

色散平坦高非线性超低损耗双折射 PCF 有限元仿真

李晓龙¹, 张世宏^{1*}, 刘先国²

(1. 安徽工业大学 材料科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032; 2. 杭州电子科技大学 创新材料研究院, 杭州 310012)

摘要: 光子晶体光纤(PCF)的内部结构及材料对传输特性具有重要影响, 构建 PCF 的仿真模型能够快速有效地优化光纤的设计和缩短研制周期。采用全矢量有限元数值仿真方法, 研究了结构参数对 PCF 的模式特征、双折射、非线性、有效面积、限制损耗和色散等特性指标的调控机制, 并通过在纤芯中心位置引入轴对称分布椭圆形空气孔的方式, 实现了在 1.55 μm 波长处获得了高达 1.39×10^{-2} 的双折射、 10^{-7} 量级的限制损耗和高达 $37.98 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 、 $44.39 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的 HE_{11}^x 、 HE_{11}^y 非线性系数, 以及在 0.8~2.0 μm 波段获得了色散值为 $-1.3 \pm 0.3 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 的近零色散平坦。

关键词: 光子晶体光纤; 色散平坦; 限制损耗; 高非线性

中图分类号: TN818 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)01-0058-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.01.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Finite element simulation of high nonlinear ultra-low loss birefringent PCF with flat dispersion

LI Xiaolong¹, ZHANG Shihong^{1*}, LIU Xianguo²

(1. School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan Anhui 243032, China;

2. Institute of Innovative Materials, Hangzhou University of Electronic Science and Technology, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The internal structure and materials of photonic crystal fibers (PCF) have an important influence on the transmission characteristics. The simulation model of PCF can optimize the design of optical fibers quickly and effectively and shorten the development cycle. Using full vector finite element numerical simulation method, the control mechanism of structural parameters on PCF's mode characteristics, birefringence, nonlinearity, effective area, limiting loss and dispersion is studied. By adding and optimizing axisymmetric distributed elliptical air holes, birefringence of 1.39×10^{-2} , limit losses of 10^{-7} magnitude, nonlinearity of $37.98 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ (in HE_{11}^x), $44.39 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ (in HE_{11}^y) at 1.55 μm is obtained. The a dispersion value of $-1.3 \pm 0.3 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ is achieved within the wavelength region 0.8~2.0 μm with flat and approximately zero dispersion.

Key words: photonic crystal fiber; flat dispersion; limiting loss; high nonlinearity

0 引言

全内反射型光子晶体光纤(TIR-PCF)^[1], 由于其结构设计的灵活性和光学特征的独特性, 具有无限单模

传输、大的模式面积、低限制损耗、高双折射、高非线性和色散可调等优异特性, 受到广泛的关注和研究。但是, 目前由于非线性和有效模面积的相互制约关系, PCF 往往无法同时兼容多种优良的传输性能。目前, 国内外学者做了大量的仿真研究, 如合肥工业大学的杨天宇等人^[2]通过数值分析不仅达到数量级为 10^{-2} 的高双折射, 在近红外波段内的 1000~1550 nm 之间还具有良好的负平坦色散特性, 可用于色散补偿; 北京航空航天大学的荣耕辉等人^[3]设计一种新型结构 PCF 数学模型, 在 1550 nm 处可以获得高达 7.66×10^{-3} 的双折射和低至 12 $\text{ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 的色散值, 同时在 800~1600 nm 波长范围有着极低的限制损耗, 但是性能多是单一或者互相无法兼容。因此, 利用全矢量有

收稿日期: 2019-04-17。

基金项目: 安徽省自然科学基金 (No.1708085ME124) 资助; 安徽省重点研究和开发计划 (国际合作专项 No.1804b06020370) 资助; 安徽省高等学校省级优秀青年人才基金 (No.gxyqZD2017037) 资助。

作者简介: 李晓龙 (1994-), 男, 河南洛阳人, 硕士, 现就读于安徽工业大学材料科学与工程专业, 研究方向是光学领域器件仿真、高频电磁理论计算和微波吸收材料, 现已发表 SCI 论文 7 篇, EI 会议论文 1 篇, 国内核心期刊 1 篇和国内发明专利 1 篇。

* 通信作者: 张世宏 (E-mail: zsh13637101221@163.com)。



限元法对 PCF 基模^[4]分布进行仿真不仅可以建立上述综合指标的评价体系, 还可以针对色散平坦特性^[5]、高非线性^[6]、低限制损耗^[7]和高双折射^[8]等指标(这些指标是 PCF 设计中的焦点问题)进行优化设计研究。

本文采用全矢量有限元仿真设计一种色散平坦的高非线性超低损耗双折射 PCF, 引入对称性的双椭圆空气孔^[9], 研究 PCF 的基模电场、双折射特性、非线性特性、有效面积特性、限制损耗和色散特性。

1 设计思想与基本理论

1.1 设计思想

为实现光全内反射效应和提高 PCF 综合光学特性, 本文研究设计的 PCF 采用六边形阵列结构, 利用包层周期性排列的空气孔和中间区域缺失的空气孔, 实现光波的全内反射机制; 同时在中间区域采用 2 个对称的小椭圆形空气孔, 来实现对光纤基模的可控调节。除椭圆形空气孔外, 周围的圆形空气孔均是形状大小相同、间距长度相等的阵列结构, 并呈现轴对称结构分布, 这样设计降低了后续 PCF 制备的难度, PCF 示意图如图 1 所示。

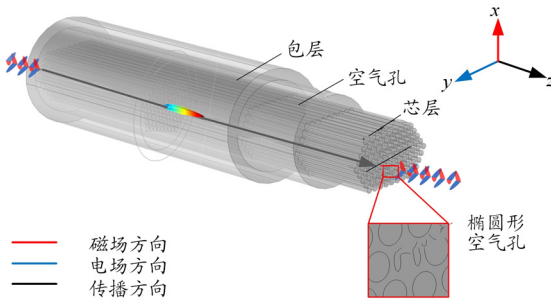


图 1 全内反射型 PCF 示意图

1.2 基本理论

本文采用全矢量有限元分析法, 对 PCF 进行仿真模拟计算。

首先利用有限元模式分析方法得到 PCF 的有效折射率。PCF 模式分析的有限元方法是基于 Maxwell 电磁波动方程, 采用电磁波频域物理场, 用于计算给定频率的传播常数或波数以及传播振型, 适用于光纤截面分析。PCF 截面的有效折射率 n_{eff} 采用复数表达形式, 实部 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 代表色散能力, 虚部 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 代表损耗能力。同时, 由于 PCF 结构的不对称性, 致使光纤在 2 个基模方向上传播常数发生改变, 实现双折射特性, 也叫保偏特性, 通常用 B 来表示 PCF 的双折射特性:

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

其中, $\text{Re}(n_{\text{eff}}^x)$ 和 $\text{Re}(n_{\text{eff}}^y)$ 分别为 PCF 关于 x 轴和 y 轴偏振模式所对应的有效折射率实部, 其 2 种偏振态模式的偏振拍长 L_B 为:

$$L_B = \lambda / B \quad (2)$$

其次, PCF 的有效模式面积 A_{eff} 定义为:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\iint |E(x, y)|^2 dx dy \right)^2}{\iint |E(x, y)|^4 dx dy} \quad (3)$$

其中, $E(x, y)$ 是二维平面内的电场分布。根据 A_{eff} 可以求得 PCF 的非线性系数, 这是衡量非线性效应的重要指标。非线性系数用 γ 表示:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{\text{eff}}} \quad (4)$$

其中, c 是光速; ω_0 是角频率; λ 是波长; n_2 是非线性折射率, 在本文取值为 $n_2 = 3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ 。

光纤的限制损耗由有效折射率的虚部求得, 用 L 来表示:

$$L = \left| \frac{40\pi}{\lambda \ln 10} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \right| \quad (5)$$

最后, 本文对 PCF 的色散问题进行分析。PCF 的色散主要由模式色散、材料色散和波导色散 3 种色散构成, 本文的研究主要涉及材料色散和波导色散:

$$D(\lambda) = D_m(\lambda) + D_w(\lambda) \quad (6)$$

其中, $D_w(\lambda)$ 为波导色散, 材料色散 $D_m(\lambda)$ 为:

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{core}}}{d\lambda^2} \quad (7)$$

其中, n_{core} 是折射率关于波长依赖的函数关系。

$$n_{\text{core}} = \sqrt{2.1205655 - 0.0089437249\lambda^2 + 0.0090242393\lambda^{-2} + 0.00013786285\lambda^{-4} - 8.2750398 \times 10^{-7}\lambda^{-6} + 2.6740448 \times 10^{-8}\lambda^{-8}} \quad (8)$$

波导色散 $D_w(\lambda)$ 为:

$$D_w(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 [\text{Re}(n_{\text{eff}})]}{d\lambda^2} \quad (9)$$

2 仿真结果分析

本文整体采用大小直径 d_1 相等的空气孔呈六边形按间距 d_2 阵列排布在半径 r 的光纤截面上, 在中心区域引入 2 个间距为 Λ 的椭圆形孔调节纤芯有效模式面积。考虑波导色散和材料色散的综合影响, 外侧

用厚度为 t 的完美匹配层 (PML) 和散射边界条件 (SBC), 实现最理想的仿真环境, 几何参数如表 1 所示 (n_1 、 n_2 分别为空气、包层折射率), 模型结构如图 2 所示。

表 1 PCF 仿真模型结构几何参数和材料参数

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$r(\mu\text{m})$	12	$\Lambda(\mu\text{m})$	0.4~0.8	n_1	1
$d_1(\mu\text{m})$	1.44	$t(\mu\text{m})$	3	n_2	1.4592~1.445
$d_2(\mu\text{m})$	3.6				

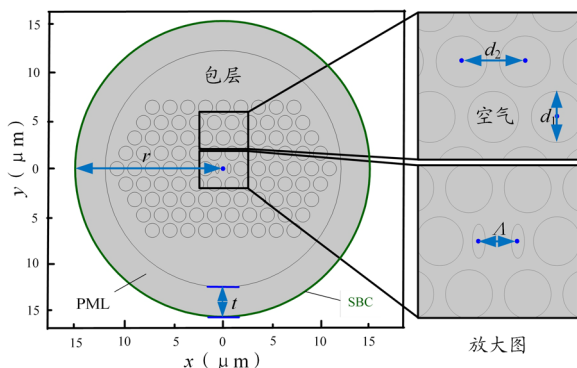


图 2 PCF 截面几何结构图

2.1 基模分布

图 3 分别为 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处光纤基模 x 方向和 y 方向偏振的有效模态 HE_{11}^x 、 HE_{11}^y 分布以及高度分布图。从图中明显看出光纤能量 90% 集中于中心区域, 呈椭圆形基模分布, 箭头表示基模偏振的方向。并且由于在中心区域引入 2 个对称的椭圆形孔, 呈 x 轴放置, 导

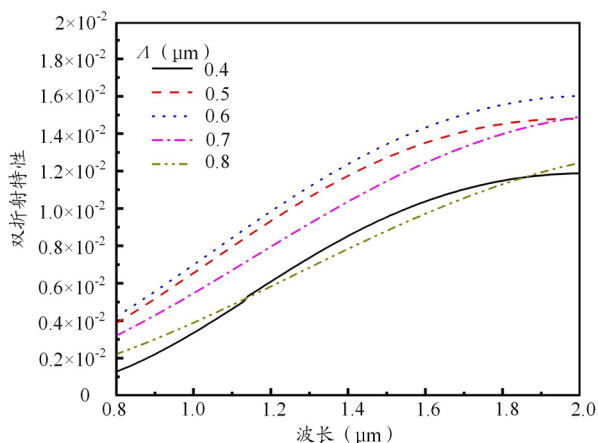


图 4 不同椭圆孔间距 Λ 下双折射特性 B 随波长的变化图

致其包层的不对称, 从而引起其有效折射率的不同, 也就形成了高双折射效应。同时, 空气孔放置的方向和偏振方向的不同, 致使 x 、 y 方向有效模面积的差异, 进而影响光纤的非线性系数和波导色散等指标性能。

2.2 双折射特性

不同椭圆孔距下双折射特性 B 随波长的变化散点分布如图 4 所示。可以看出, 双折射特性 B 基本处于 10^{-3} ~ 10^{-2} 的数量级, 比传统保偏光纤高出 2 个数量级, 更符合光纤应用的需求。在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处, 不同孔距下双折射分别为 9.978×10^{-3} 、 1.3214×10^{-2} 、 1.3897×10^{-2} 、 1.1962×10^{-2} 和 9.268×10^{-3} , 其在 $0.5 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 间距下可以到达 10^{-2} 数量级。主要原因在于中心区域椭圆孔的限制和包层几何的不对称性, 使得基模偏振方向的传播常数改变, 从而产生双折射特性。同时, 根据双折射特性 B 可以得到光纤的拍长 L_B , 与双折射特性 B 变化

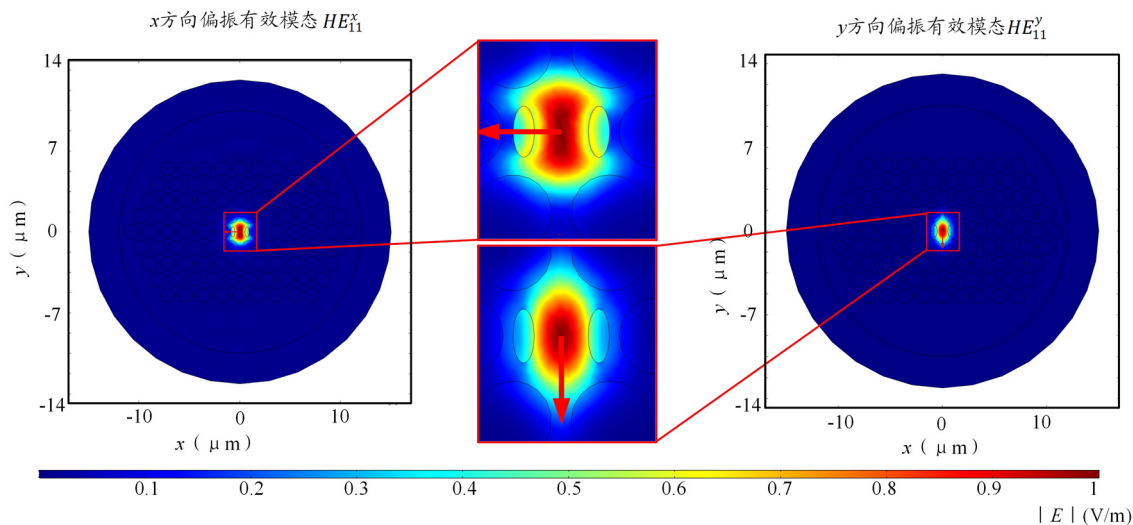
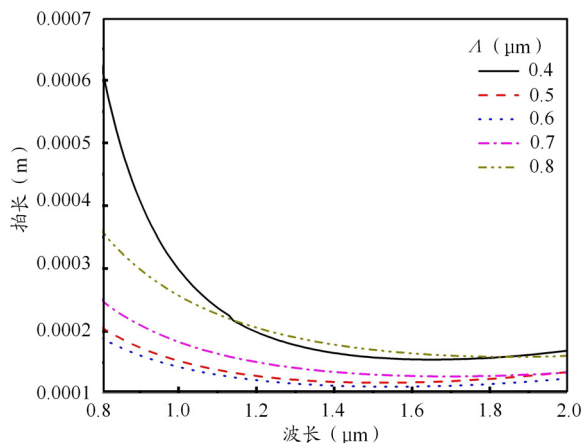


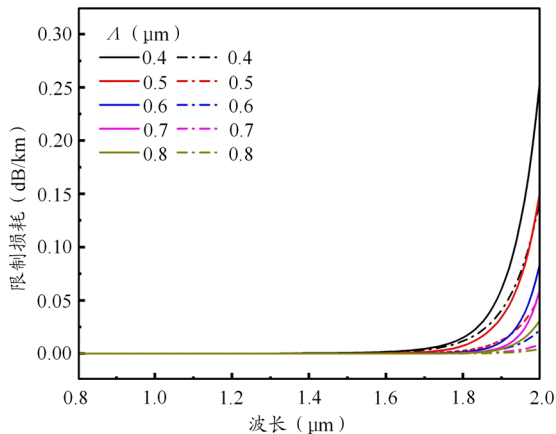
图 3 $1.55 \mu\text{m}$ 处基模分布图

图5 不同椭圆孔距 Λ 下拍长 L_B 随波长的变化图

趋势恰好相反,其关于波长的依赖关系如图5所示。可以看出,在1.0~2.0 μm 波段,拍长相对较小且趋于平缓,达到0.0001 m。

2.3 限制损耗

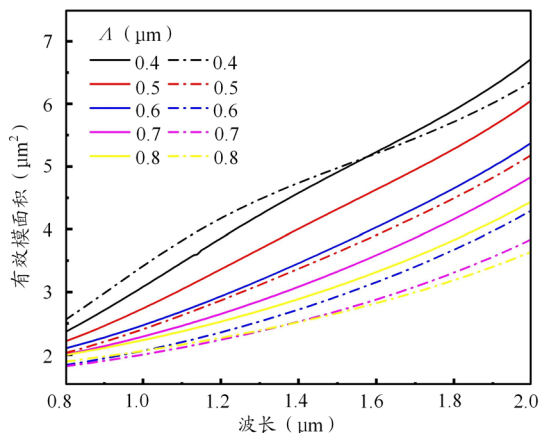
本文设计 PCF 的限制损耗随波长的变化曲线如图6所示。可以看出,在0.8~1.7 μm 波长段内,限制损耗基本稳定在 10^{-6} 数量级以下,保持极低的损耗性能;超过1.7 μm 以后限制损耗明显增加,主要原因在于随着波长的增大,PCF 的特殊结构对光的束缚变弱,限制损耗随之加大。椭圆孔间距为0.8 μm 的 PCF 在1.55 μm 波长处 HE_{11}^x 、 HE_{11}^y 的限制损耗分别为 -5.45×10^{-7} dB/km、 -3.78×10^{-7} dB/km,比其它保偏光纤损耗性能明显更优,是该 PCF 设计的一大特色。

图6 不同椭圆孔距 Λ 下限制损耗 L 随波长的变化图

(实线、虚线分别表示 HE_{11}^x 、 HE_{11}^y 模式)

2.4 有效模面积特性

有效模面积关于波长的依赖关系如图7所示。有效模面积总体呈现随波长增大而增大的趋势,且在同

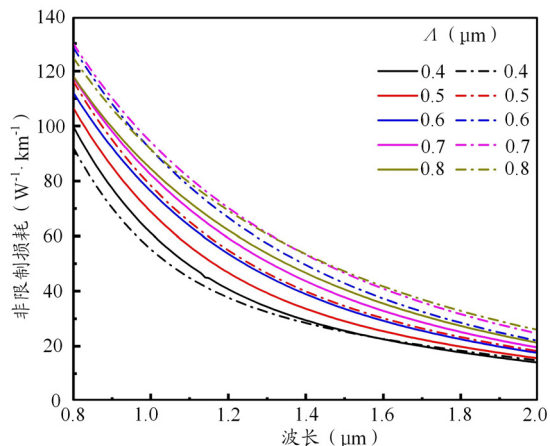
图7 不同椭圆孔间距 Λ 下有效模面积 A_{eff} 随波长的变化图

(实线、虚线分别表示 HE_{11}^x 、 HE_{11}^y 模式)

一波长处,有效模面积随着椭圆孔间距的增大而减少。在波长为1.55 μm 、椭圆孔间距0.8 μm 处,有效模面积低至2.73 μm^2 ,如此小的有效模面积,为 PCF 的高非线性和低的限制损耗奠定了良好的基础。之所以产生这样的有效模面积,主要原因在于光纤结构的设计,也就是引入轴对称椭圆形空气孔的缘故。由于空气孔的存在,限制了原有模式传播的有效截面积,同时抑制有效模式的模泄漏,实现了 PCF 有效模面积的可控调制。这对于未来光纤制备、传输实际应用以及光纤质量检测具有重大意义。

2.5 非线性特性

不同椭圆孔间距的 PCF 非线性系数随波长的变化曲线如图8所示。在同一波长处,非线性系数 γ 大致随着椭圆孔间距的增大而增大。在1.55 μm 波长处、孔间距为0.8 μm 时, HE_{11}^x 、 HE_{11}^y 的非线性系数 γ 分别高达 $37.98 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 、 $44.39 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。原因在于非线性系

图8 不同椭圆孔间距 Λ 下非线性系数 γ 随波长的变化图

(实线、虚线分别表示 HE_{11}^x 、 HE_{11}^y 模式)

数与有效模面积呈反比,随着波长的增大,非线性系数显著减少。同时,椭圆孔间距的增大,由于光波全内反射和部分能量的泄漏,在同一波长处总体上呈现有效模面积减小、非线性系数增大的趋势,这将在未来非线性应用通信行业上具有更高的市场价值和应用前景。

2.6 色散特性

PCF 色散变化曲线如图 9 所示。这种色散变化是波导色散和材料色散的综合作用。可以看出,不同孔间距对光纤色散影响较大: $0.5 \mu\text{m}$ 间距的 HE_{11}^x 的色散在零附近波动; 在 $0.8 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波长范围达到色散平坦,色散值为 $-1.3 \pm 0.3 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$; 全部孔间距的 HE_{11}^x 、 HE_{11}^y 在高波长段均满足高负色散(尤其在 $0.4 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 孔间距范围内), $1.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波段达到色散平坦, $1.55 \mu\text{m}$ 波长色散最高达到 $-187.34 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。之所以产生这样的独特色散特性在于光纤的独特结构,即双椭圆空气孔的设计和六边形阵列的周期性排布,随着间距 Λ 的减少,有效空间被压缩,光波集中在

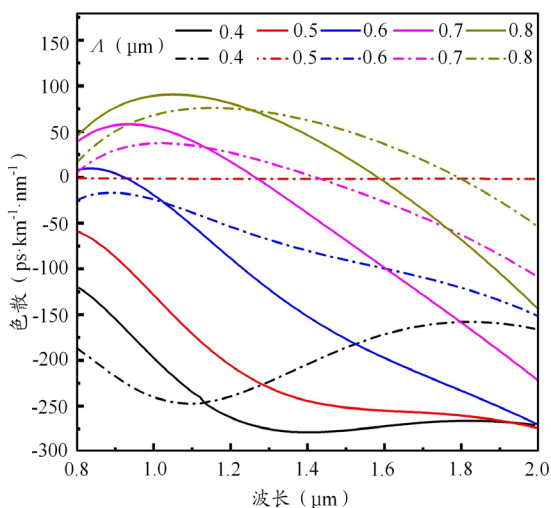


图9 不同椭圆孔距 Λ 下色散 D 随波长的变化图
(实线、虚线分别表示 HE_{11}^x 、 HE_{11}^y 模式)

更小的区域传输,色散相对更大。凭借这种特殊的色散特性,该光纤在超连续谱的产生和孤子脉冲的产生等非线性光学方面有广泛的应用价值。

3 结束语

本文采用全矢量有限元数值仿真,设计了一种色散平坦的高非线性超低损耗双折射 PCF, 通过设置椭圆形空气孔间距,实现了光纤在综合性能指标方面的良好性能,建立了一套准确、高效且具备指导意义的有限元仿真模型及 PCF 性能评价体系。本研究所采用的研究方法和建立的 PCF 有限元模型的具有极高的研究理论价值和广泛的应用价值,在光纤通信、光纤传感和功能型光纤器件等应用领域有着重要的意义。

参考文献:

- [1] FINI J M, NICHOLSON J W, MANGAN B, et al. Polarization maintaining single-mode low-loss hollow-core fibres [J]. Nature Communications, 2014(5): 5085–5085.
- [2] 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 PCF[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(3): 350–354.
- [3] 谷苒志, 励强华. 一种高双折射、低损耗的新型 PCF[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 91–96.
- [4] 曾春香, 廖昆, 廖健飞. 椭圆空气孔缺陷 PCF 基模的特性分析[J]. 赣南师范大学学报, 2018, 39(3): 36–40.
- [5] 陈纯. 高双折射 PCF 特性及应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [6] 文帅川. PCF 高双折射特性及应用研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.
- [7] 雷刚. PCF 双折射度及限制损耗特性研究 [J]. 现代工业经济和信信息化, 2017(22): 18–21.
- [8] HAO R, LI Z, SUN G, et al. Photonic crystal fiber with high birefringence and low confinement loss [J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(21): 4880–4883.
- [9] LIAO J, SUN J. High birefringent rectangular-lattice photonic crystal fibers with low confinement loss employing different sizes of elliptical air holes in the cladding and the core [J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(6): 457–461.

欢迎订阅, 欢迎投稿,
欢迎刊登广告!