

一种高双折射低损耗椭圆双芯光子晶体光纤的特性分析

张怡,葛海波*,吴昊,安文喆

(西安邮电大学 电子工程学院,西安 710121)

摘要:为了获得高双折射低损耗的光子晶体光纤,设计了一种椭圆双芯,包层为三角晶格排列的光子晶体光纤。运用全矢量有限元法研究了光纤的空气孔间距与双折射值、非线性特性、模场面积、限制损耗及色散的关系。研究表明:在波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 处,光纤基模的双折射值达 0.04343 ; X 、 Y 偏振方向的非线性系数分别为 $48.832\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 $46.286\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$,同时, X 方向的限制损耗低至 $8.242 \times 10^{-9}\ \text{dB/km}$; 在 $0.85\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 波长范围内,色散都为正常负色散。

关键词:光子晶体光纤;有限元法;双折射;限制损耗;色散

中图分类号: TN919 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)05-0013-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.05.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Characteristic analysis of an elliptic double core photonic crystal fiber with high birefringence and low loss

ZHANG Yi, GE Haibo*, WU Hao, AN Wenzhe

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: In order to obtain photonic crystal fiber with high birefringence and low loss, an elliptic double core photonic crystal fiber with triangular lattice arrangement is designed. The relations between the air hole pitch of the fiber and birefringence, non-linearity characteristic, mode field area, confinement loss and dispersion is studied by using the full vector finite element method. The results show that the birefringence of the fundamental mode of the fiber reaches 0.04343 at the wavelength of $1.55\ \mu\text{m}$, and the nonlinear coefficients in X and Y polarization directions are $48.832\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ and $46.286\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ respectively. At the same time, the confinement loss in the X direction is as low as $8.242 \times 10^{-9}\ \text{dB/km}$. In the wavelength range of $0.85\sim 1.8\ \mu\text{m}$, the dispersion is normal negative dispersion.

Key words: photonic crystal fiber; finite element; birefringence; confinement loss; dispersion

0 引言

光子晶体光纤^[1]是在光子晶体技术的基础上发展起来的一种新型光纤,它的结构设计有很大的灵活性,与普通光纤相比,光子晶体光纤有无截止的单模传输特性^[2]、高双折射特性^[3]、高非线性^[4]、低损耗特性^[5]和色散可调特性^[6]等优势,使它在保偏光纤^[7]、光纤传感^[8]、光纤通信^[9]和色散补偿^[10]等方面有着广泛的应用。

收稿日期:2019-11-01。

基金项目:陕西省教育厅自然科学基金项目(2011JM8038)资助;陕西省重点产业链(群)项目(S2019-YF-ZDCXL-ZDLGY-0098)资助。

作者简介:张怡(1995—),女,硕士研究生,现就读于西安邮电大学电子工程学院光学工程专业,主要从事光信息传输技术的研究。就读硕士研究生期间,获得二等奖学金;参加第四届“互联网+”大学生创新创业大赛,获得校赛二等奖;参与1项西安邮电大学研究生创新基金重点项目。



*通信作者:葛海波(E-mail: gehaibo2417@aliyun.com)。

高双折射光子晶体光纤具有非常好的保偏性能^[11],在光纤传感、光纤精密器件制造及偏振分束器等^[12]方面有着良好的应用价值;低限制损耗的光纤在长距离大容量的光信号传输方面有着独特的优势。2000年,Ortigosa-Blanch A等人^[13]首次得到了双折射值为 3.7×10^{-3} 的光子晶体光纤,其双折射值高出普通光纤一个数量级,不过这种全圆空气孔结构的光纤在实际制作中的误差较大。2016年,周铭皓等人^[14]采用多极法设计了全椭圆形空气孔的光子晶体光纤,其双折射值为 2.26×10^{-3} ,限制损耗为 $2.8 \times 10^{-3}\ \text{dB/km}$,但是全椭圆形空气孔数量较多,不易于实际制造。2018年,Jianfei Liao等人^[15]设计了包层为四层空气孔且双纤芯的光纤,其双折射值达 2.93×10^{-2} ,非线性系数低至 $14.3\ \text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$,但未提及该结构的色散特性。同年,薛璐等人^[16]采用时域有限差分法(FDTD)设计了一种包层空气孔为六角

点阵的光子晶体光纤,并主要分析了光纤的非线性、限制损耗及色散,得到的非线性系数为 $4.88 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,限制损耗低于 10^{-8} 数量级,在较长波长范围内存在色散平坦,但未提及双折射特性。2019年,廖昆等人^[17]采用全矢量有限元法设计了一种对称椭圆空气孔缺陷的光子晶体光纤,其双折射值达到了 3.327×10^{-2} ,限制损耗低至 10^{-7} 数量级,同时在可见光波段和红外光波段存在 2 个零色散点,但其非线性系数不高。

为了进一步提高光子晶体光纤的双折射和限制损耗等特性,本文设计背景材料为二氧化硅的光子晶体光纤。

1 结构设计和理论分析

1.1 光纤结构设计

本文设计的光子晶体光纤的结构如图 1 所示,包层的空气孔采用三角晶格方式排列,纤芯为 2 个左右对称的椭圆形空气孔,空气的折射率为 1,基底材料为二氧化硅,其折射率 n 由 Sellmeier 公式^[18]确定,最外层为完美匹配层(PML)吸收边界条件。图 1 中,空气孔间距 $\Lambda=1.28 \mu\text{m}$,包层圆形空气孔直径 $d=1.25 \mu\text{m}$,椭圆纤芯长轴 $b=1.2 \mu\text{m}$,短轴 $a=0.24 \mu\text{m}$ 。二氧化硅基底的折射率 n 由 Sellmeier 公式^[18]确定:

$$n^2(\lambda)=1+\frac{A_1\lambda^2}{\lambda^2-B_1^2}+\frac{A_2\lambda^2}{\lambda^2-B_2^2}+\frac{A_3\lambda^2}{\lambda^2-B_3^2} \quad (1)$$

其中, λ 为波长,单位为 μm , A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_1 、 B_2 和 B_3 为 Sellmeier 系数,数值分别为: $A_1=0.0684043$ 、 $A_2=0.1162414$ 、 $A_3=0.8974794$ 、 $B_1=0.6961663$ 、 $B_2=0.407926$ 和 $B_3=9.896161$ 。当 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ 时, $n=1.444023622$ 。

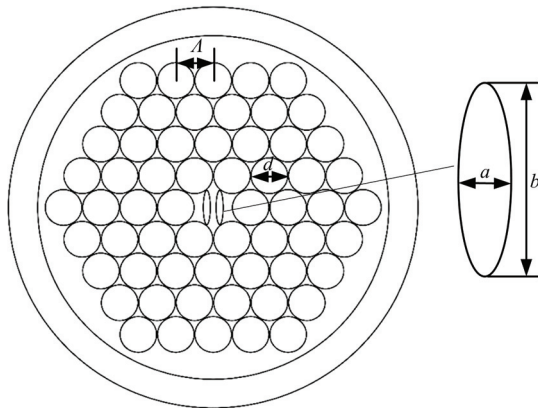


图 1 光子晶体光纤结构示意图

1.2 基本理论

本文采用有限元法^[19]结合 PML 模拟设计光纤结构。有限元法基于麦克斯韦方程,用磁场分量描述光

子晶体光纤的矢量波动方程为:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times \vec{H} \right] - k_0^2 \vec{H} = 0 \quad (2)$$

其中, ∇ 为计算旋度的符号, $\vec{H}$ 为磁场矢量, k_0 为真空中的波数, ϵ_r 为介质的相对介电常数。通过变分原理、离散化方程等对式(2)进行变形转化,最终可以得到光纤的模式有效折射率。

光纤的双折射值 B 是衡量光纤保偏性能的重要参数,值越大,说明光纤的保偏性能越好,其值由 2 个偏振态的有效折射率之差确定,表示为^[20]:

$$B = |\text{Re}(n_{\text{eff}X} - n_{\text{eff}Y})| \quad (3)$$

其中, $n_{\text{eff}X}$ 和 $n_{\text{eff}Y}$ 分别为 X 和 Y 偏振方向上的有效折射率。

光子晶体光纤的非线性特性由非线性系数 γ 确定,表示为^[21]:

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

其中,材料的非线性系数 $n_2=3.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$, ω_0 为中心频率,光速 $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$, A_{eff} 为光纤的有效模场面积,表示为^[22]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\iint |E|^2 dx dy}{\iint |E|^4 dx dy} \quad (5)$$

其中, E 为光纤横截面的电场强度。

光波在纤芯中传输时,会有一部分能量泄露到包层中,通过有效折射率 n_{eff} 的虚部可以得到光纤的限制损耗 L (单位为 dB/km),表示为^[23]:

$$L = \frac{20}{\ln 10} \times \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \times 10^3 \quad (6)$$

其中, λ 为当前的传输波长,单位为 μm , Im 为基模有效折射率的虚部。

光信号在光纤中的传输质量由色散决定。光子晶体光纤的色散由材料色散 D_m 和波导色散 D_g 两部分组成,整体色散 D 为^[24]:

$$D = D_g + \Gamma(\lambda) \cdot D_m(\lambda) \quad (7)$$

其中, $\Gamma(\lambda)$ 一般近似为 1。与波导色散相比,由于二氧化硅的材料色散数值很小,对整体色散的影响不大,所以在计算光纤色散时,光纤波导色散的值就是整体色散的值,计算公式可以表示为^[25]:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 |\text{Re}(n_{\text{eff}})|}{d\lambda^2} \quad (8)$$

2 数值模拟与结果分析

本文利用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件对光子晶体光纤进行建模仿真,可以得到光纤的有效

折射率以及电场强度,然后利用 Matlab 软件及相关计算公式对得到的数据进行后处理,从而获得光子晶体光纤相关特性随结构和波长的变化曲线,并分析其原因。

2.1 双折射特性

为了研究光纤空气孔间距对双折射特性的影响,本文设置包层圆形空气孔直径 $d=1.25\text{ }\mu\text{m}$,椭圆纤芯长轴 $b=1.2\text{ }\mu\text{m}$,短轴 $a=0.24\text{ }\mu\text{m}$,这 3 个值固定不变。空气孔间距 Λ 按照 $1.2672\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.28\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.2928\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.3056\text{ }\mu\text{m}$ 变化,通过式(3)计算,可以得到不同 Λ 下光纤的双折射值。其中在波长为 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 处, $\Lambda=1.28\text{ }\mu\text{m}$ 时双折射值达到 0.04343 ,比文献[14,15]提到的双折射值高。双折射值随空气孔间距 Λ 变化的曲线如图 2 所示。可以看出,在同一波长下,双折射值随着 Λ 的增大反而不断减小。这是因为随着 Λ 的增大,包层靠近纤芯的空气孔与纤芯模场之间的相互作用减弱,包层折射率与纤芯折射率的差值减小,因此双折射值减小。在 $0.85\sim 1.8\text{ }\mu\text{m}$ 的扫描波长范围内,随着波长的增加,双折射值先增大后减小。这是因为在短波长区间,光子晶体光纤对光波有较强的限制作用,随着扫描波长逐渐增大到和纤芯尺寸差不多时,纤芯中的部分能量会泄露到包层中,因此双折射值逐渐减小。这种具有高双折射、结构简单的光纤对制作高保偏光学精密器件有着重要的意义。

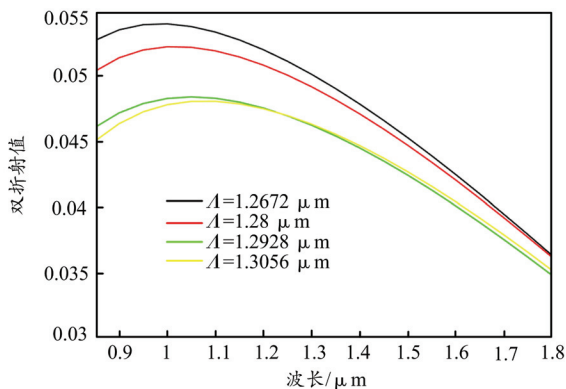
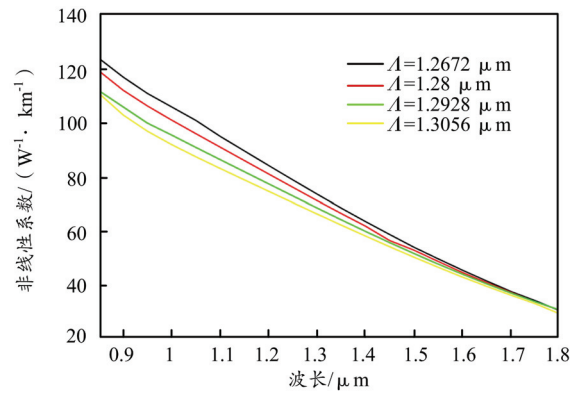


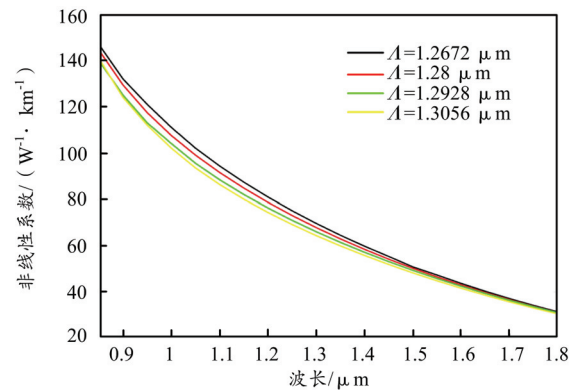
图 2 双折射值随空气孔间距 Λ 变化的曲线

2.2 非线性特性

仿真参数设置不变,本文通过式(4)可以计算得到非线性系数,绘制 X 和 Y 偏振方向的非线性系数随空气孔间距 Λ 变化的曲线如图 3 所示。可以看出,非线性系数的值随 Λ 的增加而降低。另外,随着扫描波长的增大,非线性系数也是降低的。在波长为 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 处, $\Lambda=1.28\text{ }\mu\text{m}$ 时, X 和 Y 偏振方向的非线性系数分别为 $48.832\text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 $46.286\text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。与普通光纤



(a) X 偏振方向



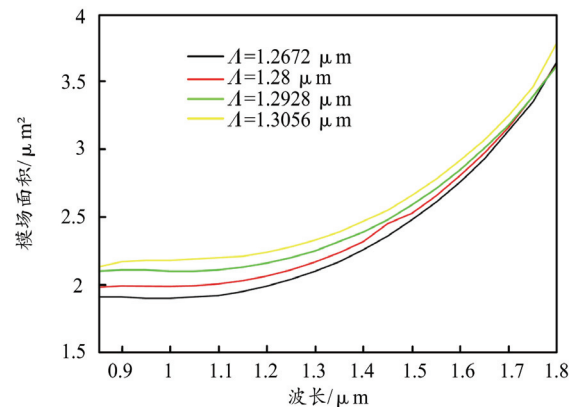
(b) Y 偏振方向

图 3 非线性系数随空气孔间距 Λ 变化的曲线

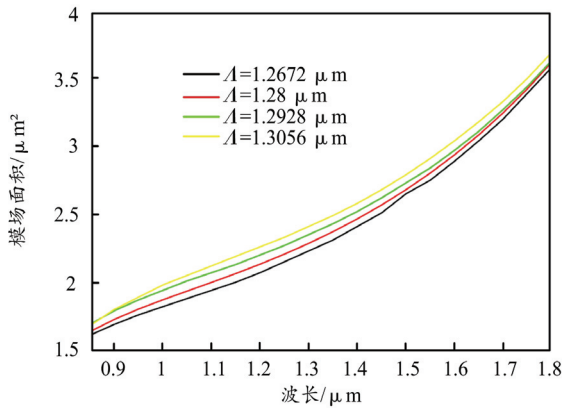
的非线性系数($2\text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$)相比,这种高非线性的光子晶体光纤在各种非线性效应的应用中更具有竞争力。

2.3 模场特性

仿真参数设置不变,本文通过 COMSOL Multiphysics 软件中后处理的积分求解模块可以得到光纤的电场强度,再利用式(5)计算有效模场面积的值,得到 X、Y 偏振方向的有效模场面积随空气孔间距 Λ 变化的曲线,如图 4 所示。可以看出,模场面积随着 Λ 的



(a) X 偏振方向



(b) Y 偏振方向

图 4 有效模场面积随空气孔间距 Λ 变化的曲线

增大也在增加。在波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 处,空气孔间距为 $1.28 \mu\text{m}$ 时,X 偏振方向的模场面积低至 $2.656 \mu\text{m}^2$ 。与常规光纤 $50\sim 100 \mu\text{m}^2$ 的模场面积相比,更小的模场面积在高偏振要求的光纤陀螺等方面有良好的应用价值。

当 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$, $\Lambda=1.28 \mu\text{m}$,包层圆形空气孔直径 $d=1.25 \mu\text{m}$,椭圆纤芯长轴 $b=1.2 \mu\text{m}$ 和短轴 $a=0.24 \mu\text{m}$ 时,准 TE 模和准 TM 模的电场分布如图 5 所示。可以看出,2 种模式的电场分布在纤芯区域都受到了很好的限制。由于 2 个椭圆孔的间隙效应,准 TE 模式的电场在低折射率的椭圆空孔区域很强,准 TM 模式的电场在高折射率的二氧化硅区域有很好的限制。

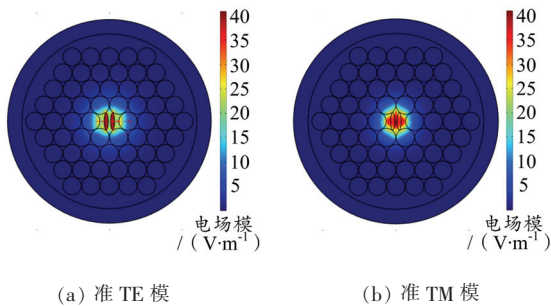
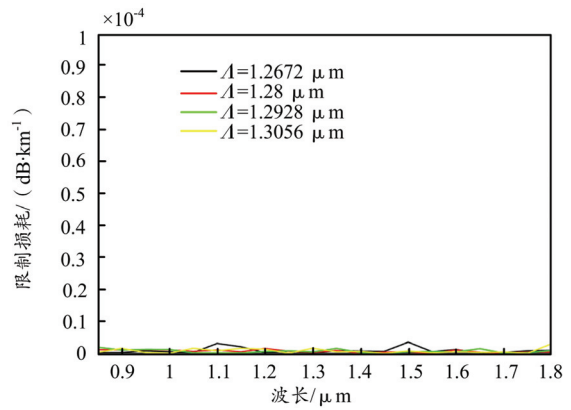


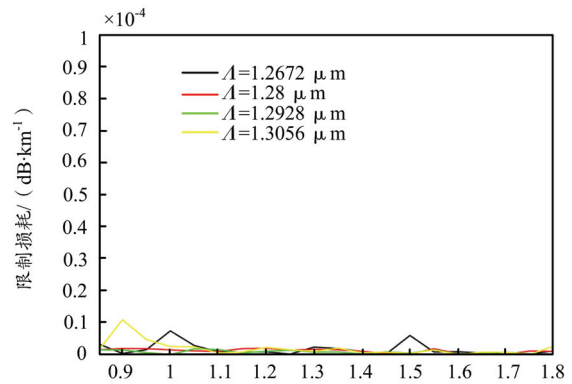
图 5 准 TE 模和准 TM 模在 $1.55 \mu\text{m}$ 处的电场分布

2.4 损耗特性

仿真参数设置不变,本文通过式(6)计算得到限制损耗的值。X 和 Y 偏振方向上限制损耗随 Λ 变化的曲线如图 6 所示。可以看出, Λ 不同时,光纤的限制损耗几乎没有变化,在整个扫描波长范围内的限制损耗趋近于零。在波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 处, $\Lambda=1.28 \mu\text{m}$ 时,X 偏振方向上的限制损耗为 $8.242\times 10^{-9} \text{ dB/km}$,这对光波在光纤中进行远距离传输有着重要的作用。



(a) X 偏振方向

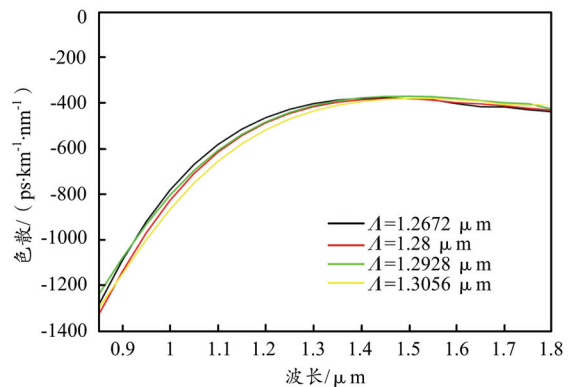


(b) Y 偏振方向

图 6 限制损耗随空气孔间距 Λ 变化的曲线图

2.5 色散特性

仿真参数设置不变,本文根据式(8)计算得到不同波长下的色散值。X 和 Y 偏振方向上色散随 Λ 变化的曲线如图 7 所示。可以看出,在整个扫描波长范围内,光纤的色散都是负值,在波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 处, $\Lambda=1.28 \mu\text{m}$ 时,X 偏振方向上色散为 $-389.686 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$,有着良好的色散补偿能力。



(a) X 偏振方向

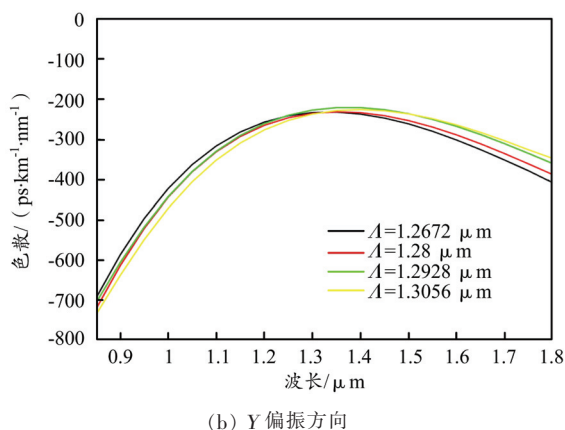


图7 色散随空气孔间距 Δ 变化的曲线

3 结束语

本文设计了一种以二氧化硅为基底的光子晶体光纤,该光纤的包层为整体呈六边形排列的圆形空气孔,纤芯引入2个左右对称的椭圆空气孔,破坏光纤结构的对称性,用来增加光纤的双折射值。采用全矢量有限元法结合PML吸收边界条件,使用COMSOL Multiphysics软件对所设计的光子晶体光纤进行数值模拟,得到其有效折射率,从而得出光纤的双折射值、非线性系数、有效模场面积、限制损耗以及色散,并分析了空气孔间距与光纤特性之间的关系。数值研究结果发现:当包层空气孔直径 $d=1.25 \mu\text{m}$,纤芯长轴 $b=1.2 \mu\text{m}$,短轴 $a=0.24 \mu\text{m}$,孔间距为 $1.28 \mu\text{m}$ 时,在波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 处,获得0.04343的双折射值,X和Y偏振方向的非线性系数分别为 $48.832 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $46.286 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。同时,X偏振方向的限制损耗低至 $8.242 \times 10^{-9} \text{ dB/km}$ 。在 $0.85 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 波长范围内,色散值都为负,可用于宽带色散补偿。综上所述,本文设计的高双折射低损耗及一定范围内的负色散光纤,对设计保偏光子晶体光纤、色散补偿光纤有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] KNIGHT J C, BIRKS T A, RUSSELL P S J, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding: errata [J]. Optics Letters, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [2] 张银,陈明阳,张永康. 新型大模场光子晶体光纤传输系统及其传输特性分析[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 103-108.
- [3] CHEN D, WU G. Highly birefringent photonic crystal fiber based on a double-hole unit[J]. Applied Optics, 2010, 49(9): 1682-1686.
- [4] 闫海峰,俞重远,田宏达,等. 八角光子晶体光纤传输特性与非线性特性研究[J]. 物理学报, 2010, 59(5): 3273-3277.

- [5] 张亚妮. 低损耗低非线性高负色散光子晶体光纤的优化设计 [J]. 物理学报, 2012, 61(8): 261-267.
- [6] 武丽敏,宋朋,王静,等. 一种高双折射高负平坦色散压缩型光子晶体光纤[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(s1): 190-194.
- [7] 王清月,胡明列,柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. 中国激光, 2006(1): 57-66.
- [8] MALAVIKA R, PRABU K. Design optimization of a highly sensitive spiral photonic crystal fiber for liquid and chemical sensing applications[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 51: 36-40.
- [9] 吴宵宵,张晓,范万德,等. 温度可控高负色散光子晶体光纤的研究[J]. 光子学报, 2018, 47(5): 136-142.
- [10] 屈玉玮,张春兰,郭长江,等. 全固双层芯色散补偿光子晶体光纤的研究与设计[J]. 光子学报, 2017, 46(7): 75-80.
- [11] XU H, WANG X, HUANG X, et al. Polarization-maintaining photonic crystal fiber for dispersion compensation over E+ S+ C+ L+ U wavelength bands[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 50: 108-113.
- [12] 李荣敏,曹晔,童峥嵘. 短长度的双椭圆纤芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 101-105.
- [13] ORTIGOSA-BLANCH A. Highly birefringent photonic crystal fibers [J]. Optics Letters, 2000, 25(18): 1325-1327.
- [14] 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): 98-102.
- [15] LIAO Jianfei, HUANG Tianye, XIE Liangyuan, et al. Ultrahigh birefringent dual-slot silica photonic crystal fiber with ultralow nonlinearity [J]. Optik, 2018, 175: 197-202.
- [16] 薛璐,张亚妮,朱雨雨,等. 超低损耗低非线性平坦色散光子晶体光纤优化设计[J]. 光子学报, 2018, 47(11): 36-44.
- [17] 廖昆,廖健飞,李伯勋,等. 一种高双折射双零色散的缺陷型光子晶体光纤[J]. 量子电子学报, 2019, 36(1): 123-128.
- [18] FUJISAWA T. Finite element characterization of chromatic dispersion in nonlinear holey fibers[J]. Opt. Express, 2003, 11(13): 1481-1489.
- [19] KUMAR A, SAINI T S, NAIK K D, et al. Large-mode-area single-polarization single-mode photonic crystal fiber: design and analysis [J]. Applied optics, 2016, 55(19): 4995-5000.
- [20] 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.
- [21] SHAHIR Uddin, DHARMENDRA K Singh. A solid silica core based non-linear hybrid PCF with low confinement loss[J]. Optik, 2016, 127(22): 10399-10411.
- [22] 张晓娟. 一种大模场光子晶体光纤的传输特性分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2017, 47(5): 649-653.
- [23] SAEED Olyae, FAHIMEH Taghipour. Doped-Core Octagonal Photonic Crystal Fiber with Ultra-Flattened Nearly Zero Dispersion and Low Confinement Loss in a Wide Wavelength Range[J]. Fiber and Integrated Optics, 2012, 31(3): 178-185.
- [24] ZHENG L, ZHANG X, LIU X, et al. Design and analysis of a dispersion flattened and highly nonlinear photonic crystal fiber with ultralow confinement loss[J]. Applied Optics, 2010, 49(3): 292-297.
- [25] 关寿华,于清旭,郑建洲. 光子晶体光纤色散极值特性的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 55-58.