

一种高双折射负色散的缺陷型光子晶体光纤

廖昆¹, 廖健飞², 谢应茂^{2*}, 王彤华², 田华¹

¹萍乡学院机械电子工程学院, 江西 萍乡 337055;

²赣南师范大学物理与电子信息学院, 江西 赣州 341000

摘要 设计了一种中心带有椭圆空气孔缺陷的光子晶体光纤, 采用全矢量有限元法研究了该光纤基模的电场分布、双折射、色散、非线性及限制损耗等特性。结果表明, 电场能量被束缚在光纤的纤芯。在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处, 光纤的双折射为 5.958×10^{-2} , 达到 10^{-2} 数量级; 在 $1.50 \sim 1.60 \mu\text{m}$ 波段范围内, 色散值在 $(-549.2 \pm 5) \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 范围内, 具有高负平坦色散。此外, 该光纤的 x 偏振基模的非线性系数为 $46.82 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 低损耗值为 $5.413 \times 10^{-4} \text{ dB/km}$, 并且在 y 方向上两个基模偏振态的限制损耗是 x 方向的 6423 倍。该光子晶体光纤具有高双折射、高非线性、高负平坦色散、低损耗的特点, 在光纤传感、偏振控制、色散补偿及非线性光学等领域具有广阔的应用前景。

关键词 光子晶体光纤; 高双折射; 高非线性; 负色散; 低限制损耗; 有限元法

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.070604

A Defect Photonic Crystal Fiber With High Birefringence and Negative Dispersion

Liao Kun¹, Liao Jianfei², Xie Yingmao², Wang Xinghua², Tian Hua¹

¹ School of Mechanical and Electronic Engineering, Pingxiang University, Pingxiang, Jiangxi 337055, China;

² School of Physics and Electronic Information, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China

Abstract A new type of photonic crystal fiber with elliptical air holes in the center is designed, and we study the properties including electric field distribution, birefringence, dispersion, nonlinearity, and confinement loss of fundamental mode of this fiber by using full vector finite element method. The results show that the electric field energy is bound in the fiber core. The birefringence can be reached 5.958×10^{-2} , which reaches the magnitude of 10^{-2} at a wavelength of $1.55 \mu\text{m}$. In the wavelength range from $1.50 \mu\text{m}$ to $1.60 \mu\text{m}$, the dispersion is $(-549.2 \pm 5) \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, which is a highly flattened negative dispersion. The nonlinear coefficient in x -polarization of this fiber is $46.82 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, and the low confinement loss is $5.413 \times 10^{-4} \text{ dB/km}$ at $1.55 \mu\text{m}$, and the confinement losses of the polarization states in the y direction are 6423 times than those in the x direction. The proposed photonic crystal fiber has the characteristic of high birefringence, high nonlinearity, highly flattened negative dispersion, and low confinement loss, which could be widely used in the field of optical fiber sensing, polarization control, dispersion compensation, nonlinear optics and so on.

Key words photonic crystal fiber; high birefringence; high nonlinearity; negative dispersion; low confinement loss; finite element method

OCIS codes 060.2310; 060.2330; 060.4510

1 引言

1991年, Russell等^[1]提出了光子晶体光纤(PCF)的概念。光子晶体光纤的结构具有多变性,

且它是一种依赖于微型结构的新型光纤,因此,受到学者们的广泛关注。相对于传统光纤,光子晶体光纤具有无截止单模传输、色散可调、双折射特性优异、非线性系数高及模场面积大等特性^[2-3]。当受到

收稿日期: 2017-12-28; 收到修改稿日期: 2018-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(61765003, 11747020); 江西省教育厅科技项目(GJJ171131)

作者简介: 廖昆(1990—), 男, 硕士, 助教, 主要从事光纤光学与光电子学方面的研究。E-mail: 930488337@qq.com

* 通信联系人。E-mail: 13766355863@126.com

外部应力时,光子晶体光纤结构发生形变,从而引起光纤的折射率分布发生变化,进而影响其传输特性。利用包层空气孔或者纤芯形状的灵活多变性,破坏光纤结构的对称性,从而实现光纤的高双折射、高非线性系数、低损耗以及色散可调或者零色散等目的,因此光子晶体光纤可广泛应用于光纤通信系统、光纤传感以及光纤光学等领域。

2000年,Ortigosá-Blanch等^[4]第一次发现具有高双折射特性的光子晶体光纤,其双折射为 3.7×10^{-3} ,比典型光纤的双折射值高一个数量级。2010年,张磊等^[5]采用电磁场散射多极理论研究了具有纳米结构的光子晶体光纤的高双折射特性,计算了入射波的波长 $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ 时,该纳米结构光纤的双折射特性、非线性效应以及色散特性。2013年,曹晔等^[6]分析了一种具有高双折射、高非线性系数的光子晶体光纤,当 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时,其双折射高达 1.53×10^{-2} 。2016年,周铭皓等^[7]采用多极法研究了一种包层为椭圆空气孔的光子晶体光纤,该结构的双折射值可达到 2.26×10^{-3} ,限制损耗值为 $2.8 \times 10^{-3} \text{ dB/km}$;同年,李绪友等^[8]提出了一种具有良好保偏特性的空芯带隙光子晶体光纤(PBF),在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处,该PBF的双折射高达 6.19×10^{-3} ,拍长温度敏感系数低于 $2.86 \times 10^{-8} \text{ m}^\circ\text{C}$,比常规的熊猫保偏光纤低两个数量级。2017年,谷芊志等^[9]设计了一种高双折射、低损耗的新型光子晶体光纤,其在 $1300 \sim 1500 \text{ nm}$ 光纤波长范围内具有零色散点,双折射为 2.55×10^{-2} ,限制损耗值为 $2.4 \times 10^{-2} \text{ dB/km}$;王俊达等^[10]设计了一种基于色散补偿光子晶体光纤的双通道光子时间拉伸模数转换器系统,结果表明,色散补偿光子晶体光纤能够有效抑制三阶谐波的产生,提高双通道光子时间拉伸模数转换器的量化精度。目前,针对高双折射特性、高非线性系数、光纤色散补偿以及低限制损耗特性的光子晶体光纤的研究鲜有报道。

本文采用全矢量有限元法,利用完美匹配层(PML)吸收边界条件,设计了一种中心带有椭圆空气孔缺陷的光子晶体光纤,研究了该光纤基模的模场分布、双折射、色散、非线性以及限制损耗等特性。

2 基本理论

目前,光子晶体光纤的研究方法主要包括平面波法、多极法、时域有限差分法及全矢量有限元法等^[11-12]。当光子晶体光纤结构的横截面不规则、空气孔的位置任意分布以及介质材料的折射率任意组合时,全矢量有限元法比其他方法更具

有优势。

光在光子晶体光纤结构中传播时,波动方程可由Maxwell方程组导出:

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

式中: H 为空间磁场强度; ϵ_r 和 μ_r 分别为介质材料的介电常数和磁导率; ω 为空间电磁波的角频率; c 为真空中光的传播速度。结合PML吸收边界条件,采用全矢量有限元法对建立的结构模型进行数值仿真,可以直接得出波的传播常数和模式有效折射率。

光纤偏振性能的强弱程度可由双折射来判定。双折射 B 可表示为

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

式中: Re 为光纤基模有效折射率的实部; n_{eff}^x 为光纤基模在 x 轴方向上偏振态的传播模式的有效折射率; n_{eff}^y 代表光纤基模在 y 轴方向上偏振态的传播模式的有效折射率。

根据光纤基模的有效折射率 n_{eff} 的实部,然后对入射波的波长进行二次求导,即可得出色散系数:

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

式中: n_{eff} 为入射波对应的传播模式的有效折射率; $D(\lambda)$ 为光纤基模的总色散系数,包含材料色散和波导色散。由(3)式可得出光纤基模的总色散系数。

光纤基模的非线性系数 γ 为

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

式中: n_2 为石英的非线性折射率,采用文献[13]的结果 $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$; A_{eff} 为基模的有效模场面积。

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

式中: Ω 为光纤结构的横截面面积; E 为横截面上的电场分布。

基模的限制损耗^[14]为

$$L_{\text{loss}} = \frac{20k_0}{\ln 10} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (6)$$

式中: $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为光纤基模有效折射率的虚部; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间中的波数。

3 模型仿真与结果分析

本文设计的光子晶体光纤截面如图1(a)所示。

光纤截面包层中的圆空气孔构成六边形结构,其中圆空气孔的孔间距为 Λ ,圆空气孔的直径为 D ,且有 $D=0.96\Lambda$;纤芯是由两个在水平方向上相互平行的椭圆空气孔缺陷构成,如图1(b)所示,缺陷椭圆空气孔破坏了三角阵列圆空气孔的对称性,有利于增加光纤的双折射。其中,两椭圆空气孔的孔间距 $d=0.48\Lambda$,并关于光纤截面的中心水平轴对称,椭圆空气孔的长轴 $D_x=1.12\Lambda$,短轴为 D_y ,光纤边界是PML层;光纤结构的基底材料为纯石英,纯石英的折射率可根据 Sellmeier 定律^[15]得到,并且空气孔中填充的是空气,其折射率为 $n_{\text{air}}=1.00$ 。

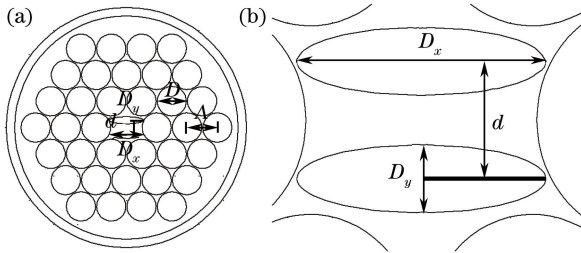


图1 光子晶体光纤结构示意图。(a)截面;(b)纤芯放大图

Fig. 1 Structural diagram of photonic crystal fiber.

(a) Section; (b) enlarged view of the core

3.1 基模的模场分布

根据本文设计的光纤结构,当 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 时,该光纤基模电场分布的数值仿真结果如图2所示,其中箭头指向为光纤基模的不同偏振态电场方向。图2(a)为光纤基模的 HE_{11}^x 偏振态电场分布,图2(b)为光纤基模的 HE_{11}^y 偏振态电场分布,其中 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 为基模的两个简并态,由于结构改变,原本相同的两个简并态现在不再简并,并且这两个简并态相位差为 $\pi/2$ 。

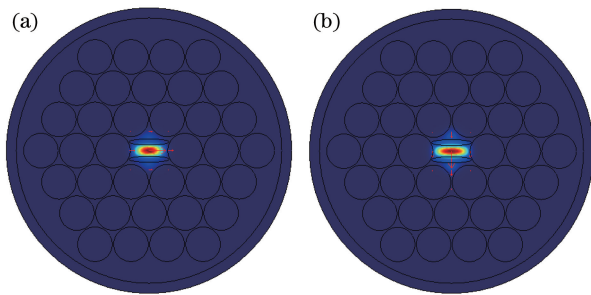


图2 不同光纤基模偏振态的电场分布。

(a) HE_{11}^x ; (b) HE_{11}^y

Fig. 2 Electric field distribution of optical fiber at different polarization states. (a) HE_{11}^x ; (b) HE_{11}^y

由图2可知:光在光纤中传输时,大部分电场能量是束缚在光纤的纤芯,有利于光纤长距离的传输;该光纤基模的电场分布在 x 轴方向上拓展,电场能

量分布呈椭圆形,这主要是因为椭圆孔呈上下对称,导致 y 轴方向的光纤基模有效折射率降低,而 x 轴方向的光纤基模有效折射率增加,因此光纤基模的电场分布在 x 方向呈椭圆形。

3.2 椭圆空气孔的短轴 D_y 与光纤基模双折射的关系

根据设计的光纤结构,在包层结构中圆空气孔的孔间距 $\Lambda=2.5\mu\text{m}$,椭圆空气孔的短轴 D_y 分别为 $0.42, 0.56, 0.72, 0.84\mu\text{m}$ 时,数值计算光纤基模的双折射与椭圆空气孔的短轴 D_y 的关系,其结果如图3所示。

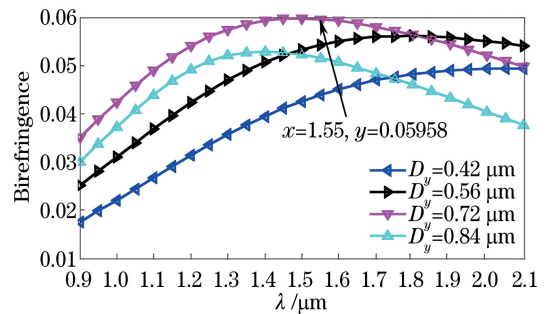


图3 双折射与椭圆空气孔的短轴 D_y 的关系

Fig. 3 Relationship between birefringence and short axis

D_y of elliptical air holes

由图3可知:在入射波段为 $0.90\sim 2.10\mu\text{m}$ 时,光纤的双折射随波长的增大先增大后减小;在相等的人射波波长处,光纤的双折射也随椭圆空气孔短轴 D_y 的增大先增大后减小;在 $\lambda=1.55\mu\text{m}$, $D_y=0.72\mu\text{m}$ 时,该光纤的双折射有最大值,达到 5.958×10^{-2} ,该光纤的双折射大于文献所报道的双折射值 1.53×10^{-2} ^[6]和 2.26×10^{-3} ^[7],比传统光纤高出两个数量级。因此,本文所设计的光纤不仅能满足高双折射的要求,还可适用于对偏振性要求很高的精密器件。

3.3 椭圆空气孔的短轴 D_y 与光纤基模的色散关系

根据设计的光纤结构,在包层结构中圆空气孔的孔间距 $\Lambda=2.5\mu\text{m}$,椭圆空气孔的短轴 D_y 分别为 $0.42, 0.56, 0.72, 0.84\mu\text{m}$ 时,数值计算光子晶体光纤结构基模的两个偏振态 HE_{11}^x 模和 HE_{11}^y 模的色散与短轴 D_y 的关系。图4所示为基模偏振态 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 的色散与短轴 D_y 的关系。

由图4可知:在入射波段为 $0.90\sim 2.10\mu\text{m}$ 时,随波长的增大,光纤的色散值先减小后增大;在 $\lambda=1.55\mu\text{m}$, $D_y=0.72\mu\text{m}$ 时,光纤基模 HE_{11}^x 偏振态的色散系数达到 $-549.2\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,是G.652标准光纤色散的27倍;并且在波长为 $1.50\sim 1.60\mu\text{m}$ 范

围内,其色散系数变化不大,故可以在 $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$ 附近作色散补偿的使用。同理,在 $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$, $D_y=0.42\ \mu\text{m}$ 时,对于 HE_{11}^x 偏振态的色散系数达到

$-557.3\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$;并且在波长为 $1.50\sim 1.60\ \mu\text{m}$ 范围内,其色散系数变化不大,故也可以在 $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$ 附近作色散补偿的使用。

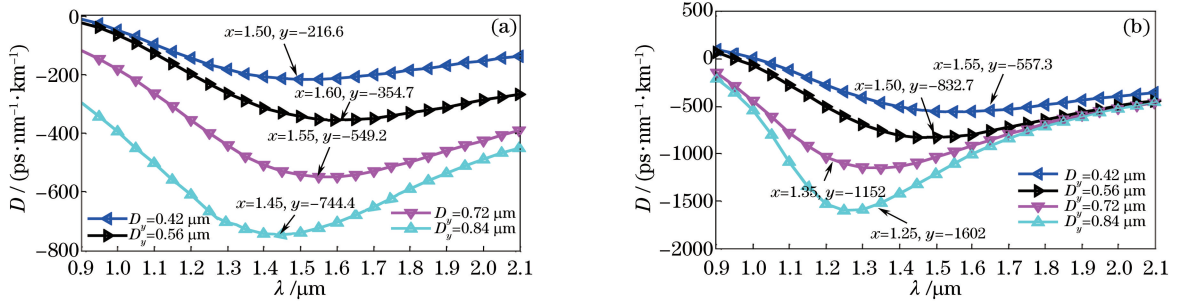


图4 不同基模偏振态的色散与短轴 D_y 的关系。(a) HE_{11}^x ; (b) HE_{11}^y

Fig. 4 Relationship between dispersion and short axis D_y at different polarization states. (a) HE_{11}^x ; (b) HE_{11}^y

3.4 椭圆空气孔短轴 D_y 与光纤基模非线性系数的关系

根据设计的光纤结构,在包层结构中圆空气孔的孔间距 $\Lambda=2.5\ \mu\text{m}$,椭圆空气孔的短轴 D_y 分别为 $0.42, 0.56, 0.72, 0.84\ \mu\text{m}$ 时,数值计算光子晶体光纤基模的两个偏振态 HE_{11}^x 模和 HE_{11}^y 模的非线性系数 γ 与短轴 D_y 的关系,其结果如图5所示。

由图5可知;在入射波段为 $0.90\sim 2.10\ \mu\text{m}$ 时,光纤基模的非线性系数 γ 随波长的增大反而逐渐减小;在波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 时,短轴 D_y 的变化对于 HE_{11}^x 偏振态的非线性系数 γ 影响不大,且在 $D_y=0.72\ \mu\text{m}$ 时,非线性系数 γ 为 $46.82\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$,高于文献[6,16]报道的非线性系数;而 HE_{11}^y 偏振态的非线性系数 γ 也达到 $20.13\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。

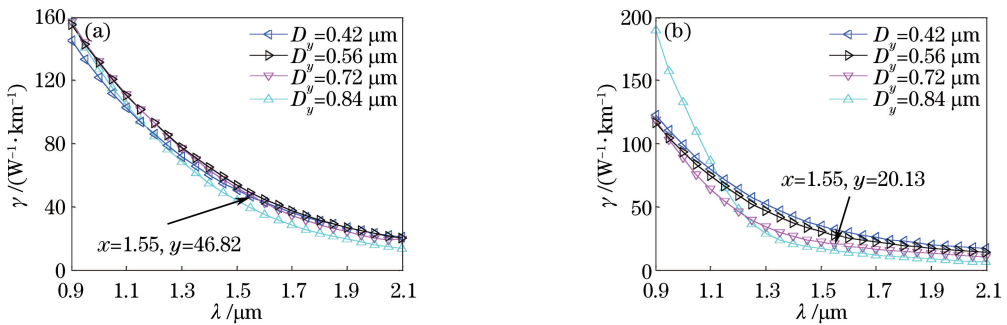


图5 不同偏振态的非线性系数 γ 与短轴 D_y 的关系。(a) HE_{11}^x ; (b) HE_{11}^y

Fig. 5 Relationship between nonlinear coefficient γ and short axis D_y at different polarization states. (a) HE_{11}^x ; (b) HE_{11}^y

3.5 椭圆空气孔的短轴 D_y 与光纤基模的限制损耗关系

根据设计的光纤结构,在包层结构中圆空气孔的孔间距 $\Lambda=2.5\ \mu\text{m}$,椭圆空气孔的短轴 D_y 分别

为 $0.42, 0.56, 0.72, 0.84\ \mu\text{m}$ 时,光子晶体光纤基模的两个偏振态 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 的限制损耗与短轴 D_y 的关系的数值计算结果如图6所示。

由图6可知;在入射波段为 $0.90\sim 1.40\ \mu\text{m}$ 内,

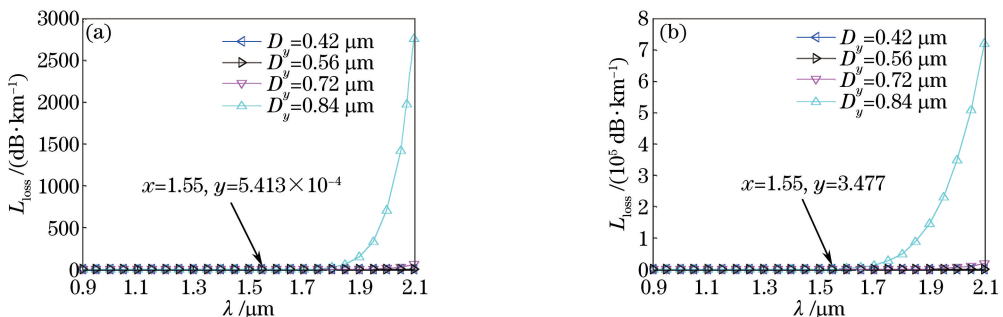


图6 不同偏振态的限制损耗 L_{loss} 与短轴 D_y 的关系。(a) HE_{11}^x ; (b) HE_{11}^y

Fig. 6 Relationship between confinement loss L_{loss} and short axis D_y at different polarization states. (a) HE_{11}^x ; (b) HE_{11}^y

光纤基模的限制损耗变化相对平缓;随波长的增大,光纤基模的限制损耗增大;在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $D_y = 0.72 \mu\text{m}$ 时, HE_{11} 模的限制损耗为 $5.413 \times 10^{-4} \text{ dB/km}$, 低于文献[7,9]报道的限制损耗值;同时,光纤基模的两个偏振态 HE_{11} 和 HE_{11} 在限制光纤能量损耗能力方面, x 偏振方向强于 y 偏振方向,并且 x 方向的损耗限制能力是 y 方向的6423倍。当光在光子晶体光纤中传播时, y 偏振方向上的光纤基模的限制损耗变化很快,故可以制造保偏性能强的偏振单模光纤。

4 结 论

设计了一种中心带有椭圆空气孔缺陷的光子晶体光纤,采用全矢量有限元法,利用PML吸收边界条件,研究了该光纤基模的电场分布、双折射、色散、非线性及限制损耗等特性。研究表明,电场能量被束缚在光纤的纤芯。在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处,光纤的双折射为 5.958×10^{-2} , 高于其他文献所报道的双折射 1.53×10^{-2} [6]和 2.26×10^{-3} [7]。在 $1.50 \sim 1.60 \mu\text{m}$ 波段范围内,色散值在 $(-549.2 \pm 5) \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 范围内,具有高负平坦色散。同时该光纤的 x 偏振基模的非线性系数为 $46.82 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 高于文献[6,16]报道的非线性系数;低损耗值为 $5.413 \times 10^{-4} \text{ dB/km}$, 低于文献[7,9]报道的限制损耗值,且 y 方向基模偏振态的限制损耗是 x 方向限制损耗的6423倍,利于制造保偏性能强的偏振单模光纤。这种拥有高双折射、高非线性系数、高负平坦色散、低损耗的光子晶体光纤在光纤传感、偏振调控、色散补偿及非线性光学等领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Russell P S, Hand D P, Chow Y T, *et al.* Optically induced creation, transformation, and organization of defects and color centers in optical fibers [J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1516: 47-54.
- [2] Wang W, Zhu Z M. Analysis of photonic crystal fibers and its application in supercontinuum [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5): 684-688.
- [3] Hao R, Li Z, Sun G, *et al.* Analysis on photonic crystal fibers with circular air holes in elliptical configuration[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(5): 363-368.
- [4] Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Wadsworth W J, *et al.* Highly birefringent photonic crystal fibers [J]. Optics Letters, 2000, 25(18): 1325-1327.
- [5] Zhang L, Li S G, Yao Y Y, *et al.* Characteristics of nano-structured photonic crystal fibers with high birefringence[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(2): 1101-1107.
张磊, 李曙光, 姚艳艳, 等. 高双折射纳米结构光子晶体光纤特性研究 [J]. 物理学报, 2010, 59(2): 1101-1107.
- [6] 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.
- [7] Zhou M H, Huang Y L. Highly birefringent photonic crystal fiber based on lattice structure of elliptic layer [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(3): 0306002.
周铭皓, 黄勇林. 椭圆高双折射光子晶体光纤的双折射及损耗研究 [J]. 光子学报, 2016, 45(3): 0306002.
- [8] Li X Y, Xu Z L, Yang H R, *et al.* Analysis of thermal properties in a polarization-maintaining air-core photonic bandgap fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0405003.
李绪友, 许振龙, 杨汉瑞, 等. 保偏空芯带隙光子晶体光纤温度特性研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0405003.
- [9] Gu Q Z, Li Q H. Novel photonic crystal fiber with high birefringence and low loss [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 060603.
谷芊志, 励强华. 一种高双折射、低损耗的新型光子晶体光纤 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 060603.
- [10] Wang J D, Chen Y, Chen X N. Dual-channel photonic time-stretched analog-to-digital converter system based on dispersion compensating photonic crystal fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1206003.
王俊达, 陈颖, 陈向宁. 基于色散补偿光子晶体光纤的双通道光子时间拉伸模数转换器系统研究 [J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1206003.
- [11] Fujisawa T, Koshiba M. Finite element characterization of chromatic dispersion in nonlinear holey fibers [J]. Optics Express, 2003, 11(13): 1481-1489.
- [12] Miao R C, Zhang Y N, Ren L Y, *et al.* Polarization properties of elliptical core non-hexagonal symmetry polymer photonic crystal fibre [J]. Chinese Physics

- B, 2007, 16(6): 1719-1724.
- [13] Boyd R W. Nonlinear optics[M]. London: Academic Press, 2003.
- [14] Liou J H, Huang S S, Yu C P. Loss-reduced highly birefringent selectively liquid-filled photonic crystal fibers[J]. Optics Communications, 2010, 283(6): 971-974.
- [15] Chow K K, Shu C, Lin C, *et al.* Polarization-insensitive widely tunable wavelength converter based on four-wave mixing in a dispersion-flattened nonlinear photonic Crystal fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(3): 624-626.
- [16] Yang T Y, Jiang H M, Wang E L, *et al.* A photonic crystal fibers with large birefringence and high nonlinearity in near-infrared band [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(3): 350-354.
- 杨天宇, 姜海明, 王二垒, 等. 一种近红外波段的高双折射高非线性光子晶体光纤[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(3): 350-354.