

文章编号: 1001-3806(2018)01-0048-05

基于结构和填充的光子晶体光纤色散分析

张学典, 陈楠, 聂富坤, 逯兴莲, 常敏

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

摘要: 为了获得色散平坦特性良好的光子晶体光纤, 采用有限元法进行了理论分析和实验验证, 取得了有效折射率、色散系数随波长的变化数据。当空气孔直径 $d = 1.6\mu\text{m}$ 、孔间距 $\Lambda = 2\mu\text{m}$ 时, 在 $1.2\mu\text{m} \sim 2.1\mu\text{m}$ 波段内, 色散平坦特性较好, 且在 1550nm 波长处的色散系数值为 $108.20\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 并在此结构基础上, 研究了填充材料、不同填充方式对色散特性的影响。结果表明, 采用“十”字形的填充方式获得的色散特性更好, 当采取普通酒精为填充材料时, 波长在 1550nm 处的色散系数值可以减小到 $20.39\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 接近 G.652 标准单模光纤在 1550nm 处的色散系数值。这一结果对光通信领域的研究是有帮助的。

关键词: 光纤光学; 色散特性; 有限元法; 结构参量; 填充方式; 光子晶体光纤

中图分类号: TN253

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.01.010

Dispersion characteristics analysis of photonic crystal fibers based on structure parameters and filling modes

ZHANG Xuedian, CHEN Nan, NIE Fukun, LU Xinglian, CHANG Min

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

Abstract: In order to obtain photonic crystal fibers with good dispersion characteristics, by the finite element method, the theoretical analysis and experimental verification were carried out, and the effective index of refraction and dispersion coefficient with the change of wavelength were obtained. According to the analysis results, when the hole diameter $d = 1.6\mu\text{m}$ and the hole spacing $\Lambda = 2\mu\text{m}$, the dispersion flatness is better in the $1.2\mu\text{m} \sim 2.1\mu\text{m}$ band and the dispersion coefficient is $108.20\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ at the wavelength of 1550nm . Based on this structure, effect of different filling modes and filling material on the dispersion characteristics was studied. The results show that better dispersion characteristics are obtained for the “十” shape filling method, and that when ordinary alcohol is used as filling material, the dispersion coefficient at the wavelength of 1550nm can be reduced to $20.39\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, which is close to that of a G.652 single mode fiber at 1550nm . This result is helpful for research in the optical communication field.

Key words: fiber optics; dispersion characteristic; finite element method; structure parameter; filling method; photonic crystal fiber

引言

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 也称微结构光纤, 其包层上通常排列着形式奇特的气孔且气孔的折射率较为复杂, 这些气孔的尺寸量级在微米级, 贯穿整个器件, 传导光波可以被严格地限制在低折射率的纤芯中^[1-2]。光子晶体光纤的传输取决于空气孔尺寸和排列方式这两个方面, 由于光子晶体光纤结构

上存在灵活多变的可控性, 使其比传统光纤拥有更多优越的传输特性, 例如: 无截止单模、非线性效应、奇异的色散、高双折射特性、可控的模式面积等^[3-5]。

波分复用系统在当今得到了广泛的应用, 系统要求的光纤总色散尽量减小到零且能够在较大波长的范围内实现良好的色散平坦。研究分析表明, 在设计光纤时, 适当地优化其结构参量, 能够获得在较大波长范围内的近零平坦色散, 使其达到波分复用系统中的要求^[6]。至今学者们已提出了很多新颖的光纤结构: 2005年, WU等人提出了一种方形渐变气孔的微结构光纤^[7]; 2009年, ZHAO等人提出组合方形空气孔微结构光纤获得较低的色散平坦^[8]; 2011年, GONG等人提出多层环形气孔的密集结构获得高且平坦的色散^[9]; 2015年, KARASAWA提出在传统光子晶体光纤

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目 (2014YQ090709)

作者简介: 张学典 (1974-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为光电检测、光子晶体光纤。

E-mail: zhangxuedian@hotmail.com

收稿日期: 2017-02-27; 收到修改稿日期: 2017-04-05

中心填充液晶,调控温度获得良好的色散特性^[10]; 2015 年, KONG 等人设计了一种圆形结构的双芯色散补偿型光子晶体光纤, 主要利用掺杂的方式来实现^[11]。如上所述, 可以通过更改结构和掺杂来获得良好的色散特性。

在本文中, 以提高光子晶体光纤的色散平坦特性为目的, 研究结构参量及填充方式对其色散特性的影响。

1 模型与理论

本文中设计的光子晶体光纤结构如图 1 所示。它的原型是空气孔以 11 × 11 矩阵排列的四方晶格, 如图所示的八边形结构是在其基础上微调获得的。模型中的空气孔直径是 d , 孔间距为 Λ , 空气填充率则用 d/Λ 表示。设置包层材料的折射率 $n_m = 1.45$, 气孔的折射率 $n = 1$ 。

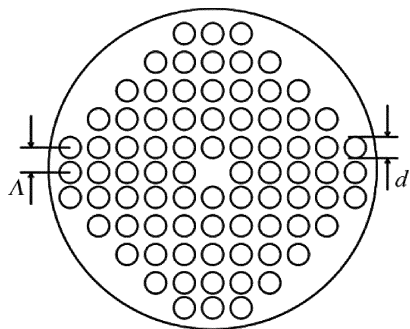


Fig. 1 Cross section of PCF

PCF 的总色散系数为材料色散系数和波导色散系数这两者的总和^[12]。由于光纤的基底材料折射率对波长的依赖性, 由此产生的材料色散可表示为:

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_m}{d\lambda^2} \quad (1)$$

式中, c 为真空中的光速, λ 为光纤中传输光的波长, n_m 为材料折射率, 可通过 Sellmeier 方程计算。与光纤的包层结构参量密切相关的色散称作波导色散系数 $D_w(\lambda)$, 其计算公式如下:

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

式中, n_{eff} 为模式的有效折射率。由此可得到的光纤总色散系数可表示为:

$$D = D_m + D_w \quad (3)$$

目前, 很多分析光纤导波模式的理论方法得到发展和普及, 如: 有效折射率法 (effective index method, EIM)^[13]、时域有限差分法 (finite difference time-domain, FDTD)^[14]、平面波展开法 (plane-wave expansion method, PWEM)^[15]、有限元法 (finite element method, FEM)^[16] 等。其中, 有限元法的应用较为广泛, 其在分析光波导的模式方面有较高的计算精度, 对于任意形

状不规则、任意排布的空气孔、任意材料折射率组合的情况下也相当适用。利用该方法对光纤的色散特性能够进行分析、建模和计算都较为方便。有限元法的基本原理是: 根据 Maxwell 方程, 可以推导出光子晶体光纤遵循的本征值方程:

$$\nabla \times (\epsilon_r^{-1} \nabla \times \mathbf{H}) = (\omega/c)^2 \mu_r \mathbf{H} \quad (4)$$

式中, 磁场强度是 \mathbf{H} , 介电常数和磁导率分别为 ϵ_r 和 μ_r , 光波角频率为 ω 。其计算基本过程是: (1) 构建模型; (2) 设定波长、材料折射率、子区域及边界条件; (3) 计算区域离散网格化, 在每个小区域求解 (4) 式, 然后综合所有小区域内的解, 得到整个计算区域上的解; (4) 进行解后处理^[17-18]。

本文中采用有限元法对所提出的 PCF 结构进行模拟分析。根据仿真结果讨论了结构参量、不同材料、两种填充方式对 PCF 色散系数的影响。

2 结果及讨论

2.1 结构参量对色散系数的影响

结构参量很大程度上决定了光子晶体光纤的性质, 下面讨论空气孔直径 d 和孔间距 Λ 对色散的影响。

2.1.1 气孔直径 d 对色散系数的影响 首先考虑保持孔间距 Λ 不变的情况下, 空气孔直径变化对色散特性的影响。本研究中 Λ 取为 $2\mu\text{m}$, 空气孔直径 d 取 5 个值, 分别为 $0.8\mu\text{m}$, $1.0\mu\text{m}$, $1.2\mu\text{m}$, $1.4\mu\text{m}$, $1.6\mu\text{m}$, 即空气填充率 d/Λ 从 0.4 变化到 0.8。通过计算获得基本模场, 有效折射率和色散系数, 如图 2 所示。

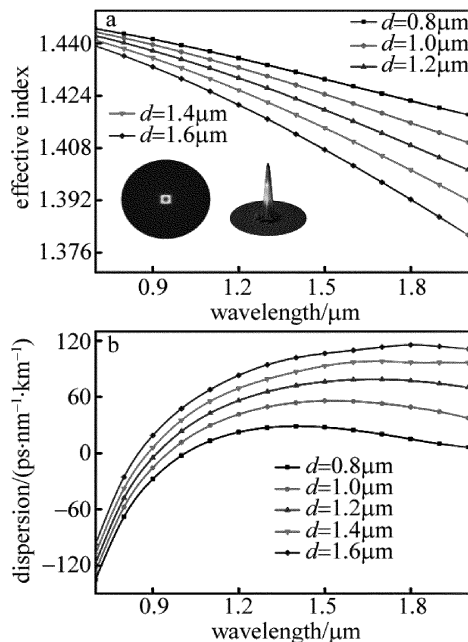


Fig. 2 Relationship between some parameters and wavelength under different d when $\Lambda = 2\mu\text{m}$
a—effective refractive index b—dispersion coefficient

图 2a 是基本模场图和有效折射率随波长的变化曲线,很容易观察到:光纤随着空气孔直径的增大,在同一波长处的有效折射率减小,当波长增加时,有效折射率也减小。再利用(1)式、(2)式和(3)式,获得波长和色散系数的关系,如图 2b 所示:空气孔直径减小时,零色散点沿着长波的方向移动;在长波区域,零色散波长随着空气孔直径的增大也沿长波方向移动。所以若是将零色散波长增大到长波区域,只需要保持 Λ 不变,减小空气孔直径 d ,也就是减小空气填充率 d/Λ 就可以实现。由计算可知,在 1550nm 附近处,随着空气孔直径的增加,5 条曲线对应的色散系数如表 1 所示。数据表明:当孔间距 Λ 不变时,从直径从 0.8 μm 增加到 1.0 μm 时,在 1550nm 处的色散系数增长率为 122%,而在 d 从 1.4 μm 增加到 1.6 μm 时,色散系数的增长率只有 13.4%,这种结果表明,在波长 1550nm 处,空气孔直径 $d=1.6\mu\text{m}$ 时,曲线较为平坦。

Table 1 Dispersion coefficient corresponding to different air hole diameter at 1550nm wavelength

$d/\mu\text{m}$	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
$D/(\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$	26.30	55.82	77.54	95.40	108.20

2.1.2 气孔间距 Λ 对色散系数的影响 令空气填充率 $d/\Lambda=0.8$,然后通过改变孔间距 Λ 来获得其对色散系数的影响,取 Λ 分别为 1.2 μm ,1.4 μm ,1.6 μm ,1.8 μm ,2.0 μm ,2.2 μm 以及 2.4 μm 。获得的有效折射率随波长的变化关系以及色散曲线如图 3 所示。

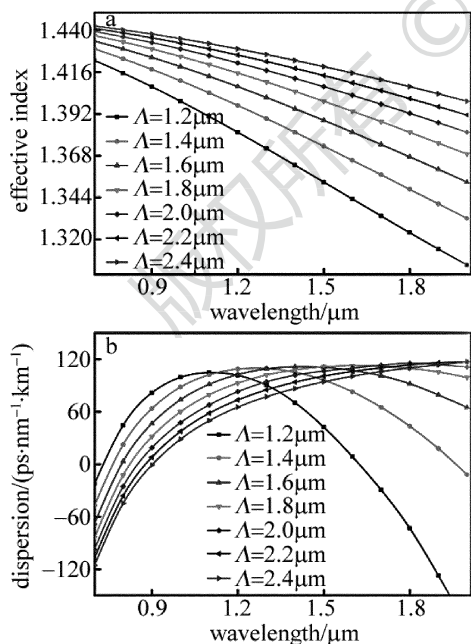


Fig. 3 Relationship between some parameters and wavelength under different Λ when $d/\Lambda=0.8$

a—effective refractive index b—dispersion coefficient

从图 3a 中看出,在相同的波长处,有效折射率会随着孔间距 Λ 的增加而增大,而在相同孔间距 Λ 的情

况下,有效折射率随着波长的变化而减小。在图 3b 中,随着孔间距 Λ 的增加,零色散波长向着长波方向移动。波长增大时,色散系数先增加后减小。在 1550nm 处,随着 Λ 的增加,获得的色散系数如表 2 所示。 Λ 由 1.2 μm 增加到 2.4 μm 时,计算得到色散系数增长率分别为 245.8%,21.4%,2.7%, -3.7%, -4.2%, -5.8%,随着 Λ 增大,色散系数先增大后减小,而且色散系数在 Λ 较小的时候,变化特别明显,从图上可以观察到, $\Lambda=2\mu\text{m}$ 时,色散曲线比其它曲线要更为平坦,在 1550nm 处,色散系数值为 108.20ps/(nm·km)。

Table 2 Dispersion coefficient with different air hole spacing at 1550nm wavelength

$\Lambda/\mu\text{m}$	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
$D/(\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$	26.03	90.03	109.32	112.33	108.20	103.62	97.60

2.2 填充方式对色散系数的影响

前面通过选择合适的结构参量,在通信波长 1550nm 处,获得色散平坦曲线。通过文献可知:通过优化结构参量都可以得到良好的平坦性,但色散系数的值仍然偏大,如 WU 等人获得的色散系数值大约为 80ps/(nm·km);GONG 等人获得的色散系数值为 350ps/(nm·km);ZHAO 获得的结果大约为 60ps/(nm·km)以及仿真中所获得的 108.20ps/(nm·km)。这些数据说明仅仅通过调整结构参量来降低色散还是有限的,因此为了降低色散系数值,可以在包层空气孔中填充材料来实现^[19-21]。填充材料选用的是液态 CO₂、普通酒精和质量分数为 0.8 的糖溶液,它们的折射率分别为 1.2,1.36 以及 1.49。本文中主要讨论“十”字形和“口”字形两种填充方式,这两种方式如图 4 所示。

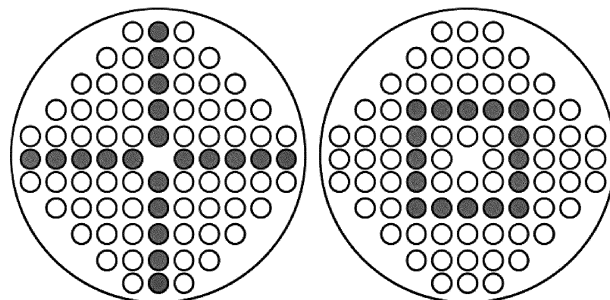


Fig. 4 Two filling methods: “十” shape and “口” shape

2.2.1 “十”字形填充对色散系数的影响 利用有限元法计算出由“十”字形填充方式获得的有效折射率随波长的变化关系以及色散曲线,计算结果如图 5 所示。

图 5a 是光子晶体光纤的场分布和有效折射率随波长的变化关系,随着波长的增加,有效折射率减小,

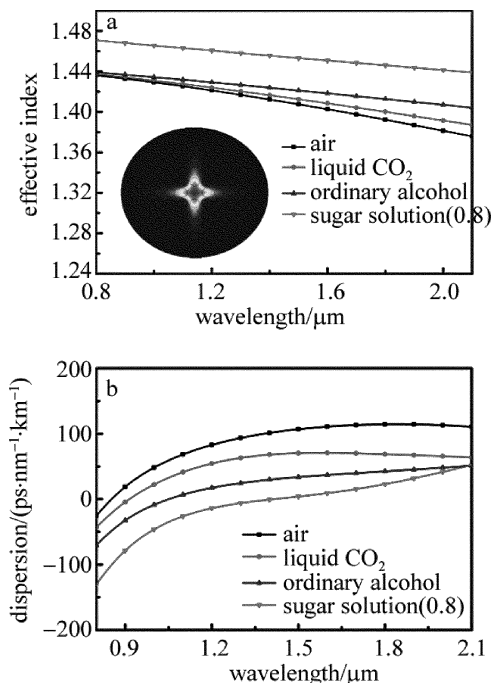


Fig. 5 Relationship between some parameters and wavelength with “十” shape filling method
a—effective refractive index b—dispersion coefficient

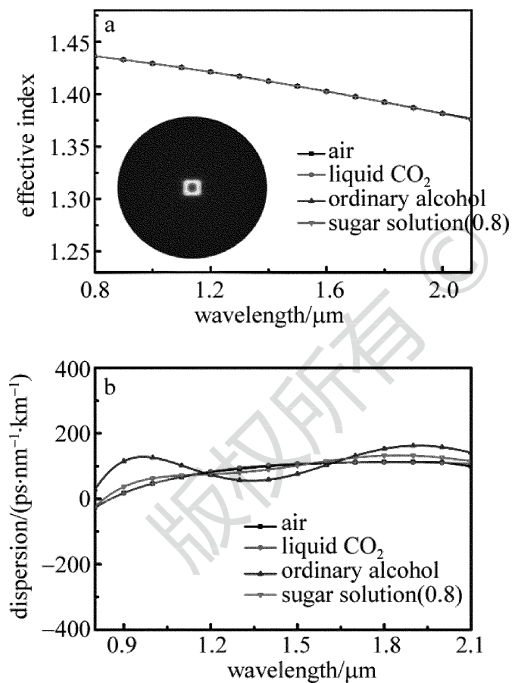


Fig. 6 Relationship between some parameters and wavelength with “口” shape filling method
a—effective refractive index b—dispersion coefficient

当以“十”字形填充不同材料时,光子晶体光纤整体的有效折射率随着材料折射率增大而变大,而当填充物是质量分数为 0.8 的糖溶液,即材料折射率为 1.49 时,光子晶体光纤的有效折射率整体上移。图 5b 是当波长取值在 $0.8\mu\text{m} \sim 2.1\mu\text{m}$ 范围内,可以获得色散平坦较好的曲线,根据曲线所示,当填充液体 CO_2 和普通酒精时,色散平坦特性依旧优良,且填充普通酒精

时,其色散值更小,拟合出来的结果为 $20.39\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,色散变化明显,较之调整结构获得的结果要优化得多,色散系数减小到接近普通单模光纤 G. 652 在波长 1550nm 处的色散值,更加符合光纤色散在应用窗口内的要求。

2.2.2 “口”字形填充对色散系数的影响 计算步骤和前面一样,通过仿真计算出有效折射率随波长的变化关系和色散曲线,仿真结果如图 6 所示。

图 6a 是以“口”字形填充不同材料后获得的基本模场图和有效折射率与波长的关系图。从图中获得的有效折射率随波长变化关系就不再那么明显,4 条曲线几乎重叠,有效折射率随波长的增加而减小。在图 6b 中,波长范围为 $0.8\mu\text{m} \sim 2.1\mu\text{m}$,填充液体 CO_2 和填充空气的结果差不多,两条曲线几乎重合,当填充其他两种材料时,色散系数曲线变得不太稳定,开始波动,且填充普通酒精时,波动最为明显。因此,“口”字形填充所获得的结果不能得到减小色散的理想效果,反而使得色散平坦性变差,远远不如“十”字形填充后的结果。

3 结论

为了获得较好的色散平坦光子晶体光纤,微调四方晶格获得一种非正八边形的结构,基于有限元法,利用结构参量、两种不同的填充方式以及 3 种不同的填充材料,仿真计算获得色散特性曲线。先通过改变空气孔直径 d 和孔间距 Λ 得到色散曲线最为平坦的结构参量,即研究的波长范围在 $0.8\mu\text{m} \sim 2.1\mu\text{m}$ 之间, $\Lambda = 2\mu\text{m}, d = 1.6\mu\text{m}$ 时,获得的色散曲线最为平坦,此时在通信波长 1550nm 处的色散系数值为 $108.20\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。由于色散系数值偏大,所以通过填充液体材料来减小色散值,文中采用“十”字形和“口”字形两种填充方式,仿真结果发现:“口”字形填充的色散平坦效果达不到预期,而“十”字形填充液体材料时,当波长取值在 $0.8\mu\text{m} \sim 2.1\mu\text{m}$ 范围内,填充液态 CO_2 和普通酒精都能获得比填充空气时更好的色散平坦特性,特别是在填充普通酒精时,不仅色散曲线保持着良好的平坦性,而且在波长 1550nm 处的色散系数更低,其值为 $20.39\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$,和 G. 652 单模光纤在 1550nm 处的色散系数值接近,符合光纤色散在应用窗口内的要求。本文中的结果对实际设计该种类型的光子晶体光纤具有指导作用。

参 考 文 献

[1] KNIGHT J, BIRKS T, RUSSELL P S J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. Optics Letters, 1996, 21(19): 1547-1549.

- [2] LI X Y, XU Z L, LING W W, *et al.* Numerical simulation and analysis of photonic crystal fiber with high nonlinearity and flattened chromatic dispersion [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5): 0505003(in Chinese).
- [3] YU X L, ZHANG Z B, QU Y, *et al.* Research of long period bending photonic crystal fiber grating sensors [J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 571-575(in Chinese).
- [4] ZHEN H L. Polarization filters based on high birefringence photonic crystal fiber filled with Au [J]. Laser Technology, 2016, 40(1): 1-4 (in Chinese).
- [5] YANG J, LIU M, ZHU M, *et al.* Three-core photonic crystal fiber with zero intermodal dispersion [J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 528-532(in Chinese).
- [6] LI J, GU Y H, CAI X B. Dispersion analysis of photonic crystal fiber with varying air hole [J]. Optical Communication Technology, 2010, 4(2): 30-32(in Chinese).
- [7] WU J Q, XUE W R, ZHOU G Sh. Dispersion property analysis of square lattice varying microstructured optical fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(2): 174-178(in Chinese).
- [8] ZHAO J D, ZHANG W M, XUE W R. Dispersion properties of photonic crystal fiber with composite square air hole lattice [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2009, 15(1): 53-57(in Chinese).
- [9] GONG T X, FENG L, HU J J, *et al.* Photonic crystal fibers with high and flattened dispersion [J]. Optics Communications, 2011, 284(18): 4176-4179.
- [10] 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(5): 123-127.
- [11] KONG X M, LI X L, JIANG X F, *et al.* Dual core photonic crystal fiber with large negative dispersion [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2015, 21(4): 380-384(in Chinese).
- [12] HOU Y, ZHOU G Y, HOU L T, *et al.* Dispersion characteristics of octagonal double cladding photonic crystal fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(4): 1068-1072(in Chinese).
- [13] LI Sh G, LIU X D, HOU L T. The study of waveguide mode and dispersion property in photonic crystal fibers [J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(11): 2811-2817(in Chinese).
- [14] ALBERT F, ENRIQUE S, JUAN J M, *et al.* Vector description of higher order modes in photonic crystal fibers [J]. Journal of the Optical Society of America, 2000, 17(7): 1333-1340.
- [15] BROENG J, MOGILEVSTE V D, BARKOU S E. Photonic crystal fibers: a new class of optical waveguides [J]. Optical Fiber Technology, 1999, 5(3): 305-330.
- [16] KOSHIBA M. Full-vector analysis of photonic crystal fibers using finite element method [J]. IEICE Transactions on Electronics, 2002, 85(4): 881-888.
- [17] SAGHAEI H, MORAVVEI-FARSHI M K, EBNALI-HEIDARI M, *et al.* Ultra-wide mid-Infrared supercontinuum generation in $As_{40}Se_{60}$ chalcogenide fibers: solid core PCF versus SIF [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(2): 1-8.
- [18] HALIME D I, SEDAT O. Birefringence, dispersion and loss properties for PCFs with rectangular air-holes [J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 67(6): 354-358.
- [19] GUO Y, RUAN Sh Ch. Analysis on the dispersion properties of photonic crystal fiber with an air-hole defect core [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2010, 27(4): 386-390 (in Chinese).
- [20] DIAZ-SORIANO A, ORTIZ-MORA A, DENGRA A. A new low-dispersion and large-effective-area PCF based on a fractal design [J]. Optical Fiber Technology, 2015, 21(1): 69-72.
- [21] DAI N L, LI Y, PENG J G, *et al.* Development of dispersion-flattened photonic crystal fibers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(1): 010602(in Chinese).