

高双折射类椭圆纤芯光子晶体光纤设计与分析

柳淘¹, 郜洋¹, 郭慧杰¹, 张克非^{2*}

(1. 西南科技大学 理学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 为了改善传统光纤灵敏度低、损耗高和非线性效应不易控制的问题, 设计一种新型高双折射、低损耗和高非线性的类椭圆纤芯光子晶体光纤(PCF)结构。基于全矢量有限元法, 通过 COMSOL 分析研究了光纤端面的空气孔直径和位置对双折射、限制损耗、模场特性和非线性等特性的影响。仿真结果表明: 所设计的 PCF 结构在波长为 $1.550\ \mu\text{m}$ 处的双折射率达 1.918×10^{-3} , x 和 y 极化偏振方向的限制损耗分别为 $L_{ex}=1.6 \times 10^{-3}\ \text{dB/km}$ 和 $L_{ey}=8.0 \times 10^{-4}\ \text{dB/km}$, 非线性系数达到 $9.4\ \text{km}^{-1}\text{W}^{-1}$, 且满足单模传输, 实现了高质量、高精度的光信号传输与传感。

关键词: 光子晶体光纤; 高双折射; 全矢量有限元法; 限制性损耗

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)04-0048-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.04.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and analysis of high birefringence elliptical core photonic crystal fiber

LIU Tao¹, GAO Yang¹, GUO Huijie¹, ZHANG Kefei^{2*}

(1. School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China;

2. School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China)

Abstract: In order to solve the problems of low sensitivity, high loss and difficult control of nonlinear effect of traditional fiber, a novel elliptical core like photonic crystal fiber(PCF) structure with high birefringence, low loss and high nonlinearity is designed. Based on the full vector finite element method, the effects of the size and position of the air hole on the birefringence, confinement loss, mode field characteristics and nonlinearity of the fiber end face are analyzed by COMSOL. The simulation results show that the birefringence index of the PCF is 1.918×10^{-3} at the wavelength of $1.550\ \mu\text{m}$, the limiting loss of x and y polarization direction is $L_{ex}=1.6 \times 10^{-3}\ \text{dB/km}$ and $L_{ey}=8.0 \times 10^{-4}\ \text{dB/km}$ respectively, the nonlinear coefficient is $9.4\ \text{km}^{-1}\text{W}^{-1}$, and the single-mode transmission is satisfied. The high-quality and high-precision optical signal transmission and sensing are realized.

Key words: photonic crystal fiber; high birefringence; full vector finite element method; restrictive loss

0 引言

光子晶体光纤(PCF)结构设计灵活, 导光机制奇特, 具有高双折射、高非线性、低损耗和大模场面积等

收稿日期: 2020-09-01。

基金项目: 西南科技大学校级重点教育教学改革与研究项目(19xznzd21)资助; 四川省高等教育人才培养质量和教学改革基金(JG2018-507)资助; 西南科技大学素质类教改专项(19szjg03)资助; 四川省大学生创新创业训练基金(S202010619067)资助。

作者简介: 柳淘(2000—), 男, 四川宜宾人, 西南科技大学理学院光电信息科学与工程专业本科在读, 主要研究方向为光子晶体光纤通信及传感, 并针对光子晶体光纤纤芯结构进行设计, 实现双折射、限制损耗等光学特性的优化。

* 通信作者: 张克非(E-mail: zhangkefeijike@163.com)。



优点, 成为目前国内外传感领域的研究热点^[1-2]。PCF 的空气孔和背景材料间具有一定的折射率差, 通过改变空气孔形状、大小和位置, 可形成双折射效应。若光纤中 2 个互相垂直的偏振模式的有效折射率差值的绝对值大于 1×10^{-4} , 则这 2 种偏振模式是彼此简并且可分离的, 可以实现低串扰、可分辨的传输要求。基于此, 高双折射的 PCF 在保偏特性和传输传感等领域被广泛应用^[3]。

2015 年, T. Yang 等人^[4]对 PCF 的纤芯和包层进行设计并引入非对称结构实现高双折射, 在类熊猫型 PCF 的纤芯区域设计 3 个非对称的小空气孔, 实现了波长在 $1 \sim 2\ \mu\text{m}$ 范围内具有 10^{-2} 量级的高双折射。2016 年, Jie Hart 等人^[5]提出了一种碲酸盐玻璃复合芯

PCF, 在 $1.550\ \mu\text{m}$ 波长处得到了 0.119 的高双折射率, 非线性系数高达 $3.42\ \text{W}^{-1}/\text{m}$ 。2018 年, Chen y 等人^[6]提出了将空气孔以非周期性排列在包层中的光子准晶体光纤结构, 将可控的双折射引入光纤芯, 最终在 $1.550\ \mu\text{m}$ 波长处获得了 1.5×10^{-2} 的双折射率。同年, Islam M S 等人^[7]通过引入方形空气孔提出一种限制性损耗低至 $1.7 \times 10^{-9}\ \text{dB/m}$ 的 PCF, 其双折射率为 2.8×10^{-3} 。2019 年, Saha R 等人^[8]设计了一种在波长为 $1.550\ \mu\text{m}$ 处具有高双折射的 PCF, 双折射率为 2.75×10^{-2} , 负色散达 $-540.67\ \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, 但其限制性损耗仅为 $10^{-3}\ \text{dB/m}$ 量级。同年, 桂奉继等人^[9]设计了一种新型非对称结构的高双折射 PCF, 可提供 1.70×10^{-2} 的高双折射率, 且限制损耗保持在 $10^{-5}\ \text{dB/km}$ 。2020 年, 赵丽娟等人^[10]设计了一种光纤包层包含 6 个由不同形状空气孔组成的轴对称三角晶格, 并在中间沿 x 轴引入一排大小不同的椭圆空气孔的 PCF 结构, 在波长为 $1.550\ \mu\text{m}$ 处获得双折射率高达 3.618×10^{-2} 、限制性损耗仅为 $1.999 \times 10^{-14}\ \text{dB/m}$ 。同年, 张怡等人^[11]设计了一种椭圆双芯、包层为三角晶格排列的 PCF, 实验证明了在波长为 $1.550\ \mu\text{m}$ 处光纤基模的双折射率达 4.343×10^{-2} , 限制损耗低至 $8.242 \times 10^{-9}\ \text{dB/km}$ 。

综上所述, 通过灵活设计 PCF 的结构, 能够很好地体现双折射效应, 并且使其拥有更加丰富的光学特性。但光纤结构复杂和目前制造工艺难以突破, 设计光学性能优良并且结构简单的 PCF 显得尤为重要。基于全内反射型 PCF^[12](TIR-PCF), 本文设计一种具有高双折射、高非线性和低损耗的类椭圆纤芯 PCF 结构。

1 理论分析和结构设计

本文设计的 PCF 横截面如图 1(a) 所示。首先, 选择三角形晶格作为 PCF 包层结构, 去除纤芯中心部分空气孔, 增大纤芯左右对称的两侧空气孔, 并在对称上、下两侧各引入一个小空气孔, 如图 1(b) 所示; 然后, 通过破坏光纤的圆对称结构和形成低折射率包

层, 实现全内反射和高双折射。其中, 空气孔 1、2、3 的折射率都为 1, 空气孔间距为 Λ , 空气孔直径分别为 d_1 、 d_2 和 d_3 。

该 PCF 结构的背景材料是二氧化硅 (SiO_2), 其折射率由 Sellmeier 方程^[13]确定:

$$n^2 = 1 + \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - (0.0684043)^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - (0.1162414)^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - (9.896161)^2} \quad (1)$$

其中, λ 为光纤中的传输波长, 分析波长范围为 $0.85 \sim 1.75\ \mu\text{m}$, 故对应背景材料折射率为 $1.4525 \sim 1.4415$ 。

基于麦克斯韦方程组, 采用有限元法 (FEM)^[14] 通过求解计算出 x 和 y 这 2 种极化偏振方向的有效折射率, 进而计算出 PCF 的双折射、限制性损耗、有效模场和非线性等特性。

在 PCF 中, 几何不对称性、光纤外加应力等因素都会影响光纤的对称性, 会致使在光纤的两基模方向上的传播常数发生改变, 形成双折射效应^[15], 其双折射特性一般由模式双折射 B ^[16] 来表示。 B 是 PCF 两基模方向上的有效折射率之差, 公式如下:

$$B = |\text{Re}[N_{\text{eff}}(x) - N_{\text{eff}}(y)]| \quad (2)$$

其中, $N_{\text{eff}}(x)$ 和 $N_{\text{eff}}(y)$ 分别表示 x 极化偏振方向和 y 极化偏振方向的基模有效折射率。

取有效折射率的虚部, 即基模的限制损耗^[17], 为:

$$L_{\text{loss}} = \frac{20k_0}{\ln 10} \text{Im}(N_{\text{eff}}) \quad (3)$$

其中, N_{eff} 表示模式有效折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 表示自由空间波数。

在衡量光纤非线性时, 有效模场面积越小, 能量就越集中, 有效模场面积对非线性系数的大小起到决定作用。PCF 有效模场面积的公式为^[18]:

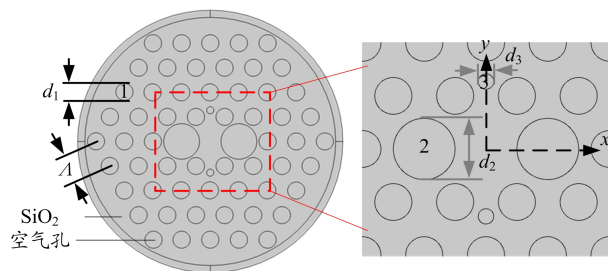
$$A_{N_{\text{eff}}} = \frac{\left(\iint |E|^2 dx dy \right)^2}{\iint |E|^4 dx dy} \quad (4)$$

其中, E 为电场强度, 积分区域是整个光纤横截端面。

非线性系数与有效模场面积成反比, 有效模场面积越大、非线性系数越小。非线性系数 γ ^[19] 的计算公式为:

$$\gamma(\omega) = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{N_{\text{eff}}}} \quad (5)$$

其中, n_2 是石英材料的非线性指数^[20] $n_2 = 2.76 \times 10^{-20}\ \text{m}^2/\text{W}$, ω 是光的频率。



(a) PCF 截面图

(b) 纤芯空气孔设计

图 1 纤芯微型孔设计方案

2 数值模拟与结果分析

本文基于全矢量有限元理论, 通过 COMSOL 和 Matlab 软件计算所设计的 PCF 的有效折射率, 分析双折射率与结构参数之间的作用关系, 研究限制损耗、模场面积等光学特性。

2.1 双折射特性分析

本文设置 $\lambda=1.550\text{ }\mu\text{m}$ 、 $\Lambda=4\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d_1=1.2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d_2=2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $d_3=0.5\text{ }\mu\text{m}$, 空气孔 3 坐标为 $(0, 1.1\times\Lambda)$, 得到模场分布和有效折射率如图 2 所示, 可以看出基模模场呈椭圆形状, 能量被包层空气孔严格地限制在纤芯中, 双折射率为 6×10^{-4} , 满足保偏传输条件。

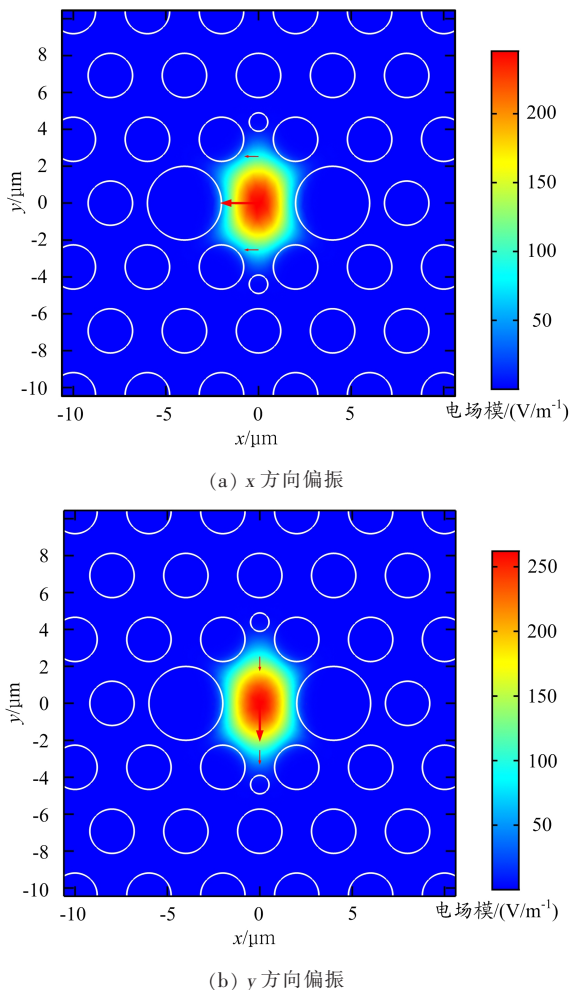


图 2 基模模场分布与有效折射率

空气孔 2 和空气孔 3 的形状大小和空间位置是影响 PCF 双折射特性的主要因素。为找到最优结构, 本文根据参数 d_2 和 d_3 的不同, 研究 3 种参数类型, 即 Type1、Type2 和 Type3。Type1 中, 设置 $\lambda=1.550\text{ }\mu\text{m}$ 、 $\Lambda=4\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d_1=1.2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $d_3=0.5\text{ }\mu\text{m}$, 空气孔 3 坐标为 $(0, 1.1\times\Lambda)$, d_2 范围为 $1.2\sim 2.6\text{ }\mu\text{m}$; Type2 中, 设置 $d_2=2.6\text{ }\mu\text{m}$, d_3 范围为 $0.4\sim 0.9\text{ }\mu\text{m}$, 其余参数不变; Type3

中, 设置 $d_2=2.6\text{ }\mu\text{m}$, $d_3=0.4\text{ }\mu\text{m}$, d_3 的坐标 y 范围为 $2.8\sim 5.2\text{ }\mu\text{m}$ 。仿真基模在波长为 $1.550\text{ }\mu\text{m}$ 时 2 个正交偏振模式的有效折射率及双折射随空气孔结构的变化关系, 结果如图 3 所示。可以看出, 该 PCF 纤芯周围的空气孔结构及空间位置对双折射率有明显影响, 且空气孔直径 d_2 影响效果显著, 空气孔直径 d_3 和坐标位置影响效果较小。原因是纤芯周围的空气孔 2 和空气孔 3 使纤芯呈椭圆型, 破坏了光纤的圆对称性结构, 从而使纤芯折射率不再呈理想对称分布, 导致正

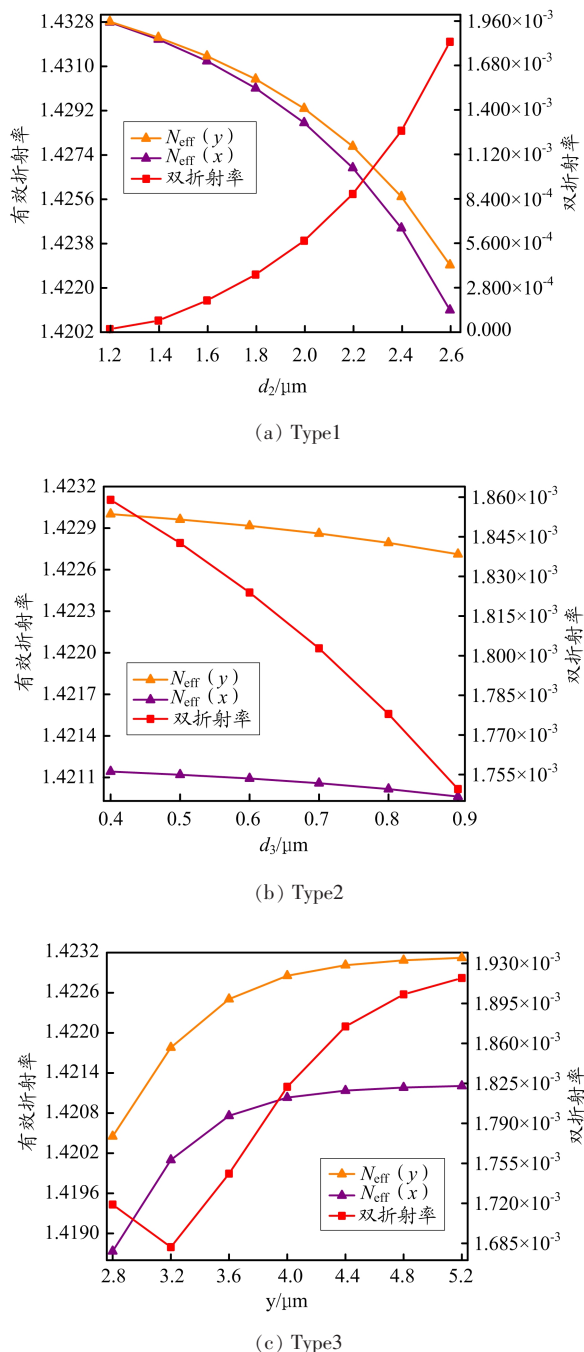


图 3 空气孔结构对正交偏振基模的有效折射率及双折射率的影响关系

交偏振极化模的传输有效折射率不同, 形成双折射现象。且 x 和 y 轴之间的不对称性受空气孔 d_2 的影响最大, 即破坏圆对称结构最为明显, 增大了结构的各向异性, 使得 2 个正交偏振极化模的有效折射率差值变化更大。因此, 本文选择 $\Lambda=4\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d_1=1.2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d_2=2.6\text{ }\mu\text{m}$ 和 $d_3=0.4\text{ }\mu\text{m}$ 、空气孔 3 坐标为 $(0, 5.2\text{ }\mu\text{m})$ 的最优结构参数, 研究该 PCF 双折射率与波长的变化关系, 结果如图 4 所示。

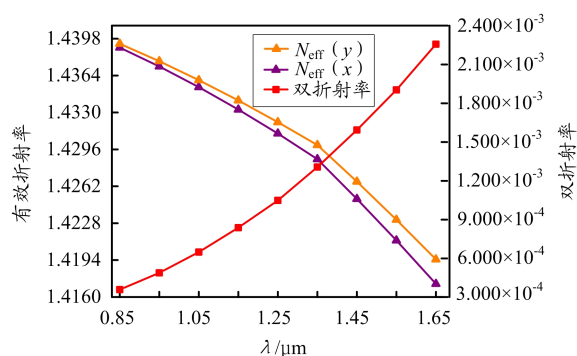


图 4 有效折射率及双折射率随波长变化关系

由图 4 可知, 基模有效折射率随波长的增大而减小, 但正交偏振模式的有效折射率差值变大, 即双折射增强。该结构在波长为 $1.550\text{ }\mu\text{m}$ 处的双折射率达到 1.918×10^{-3} 。

2.2 限制损耗特性分析

本文利用 COMSOL 软件对该 PCF 结构在 $1.550\text{ }\mu\text{m}$ 处的模场特性进行分析, PCF 模场分布图如图 5 所示。可以看出, 能量被包层空气孔良好地束缚在纤芯中, 有利于光信号的传输。

由 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的极化模式的电场分布可知, LP_{01} 模和 LP_{11} 模存在 2 个互相垂直的偏振极化模式, LP_{01} 模中 x 极化偏振方向的有效折射率为 1.4231, y 极化偏振方向的有效折射率为 1.4212, 偏振模式具有不同的折射率, 满足双折射条件。因此, 该 PCF 能够传输 2 个互相垂直的极化偏振模式, 且可以通过折射率进行区分。

为进一步分析模场传播时的损耗, 本文对 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的限制损耗进行研究, 所设计的 PCF 结构对称性主要受空气孔 2 和空气孔间距 Λ 的影响, 因此主要分析空气孔 2 和空气孔间距 Λ 与限制损耗的变化关系, 结果如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可知, 限制损耗会随着空气孔间距 Λ 和波长的增大而上升。当波长超过 $1.65\text{ }\mu\text{m}$ 后限制损耗呈指数型增长, 可使限制损耗达到 10^{-2} dB/km 量级。当空

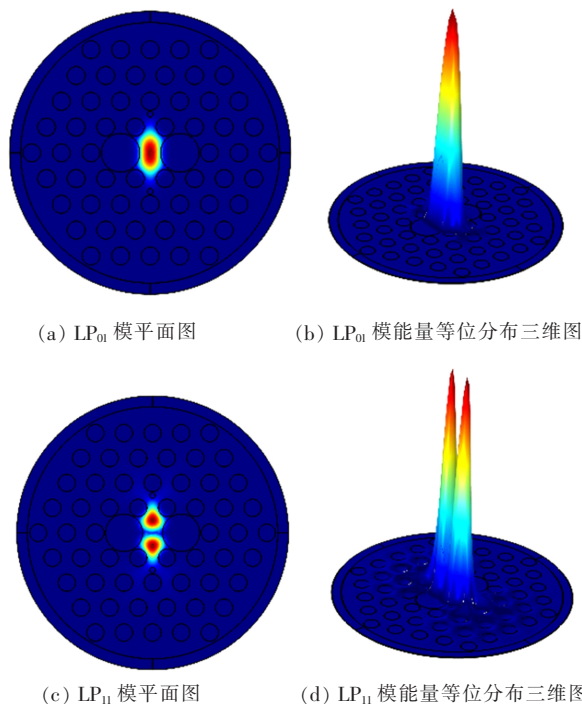


图 5 PCF 模场分布图

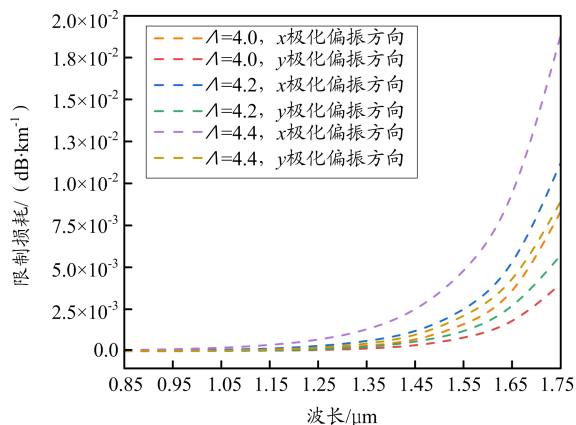


图 6 空气孔间距 Λ 与基模限制损耗同波长的关系

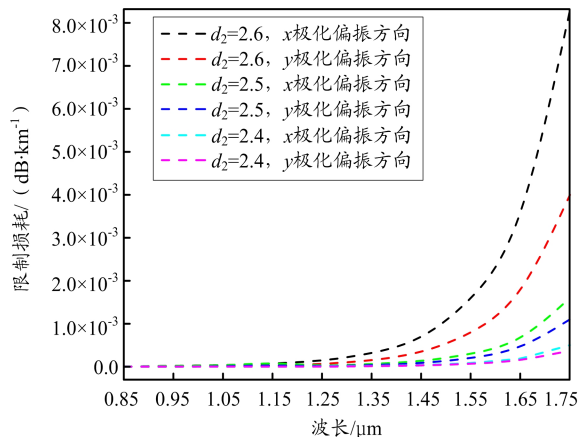


图 7 空气孔直径 d_2 与基模限制损耗同波长的关系

气孔间距 $\Lambda=4.0\ \mu\text{m}$ 、传输波长小于 $1.550\ \mu\text{m}$ 时, 限制损耗较为平坦且小于 $10^{-3}\ \text{dB/km}$ 量级, 能够满足通信使用, 且低于普通光纤 100 倍。

由图 7 可知, 限制损耗会随着空气孔直径 d_2 的减小而下降, 原因是空气孔直径 d_2 的减小增强了结构对称性, 使折射率分布更对称, 包层空气孔结构限制光在纤芯中传输的能力得到提升。对比图中 2 种极化模式的限制损耗曲线, 可以发现 x 极化偏振方向的损耗比 y 极化偏振方向的损耗高, 这是由于纤芯区域结构的不对称和纤芯 x 方向间距短造成能量在 x 极化偏振方向更易向空气孔中泄露。

当波长为 $1.550\ \mu\text{m}$ 时, 本文设计的最优结构在高双折射的条件下, 通过施加极化电场得出 x 和 y 偏振方向的限制损耗分别为 $L_{cx}=1.6\times 10^{-3}\ \text{dB/km}$ 和 $L_{cy}=8.0\times 10^{-4}\ \text{dB/km}$ 。

单模光纤适用于长距离通信, 多模光纤只适用于中短距离通信但可通过模式分复用增大传输容量。本文研究了 LP_{11} 模限制损耗与双折射率、波长的关系, 结果如图 8 所示。可以看出, LP_{11} 模的限制损耗和双折射率会随波长增大而增大, 但当波长超过 $1.35\ \mu\text{m}$ 时限制损耗达到 $10^3\ \text{dB/km}$ 量级, 将呈现模式截止特性。超高的 LP_{11} 模限制损耗表明该 PCF 结构可用于制作单模保偏光纤。

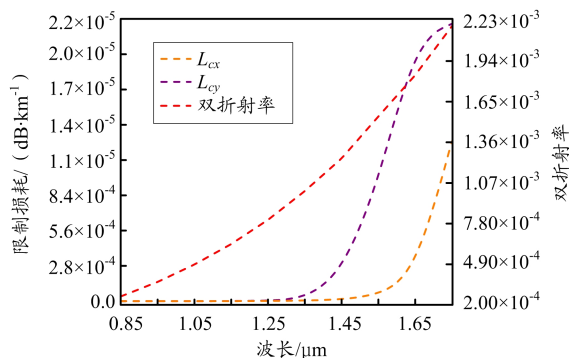


图 8 LP_{11} 模限制损耗与双折射率同波长的关系

2.3 模场面积与非线性系数特性分析

本文设计的 PCF 结构其基模的有效模场面积和非线性系数结果如图 9 和图 10 所示。

由图 9 可知, 基模模场面积随着波长的增大而增大, 原因是限制损耗随着波长的增加而增大, 造成能量泄露到空气孔包层从而使模场面积增加。由图 10 可知, 基模的非线性系数与模场面积的变化呈相反的趋势, 且波长为 $1.550\ \mu\text{m}$ 时非线性系数达到 $9.4\ \text{km}^{-1}\text{W}^{-1}$ 。

由以上仿真实验可知, PCF 纤芯周围的空气孔结

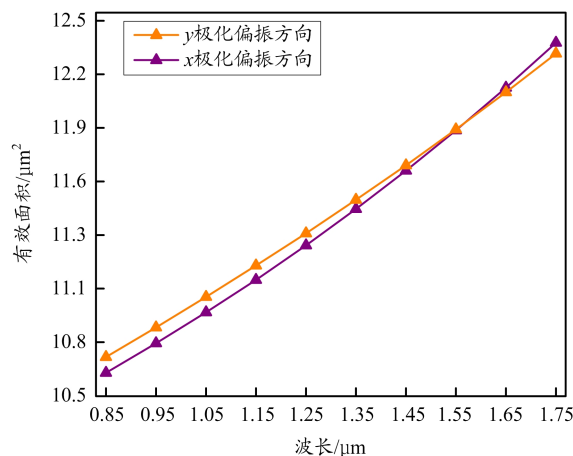


图 9 基模模场面积随波长的变化

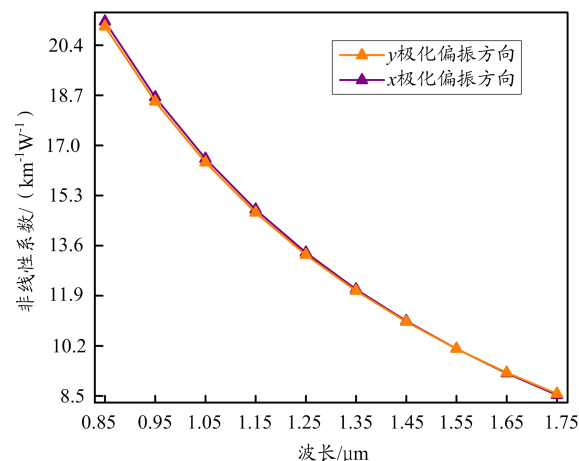


图 10 基模非线性系数随波长的变化

构及空间位置对双折射率有明显影响, 其中空气孔直径 d_2 影响效果更为显著, 空气孔直径 d_3 和坐标位置影响效果较小; 随着空气孔直径 d_2 增大, 双折射特性逐渐增强; 此外, 波长的增大, 使正交偏振模式的有效折射率差值也变大, 即双折射增强。

本文优化设计的类椭圆纤芯 PCF, 当其结构参数满足 $\Lambda=4\ \mu\text{m}$ 、 $d_1=1.2\ \mu\text{m}$ 、 $d_2=2.6\ \mu\text{m}$ 、 $d_3=0.4\ \mu\text{m}$, 空气孔 3 坐标为 $(0, 5.2\ \mu\text{m})$ 时, 在波长为 $1.550\ \mu\text{m}$ 处可实现 1.918×10^{-3} 的双折射率, x 和 y 偏振方向的限制损耗分别为 $L_{cx}=1.6\times 10^{-3}\ \text{dB/km}$ 和 $L_{cy}=8.0\times 10^{-4}\ \text{dB/km}$; 同时, 非线性系数达到 $9.4\ \text{km}^{-1}\text{W}^{-1}$, 且满足单模传输。

3 结束语

本文设计了一种高双折射、高非线性和低损耗的类椭圆形纤芯 PCF 结构, 分析了该 PCF 类椭圆纤芯的空气孔直径以及位置对双折射、限制损耗、模场面积与非线性特性的影响。实验结果表明: 纤芯周围的空气孔直径、空间位置及传输波长对有效折射率有较大

影响,增强了双折射效应。与传统光纤传感相比,本文设计的 PCF 结构可实现高质量、高精度的光信号传输与传感,其单元尺寸可达到微米级,且易于集成。

本文对 PCF 纤芯结构的灵活设计,有效提高了纤芯与包层的折射率差,能更好地限制能量在纤芯中传输,减小了纤芯区域的有效模场面积,从而提高了非线性系数。在未来的非线性应用、通信行业具有更高的市场价值和应用前景。

参考文献:

- [1] 吴蓉,张璐瑶,严清博,等.用于液体传感的高双折射新型光子晶体光纤结构[J].应用光学,2020,41(3):637-644.
- [2] 赵丽娟,梁若愚,徐志钮.光子晶体光纤的设计与应用研究综述[J/OL].半导体光电:1-8 [2020-08-05].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1092.tn.20200513.1024.002.html>.
- [3] 董常彬.新型模式干涉光纤传感器及保偏光纤特性的研究[D].北京:北京交通大学,2019.
- [4] YANG Tianyu, WANG Erlei, JIANG Haiming, et al. High birefringence photonic crystal fiber with high nonlinearity and low confinement loss[J]. Optics Express, 2015, 23(7): 8329-8337.
- [5] HAN Jie, LI Shengyang, ZHANG Tao. Design on a novel hybrid-core photonic crystal fiber with large birefringence and high nonlinearity[J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48(7): 1-11.
- [6] CHEN Yue-e, YANG Dewang, ZHANG Bingtao, et al. Study on micro-structured high-birefringence photonic crystal fiber [C]// Micro-Structured and Specialty Optical Fibres, April 22-26, 2018, Strasbourg, France. Europe: SPIE, 2018: 1-11.
- [7] ISLAM M S, SULTANA J, AHMED K, et al. A novel approach for spectroscopic chemical identification using photonic crystal fiber in the terahertz regime[J]. IEEE Sensors J, 2017, 18(2): 575-582.

柳淘,邵洋,郭慧杰,等:高双折射类椭圆纤芯光子晶体光纤设计与分析

- [8] SAHA R, HOSSAIN M M, RAHAMAN M E, et al. Design and analysis of high birefringence and nonlinearity with small confinement loss photonic crystal fiber[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2019, 12(2): 165-173.
- [9] 桂奉继.高双折射光子晶体光纤结构设计与性能优化[D].成都:电子科技大学,2019.
- [10] 赵丽娟,赵海英,徐志钮.一种高双折射低损耗大负色散光子晶体光纤的设计[J].半导体光电,2020,41(3):368-373,378.
- [11] 张怡,葛海波,吴昊,等.一种高双折射低损耗椭圆双芯光子晶体光纤的特性分析[J].光通信技术,2020,44(5):13-17.
- [12] 谈斌,陈晓伟,李世忱.全内反射光子晶体光纤[J].光电子·激光,2002,13(5):491-495.
- [13] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics[M]. 3rd. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [14] BRECHET F, PAGNOUX D, MARCOU J. Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal fibers, by the finite element method[J]. Optical fiber technology, 2000, 6(2): 181-191.
- [15] 陈纯.高双折射光子晶体光纤特性及应用研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [16] YANGT J, SHEN L F, CHAU Y F, et al. High birefringence and low loss circular air-holes photonic crystal fiber using complex unit cells in cladding[J]. Optics Communications, 2008, 281(17): 4334-4338.
- [17] NAMIHARA Y, LIU J, KOGA T, et al. Design of highly nonlinear octagonal photonic crystal fiber with near-zero flattened dispersion at 1.31 μm waveband[J]. Optical Review, 2011, 18(6): 436-440.
- [18] MORTENSEN N A. Effective area of photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2002, 10(7): 341-348.
- [19] LIMPET J, SCHREIBER T, NOLTE S, et al. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser [J]. Optics Express, 2003, 11(7): 818-823.
- [20] 石福权.基于填充光子晶体光纤传感特性的研究[D].金华:浙江师范大学,2018.