非线性系数均越来越大, 并且数值均高于普通光纤数值。

通过以上分析可知, 纤芯椭圆率相同时, 纤芯填充物折射率越大, 相应的双折射值、非线性系数也越大。无论是椭圆率还是填充物折射率对色散影响都不明显, 所以在正常通信波段 1.33 μm ~ 2 μm 之间, 为了获得高双折射、高非线性、近零色散平坦等特性优异的 PCF, 可以在增大椭圆率的基础上, 在纤芯填充折射率高的物质。

## 4 结 论

本文设计了一种包层空气孔为正方形结构, 纤芯为椭圆空气孔的 PCF, 本文设计的结构不易变形且更稳定, 能同时实现高双折射特性、高非线性和近零色散平坦等特性。利用基于完美匹配层的有限元法计算, 结果表明在波长 1.55 μm 处, 最大双折射值为 0.37, 最大非线性系数值 277.76; 在波段 1.2 μm ~ 1.8 μm 范围内, 色散呈现出近零色散平坦特性, 变化范围不超过 ±12.5 ps/(nm·km), 带宽 0.6 μm。这种集高双折射、

高非线性、近零色散平坦三重特性于一体的正方形空气孔 PCF 在超连续谱的产生、光纤通信等领域有望得到广泛应用。

## 参考文献

- [1] Saitoh K, Sato Y, Koshiba M. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber couplers[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(24): 3188–3195.
- [2] Sui N B, Hang L J, Liu J, et al. The design and fabrication of the grapefruit PCF for the fiber gratings[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(12): 110–114.  
隋宁波, 杭利军, 刘杰, 等. 光纤光栅用柚子型光子晶体光纤的设计与制备[J]. *光电工程*, 2011, **38**(12): 110–114.
- [3] Ferrando A, Silvestre E, Andrés P, et al. Designing the properties of dispersion-flattened photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2001, **9**(13): 687–697.
- [4] Yang T Y, Wang E L, Jiang H M, et al. High birefringence photonic crystal fiber with high nonlinearity and low confinement loss[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(7): 8329–8337.
- [5] Tsuchida Y, Saitoh K, Koshiba M. Design of single-moded holey fibers with large-mode-area and low bending losses: The significance of the ring-core region[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(4): 1794–1803.
- [6] Birks T A, Knight J C, Russell P S J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 1997, **22**(13): 961–963.
- [7] Kim S E, Kim B H, Lee C G, et al. Elliptical defected core photonic crystal fiber with high birefringence and negative flattened

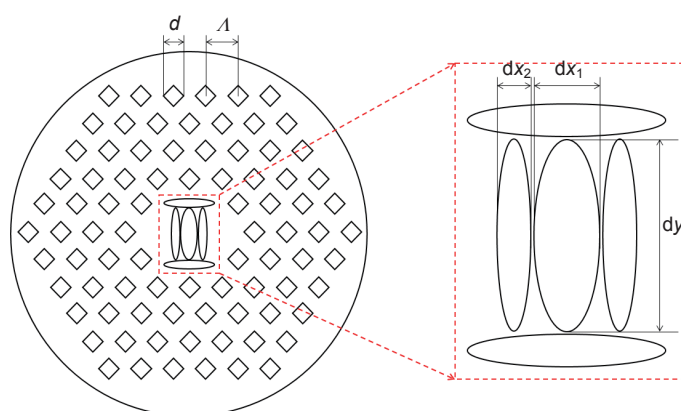
- dispersion[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(2): 1385–1391.
- [8] Steel M J, Osgood Jr R M. Elliptical-hole photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(4): 229–231.
- [9] Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Wadsworth W J, *et al.* Highly birefringent photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(18): 1325–1327.
- [10] Limpert J, Schmidt O, Rothhardt J, *et al.* Extended single-mode photonic crystal fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(7): 2715–2720.
- [11] Tan X J, Zhu X S. Optical fiber sensor based on Bloch surface wave in photonic crystals[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(14): 16016–16026.
- [12] Lu X, Bi W H, Ma S, *et al.* Modular interference of polarization maintaining photonic crystal fiber[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(9): 60–64.  
芦鑫, 毕卫红, 麻硕, 等. 保偏光子晶体光纤模间干涉的研究[J]. 光电工程, 2011, **38**(9): 60–64.
- [13] Zhang Y J, Kainerstorfer J, Knight J C, *et al.* Experimental measurement of supercontinuum coherence in highly nonlinear soft-glass photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(16): 18842–18852.
- [14] Cao Y, Li R M, Tong Z R. Investigation of a new kind of high birefringence photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(8): 084215.  
曹晔, 李荣敏, 童峥嵘. 一种新型高双折射光子晶体光纤特性研究[J]. 物理学报, 2013, **62**(8): 084215.
- [15] Ferrando A, Silvestre E, Miret J J, *et al.* Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(11): 790–792.
- [16] Steel M J, Osgood Jr R M. Polarization and dispersive properties of elliptical-hole photonic crystal fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, **19**(4): 495–503.
- [17] Wu X X, Fan W D, Liao W Y, *et al.* High birefringence in graphene structure photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(1): 0106002.  
吴宵宵, 范万德, 廖文英, 等. 石墨烯包层结构光子晶体光纤的高双折射特性[J]. 光子学报, 2016, **45**(1): 0106002.
- [18] Reeves W H, Knight J C, Russell P S J, *et al.* Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2002, **10**(14): 609–613.
- [19] Saitoh K, Florous N, Koshiba M. Ultra-flattened chromatic dispersion controllability using a defected-core photonic crystal fiber with low confinement losses[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(21): 8365–8371.
- [20] Dabas B, Sinha R K. Dispersion characteristic of hexagonal and square lattice chalcogenide  $As_2Se_3$  glass photonic crystal fiber[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(7): 1331–1337.
- [21] Chen G, Jiang Z W, Peng J G, *et al.* Study of air-clad large-mode-area ytterbium doped photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(14): 144206.  
陈瑰, 蒋作文, 彭景刚, 等. 空气包层大模场面积掺铽光子晶体光纤研究[J]. 物理学报, 2012, **61**(14): 144206.
- [22] Kumar V V R K, George A K, Knight J C, *et al.* Tellurite photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(20): 2641–2645.
- [23] Liu Y X, Zhang P Q, Xu Y S, *et al.* Dispersion properties of  $Ge_{20}Sb_{15}Se_{65}$  chalcogenide glass photonic crystal fiber for mid-ir region[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 516–521.  
刘永兴, 张培晴, 许银生, 等.  $Ge_{20}Sb_{15}Se_{65}$  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.
- [24] Chen Y E, Hou L T. Preparation of  $Yb^{3+}$  doped double-clad photonic crystal fiber[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(2): 62–66.  
陈月娥, 侯蓝田.  $Yb^{3+}$  掺杂双包层光子晶体光纤制备研究[J]. 光电工程, 2009, **36**(2): 62–66.
- [25] Inci H D, Ozsoy S. Birefringence, dispersion and loss properties for PCFs with rectangular air-holes[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, **67**: 354–358.
- [26] Yajima T, Yamamoto J, Ishii F, *et al.* Low-loss photonic crystal fiber fabricated by a slurry casting method[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(25): 30500–30506.
- [27] Yang S G, Zhang Y J, Peng X Z, *et al.* Theoretical study and experimental fabrication of high negative dispersion photonic crystal fiber with large area mode field[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(7): 3015–3023.
- [28] Ohkubo T, Tsuchida E, Kenzo D, *et al.* Insights from ab initio molecular dynamics simulations for a multicomponent oxide glass[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2018, **101**(3): 1122–1134.
- [29] Lines M E. Oxide glasses for fast photonic switching: A comparative study[J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, **69**(10): 6876–6884.
- [30] Mito T, Fujino S, Takebe H, *et al.* Refractive index and material dispersions of multi-component oxide glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1997, **210**(2–3): 155–162.
- [31] Karasawa N. Dispersion properties of liquid crystal core photonic crystal fibers calculated by a multipole method modified for anisotropic inclusions[J]. *Optics Communications*, 2015, **338**: 123–127.
- [32] Coen S, Chau A H L, Leonhardt R, *et al.* White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2001, **26**(17): 1356–1358.
- [33] Shi F F, Wu Y, Li M C, *et al.* Highly birefringent two-mode photonic crystal fibers with near-zero flattened dispersion[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, **3**(6): 1181–1188.



# Characteristics in square air hole structure photonic crystal fiber

Zhang Xuedian, Yuan Manman, Chang Min\*, Lu Xinglian, Chen Nan,  
Nie Fukun, He Menghui, Qi Ningning, Zhuang Songlin

Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, School of Optical-Electrical and Computer Engineering,  
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China



Elliptical core, square air hole cladding PCF structure

**Overview:** Photonic crystal fibers (PCFs) have attracted a considerable amount of attention recently because of their unique properties that can not be realized in conventional optical fibers. Owing to their flexible design for the cross section, PCFs can realize particular properties such as high birefringence, high nonlinearity, ultra-flatten dispersion, large effective mode area, endlessly single mode, and etc. In this paper, in order to achieve high birefringence and flattened chromatic dispersion at the same time, a smaller sized elliptical air hole in the core is introduced as a defected core in square air holes. The present design has the asymmetry in both fiber core and the cladding region by one kind of air holes (elliptical). The role of an elliptical defected core in the proposed fiber is not only to control the chromatic dispersion to be flattened, but also to increase the value of birefringence up to the order of  $10^{-1}$ . Among them, the structure of the square air hole is not easy to be deformed and thus has a more stable characteristic. Hexagonal structure of square air holes is the best way to obtain high birefringence and flattened chromatic dispersion. In the designed structure, one elliptical air hole is arranged in the core region and four elliptical air holes are ordered in the upper and lower sides. In our simulation, the plane wave expansion method and full-vector finite element method (FEM) with the perfectly matched layer (PML) boundary condition are applied, which have been the most common and accurate methods to investigate the eigen-mode problems of guided modes in PCFs. The effects of different core ellipticity and core filling materials on the birefringence, dispersion and nonlinearity of the photonic crystal fiber are discussed. The results show that the birefringence and maximum nonlinear coefficient are up to the value of 0.37 and  $277.76 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$  at  $1.55 \mu\text{m}$  when the ellipticity of the core is different and the filling material is the same. The birefringence and maximum nonlinear coefficient are up to the value of 0.34 and  $307 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$  at  $1.55 \mu\text{m}$  in the condition where the ellipticity of the core is the same and the filling material is different. Besides, the dispersion has a dispersionless flat characteristic. The range of change is not more than  $\pm 12.5 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ , and the bandwidth is  $0.6 \mu\text{m}$  in the range of wavelengths from  $1.26 \mu\text{m}$  to  $1.8 \mu\text{m}$ .

**Citation:** Zhang X D, Yuan M M, Chang M, *et al.* Characteristics in square air hole structure photonic crystal fiber[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(5): 170633

Supported by the National Key Scientific Instrument and Equipment Development Projects of China (2014YQ09070903)  
\* E-mail: changmin@usst.edu.cn