

# 环形中空光子晶体光纤用于多阶涡旋光传输

靳晓玲<sup>1</sup>, 王有为<sup>1</sup>, 孙兵<sup>1\*</sup>, 张祖兴<sup>1</sup>, 陈明阳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院先进光子技术研究所, 江苏 南京 210023;

<sup>2</sup>江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 根据光子晶体光纤多孔等特性, 提出一种涡旋光传输的环形中空光子晶体光纤设计方案。利用有限元法对环形光纤结构参数进行优化设计, 并分析光纤中多阶涡旋光的传输特性。具体分析结果表明, 当光纤中心孔直径取  $5.6 \mu\text{m}$ , 第一层空气孔直径取  $2.67 \mu\text{m}$ , 最外层空气孔的直径取  $2.87 \mu\text{m}$ , 孔间距取  $3.09 \mu\text{m}$ , 在  $1.3 \sim 2 \mu\text{m}$  波段内, 同一矢量模式组对应的 HE 模和 EH 模之间的有效折射率差最小超过  $3.04 \times 10^{-3}$ , 最大达到了  $1.55 \times 10^{-2}$ , 并且能应用于光纤较小弯曲情形(弯曲半径可以低至  $18 \text{ mm}$ )。该光子晶体光纤能够实现涡旋光模式稳定传输, 为今后进一步研究并应用涡旋光奠定了良好的基础。

**关键词** 光纤光学; 光子晶体光纤; 涡旋光; 矢量模式; 弯曲损耗

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1105001

## 1 引言

由于传统通信方式受到单模容量限制, 人们对空间维度中提高通信容量的方法进行了大量的研究, 其中广泛关注的是轨道角动量(OAM)复用技术, 它能优化复用通信系统中的速率和信道容量问题, 以满足当前对数据容量的迫切需求。1992年, Allen等<sup>[1]</sup>通过实验验证了OAM的存在, 它源于光的螺旋波前相位。光场具有特殊的光强和相位分布, 由于OAM模之间固有的正交性为复用技术带来了新的自由度, 不同拓扑荷数的OAM模式之间具有空间正交性, 使得OAM模式复用在理论上具有无限的传输容量。但是, OAM模式较难在传统光纤中稳定传输, 需要设计有特殊结构的光纤来支持OAM的传输<sup>[2-4]</sup>。于是, 研究学者对诸如空芯阶梯光纤、梯度折射率光纤、多芯光纤等各种光纤结构进行了大量研究, 但这些OAM光纤缺乏结构参数的灵活性。此外, 要确保OAM模式的稳定传输, 各模式之间的有效折射率差要达到  $10^{-4}$  量级, 如此可支持OAM模的常规光纤的数量就比较少<sup>[5-13]</sup>。

近年来, 光子晶体光纤<sup>[14-23]</sup>具有普通光纤难以实现的奇异特性, 最大的特点就是具有空间分布的周期性二维结构, 这使得它有更强的设计性。通过改变包层空气孔的结构和排列方式来调节其传输特性, 这更大程度地提高了光纤模式的传输性能, 为在光子晶体光纤中传输涡旋光提供了良好的保障。而且光子晶体光纤良好的非线性、灵活的色散、低的限制损耗等特性保证涡旋模式的稳定高效的传输。如早期用于传输OAM模式的光子晶体光纤采用  $\text{As}_2\text{S}_3$  环形结构<sup>[17]</sup>, 包层和中间区域都是六边形结构。该结构支持的OAM模式数量较少, 且模式质量不好, 有研究人员认为这是具有非对称性的六边形结构与OAM模的环形强度不一致导致的。2016年, Zhang等<sup>[18]</sup>提出一种改进的环形光子晶体光纤结构, 该结构的包层围绕纤芯呈圆形排列, 增大了OAM模式之间的有效折射率差, 减小了模式之间的简并, 抑制了传输过程中的模间串扰, 能稳定传输的OAM态数最多达到26个。2018年, Xu等<sup>[19]</sup>设计了一种具有双导模区域的微结构光子晶体光纤, 该结构支持30个OAM模式和2个线偏振(LP)模

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2020-12-02; 录用日期: 2020-12-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0306100)、中国博士后创新人才支持计划(BX201600077, 2017M611877)、南京邮电大学1311人才计划

\*E-mail: b. sun@njupt.edu.cn

式。2019 年, Hassan 等<sup>[20]</sup>设计了一种新型光子晶体光纤结构, 它采用三层链状空腔作为包层, 支持 26 种 OAM 模式。由此可见, 光子晶体光纤可支持更多的 OAM 模式, 将其应用于复用通信具有巨大的前景<sup>[21-25]</sup>。

鉴于此, 本文提出一种涡旋光传输的环形中空光子晶体光纤设计方案。利用有限元法对环形光纤结构参数进行优化设计, 并分析光纤中多阶涡旋光的传输特性和弯曲损耗特性。数值分析结果表明: 在 1.3~2 μm 波段, 同一矢量模式组对应的 HE 模和 EH 模之间的有效折射率差最小高于 3.04 × 10<sup>-3</sup>, 最大高达 1.55 × 10<sup>-2</sup>, 且能应用于光纤较小弯曲情形。

## 2 OAM 理论

光纤中的 OAM 模由相位差为 π/2 的同一阶本征矢量模的奇偶模线性叠加组成, 关系<sup>[26]</sup>可表示为

$$\begin{cases} R_{OAM, \pm l, m} = R_{HE, l+1, m}^{even} \pm jR_{HE, l+1, m}^{odd} \\ R_{OAM, \mp l, m} = R_{EH, l-1, m}^{even} \pm jR_{EH, l-1, m}^{odd} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $l$  为拓扑荷数, 描述 OAM 的阶数;  $m$  为径向涡旋光同心环的个数;  $R_{OAM, \pm l, m}$  中上角标“±”表示 OAM 模式圆偏振的方向, 下角标“±”表示波前相位的旋转方向。当  $l > 1$  时, 每一个 OAM 模式分别有两种偏振涡旋(左旋和右旋)和两种相位涡旋, 因此每个 OAM 模式组包含 4 个独立的本征模式<sup>[5]</sup>。当  $l = 1$  时, 对应的是一个比较特殊的 OAM 模式<sup>[27]</sup>, 理论上它由两个不携带 OAM 的偏振光束和两个相位涡旋光束构成, 表示为

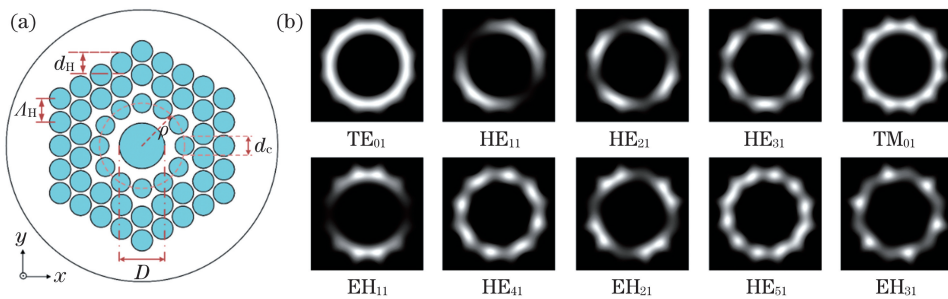


图 1 环形光纤端面及矢量模式的场分布。(a) OAM 光子晶体光纤横截面示意图; (b) 各矢量模式的电场强度分布  
Fig. 1 The cross section of the ring fiber and electric field intensity distribution of each vector mode. (a) Cross section of the OAM photonic crystal fiber; (b) electric field intensity distribution of each vector mode

### 3.2 光纤 OAM 模式场分布和相位分布

中心空气孔和内层小空气孔之间形成折射率较高的环形纤芯, 可以支持多个本征模式, 而这些本征态的奇偶模可以组成不同阶 OAM。图 2 为几组具有同一拓扑数 OAM 的组合过程、对应的场分布和

$$R_{OAM, \pm 1, m} = R_{HE, 2, m}^{even} \pm jR_{HE, 2, m}^{odd}, \quad (2)$$

$$R_{OAM, \mp 1, m} = R_{TE, 0, m} \pm jR_{TM, 0, m}. \quad (3)$$

可以看出, 由 HE<sub>11</sub> 模式组合成的 OAM<sub>±0,m</sub> 的拓扑荷数为 0, 不携带 OAM, 因此不属于涡旋光模式。

本文优化涡旋光纤结构参数, 目的在于增加 OAM<sub>l,m</sub> 模对应本征矢量模(HE<sub>(l+1)m</sub> 与 EH<sub>(l-1)m</sub>) 间的有效折射率差, 确保其值大于 10<sup>-4</sup> RIU (RIU 为折射率单元), 从而有效地避免模式串扰, 支持涡旋光的稳定传输。此外, 要确保同一阶本征矢量模有效折射率差足够小, 即简并度高。而光子晶体光纤结构设计灵活, 能够很大程度上增大纤芯和包层的折射率差, 方便实现较好的模式分离。

## 3 光子晶体光纤涡旋光传输特性研究

### 3.1 光纤模型

文献[22]已拉制成功环形光子晶体光纤, 该环形光子晶体光纤展现出良好的光学特性, 其端面结构如图 1(a) 所示, 基底材料为 SiO<sub>2</sub>。光纤中心由直径为  $D$  的空气孔组成, 内层由直径为  $d_c$  的空气孔呈环形分布构成, 对应环状半径为  $\rho$ 。沿半径方向外层的空气孔(直径  $d_H$ )呈六角形分布, 空气孔之间的距离定义为  $\Lambda_H$ 。通过全矢量有限元分析方法计算出, 这类环形光子晶体光纤可支持多个高阶本征矢量模传输。图 1(b) 为该环形光子晶体光纤可传输的本征矢量模式的场强度分布, 为方便起见, 场强度分布图是根据本征模式的折射率依次减小给出的。

相位分布。例如, 由 HE<sub>51</sub> 与 EH<sub>31</sub> 奇偶模式组成了 OAM<sub>41</sub><sup>+</sup> 与 OAM<sub>41</sub><sup>-</sup>。从图 2 可以看出, 在光纤环形区域内, 各阶 OAM 模式强度分布得到了很好的控制, 具有良好的模质量, 这意味着该环形光子晶体光纤可以很好地支持高阶 OAM 模。

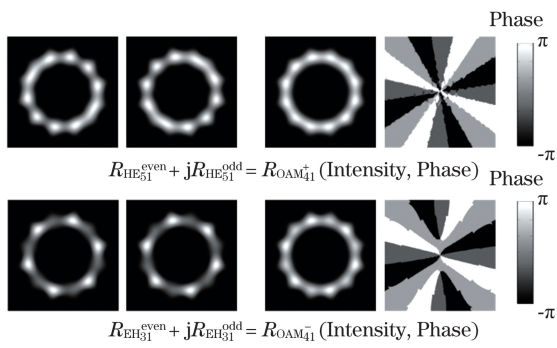


图 2 对应的场分布和相位分布

Fig. 2 Corresponding field distribution and phase distribution

为实现各阶 OAM 模在光纤中的稳定传输,要

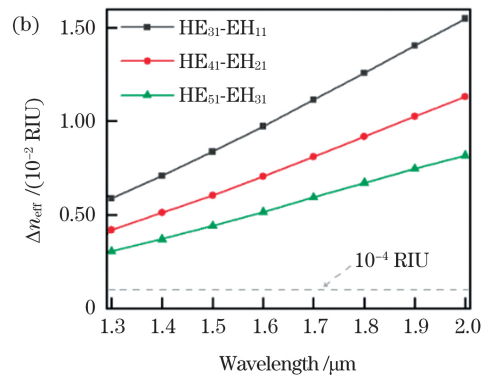
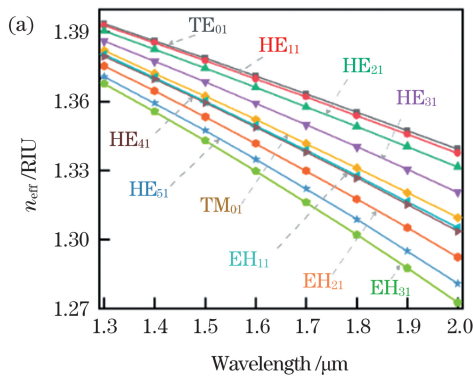


图 3 矢量本征模式参数间的关系。(a)有效折射率与波长的关系;(b)有效折射率差与波长的关系

Fig. 3 Relationship between parameters of vector eigenmode. (a) Relationship between effective refractive index and wavelength; (b) relationship between effective refractive index difference and wavelength

## 4 光纤参数优化

### 4.1 中心空气孔直径 $D$ 及第一层包层空气孔直径 $d_c$

结合图 3 的分析,同阶本征模式的有效折射率差依赖于波长。同时,为减小 OAM 模式间的耦合,即  $\Delta n_{\text{eff}} = |n_{\text{eff}, \text{HE}_{l+1,m}} - n_{\text{eff}, \text{EH}_{l-1,m}}| > 10^{-4}$ ,分析不同中心空气孔直径大小对 OAM 模式的有效折射率差的影响。从图 4(a)可以看到,随着中心孔直径  $D$

增大,HE 模和 EH 模之间的有效折射率差越来越大,并且与波长成正比关系。计算发现,各阶模式的模场分布会随着中心孔直径  $D$  的增大向外扩展,光场泄露到包层的能量会较多,致使模式质量变差,且高阶模会愈发明显。因此,中心孔直径  $D$  为  $5.6 \mu\text{m}$  时,HE<sub>31</sub> 与 EH<sub>11</sub> 模式之间的有效折射率差高达  $5.84 \times 10^{-3}$  RIU,既保证了矢量模式之间大的有效折射率差且模场质量较好。

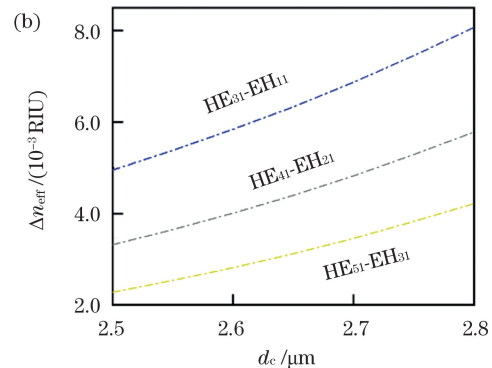
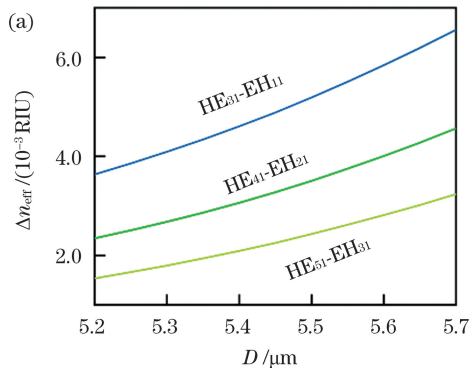


图 4 各模式之间有效折射率差与  $D$  和  $d_c$  的关系。(a)  $D$ ;(b)  $d_c$

Fig. 4 Relationship between effective index difference of each mode and  $D$  and  $d_c$ . (a)  $D$ ; (b)  $d_c$

进一步分析不同  $d_c$  情况下,同一 OAM 矢量模式组对应 HE 模和 EH 模之间的有效折射率差,如图 4(b)所示,可以看到,随着第一层包层空气孔  $d_c$  的增大,HE 模和 EH 模之间的有效折射率差逐渐增大,并且越往长波方向,差值越大。当第一层空气孔个数确定为 12 时, $d_c$  的取值其实是有限的。此外,随着  $d_c$  继续增大,部分高阶模式的双折射值会急剧增加。综合考虑, $d_c$  取  $2.67 \mu\text{m}$ 。

#### 4.2 第一层包层空气孔个数

将第一层包层空气孔数目由 12 个增加(光纤 A,此时第一层空气孔半径  $d_c = 2.67 \mu\text{m}$ )到 16 个(光纤 B,相应孔直径  $d_c$  最大只能取  $2.01 \mu\text{m}$ ),如图 5 所示,同时分析了各矢量模式之间有效折射率差的变化。实际上,增加第一层空气孔个数等效于减小该层空气孔的直径,分析发现,当空气孔数量为 16 个时,OAM<sub>21</sub> 模(对应的矢量模式 HE<sub>31</sub> 和 EH<sub>11</sub>)有效折射率差为  $9.89 \times 10^{-3}$  RIU,与空气孔数量为 12 个(HE<sub>31</sub> 和 EH<sub>11</sub> 有效折射率差为  $1.55 \times 10^{-2}$  RIU)相比,折射率差减小了  $5.61 \times 10^{-3}$  RIU。于是可以得出,随着空气孔数目增加,同一矢量模式组对应的 HE 模和 EH 模之间有效折射率差明显减小。然而,减少第一层空气孔数(小于 12 个)又会增加同阶矢量模式的有效折射率差,即部分高阶矢量模式的双折射值会明显增大。因此综合考虑,空气孔数量保持在 12 个时,模式之间的有效折射率分离得更好,更利于组合成 OAM 模式。

此外,第二、第三层空气孔直径  $d_H$  及孔间距  $\Delta_H$  对各 OAM 模式间有效折射率影响较小。这与常规光子晶体光纤结构具有类似规律<sup>[28]</sup>,即外层空气孔仅对光纤纤芯内模式的损耗有影响。

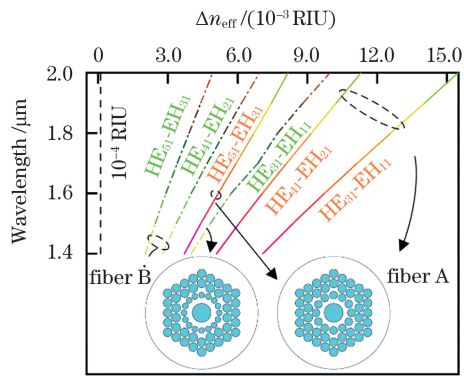


图 5 两种光子晶体光纤各矢量模式之间的有效折射率差随波长变化关系

Fig. 5 Relationship between the effective refractive index difference of each vector mode of two kinds of photonic crystal fibers and wavelength

## 5 光纤限制损耗和弯曲损耗

光子晶体光纤的损耗由材料损耗(包括杂质引起的瑞利散射和吸收)和限制损耗决定。光子晶体光纤由纯二氧化硅制成,降低了杂质引起的吸收损耗;当光束在光纤中传输时,一部分光会泄露到包层中。因此,限制损耗是光的泄露造成的,它可以表示<sup>[29]</sup>为

$$L(\lambda) = \frac{40\pi}{\ln 10 \times \lambda} \times \text{Im}\{n_{\text{eff}}\}, \quad (4)$$

式中:  $\text{Im}\{n_{\text{eff}}\}$  对应模式有效折射率的虚部;  $L(\lambda)$  的单位为 dB/m。图 6(a)为波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ,不同包层空气孔结构(包层空气孔圈数不同)下各本征矢量模式的限制损耗。相比仅有一圈环形空气孔结构(fiber I),增加三角形分布的大直径空气孔的圈数的结构(fiber II 和 fiber III)更能束缚各模式,因而损耗明显降低。从整体上看,随着模式阶数增加,对应的限制损耗会呈增加趋势,这是由于高阶模式的场能量在包层中占更多比例。上述出现的模式损耗不一致有可能是因为各模式的场分布不同<sup>[30]</sup>。考虑是否存在不同机制,这是下一步需要研究的工作。此外,上述模式(损耗不同)是否会对光纤传输系统的性能有影响,有望在后续的实验工作中进行佐证。另外,提出的 fiber III 结构将限制损耗降低了几个数量级,且保证该光纤各模式的限制损耗在  $\sim 10^{-10}$  dB/m 量级,此时计算结果呈现一定的波动,可能与相关计算软件所能达到的精度有关。图 6(b)为不同波长处, fiber III 结构各模式的限制损耗。可以看出:低阶模式的限制损耗在整个计算波段( $1.3 \sim 2.0 \mu\text{m}$ )都较低,在  $10^{-9}$  dB/m  $\sim 10^{-11}$  dB/m 量级;而少部分高阶模式的限制损耗在研究波段的后半波段呈现出递增趋势,即越往长波方向,限制损耗越大。例如,在  $\lambda = 2.0 \mu\text{m}$  处, EH<sub>31</sub>, HE<sub>51</sub> 及 EH<sub>21</sub> 模式的损耗分别为  $3.52 \times 10^{-4}$  dB/m,  $2.44 \times 10^{-6}$  dB/m 及  $5.34 \times 10^{-7}$  dB/m,相应的场分布如插图所示。当然,还可以进一步增加外包层空气孔数量来降低光纤的限制损耗。

研究当光纤承受不同弯曲情形,各本征模式的限制损耗和模场变化情况,如图 7(a)所示。图 7(b)分别给出  $R = 1 \text{ mm}$  和  $18 \text{ mm}$  情形下 HE<sub>11</sub> 奇偶模的场分布。从场分布变形程度可以看出,当弯曲半径  $R$  减小时,光子晶体光纤的各本征模式的限制损耗会增大,但仍处于很低的量级,这是包层中呈三角形分布的大直径空气孔决定的。计算发现,此时各

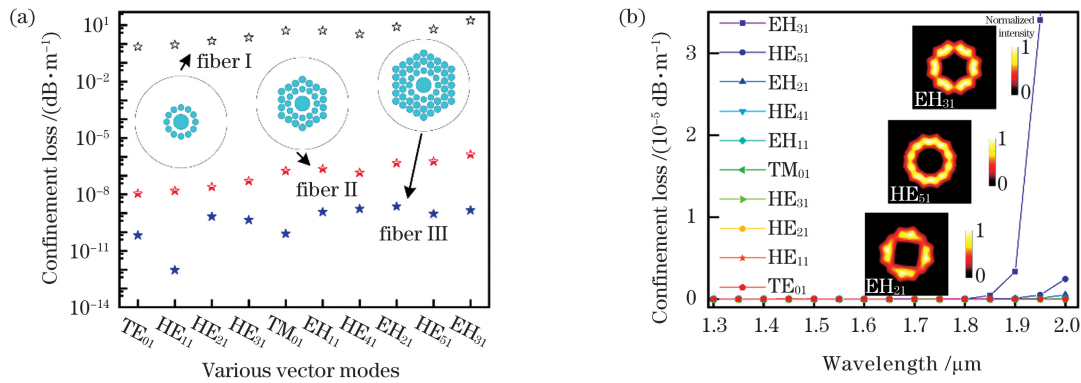


图 6 不同类型光纤的损耗特性。(a)不同包层空气孔结构下各模式的限制损耗;(b)各模式限制损耗随波长变化关系  
Fig. 6 Loss characteristics of different types of optical fibers. (a)Confinement loss of different modes under different cladding air hole structures; (b) relationship between confinement loss of each mode and wavelength

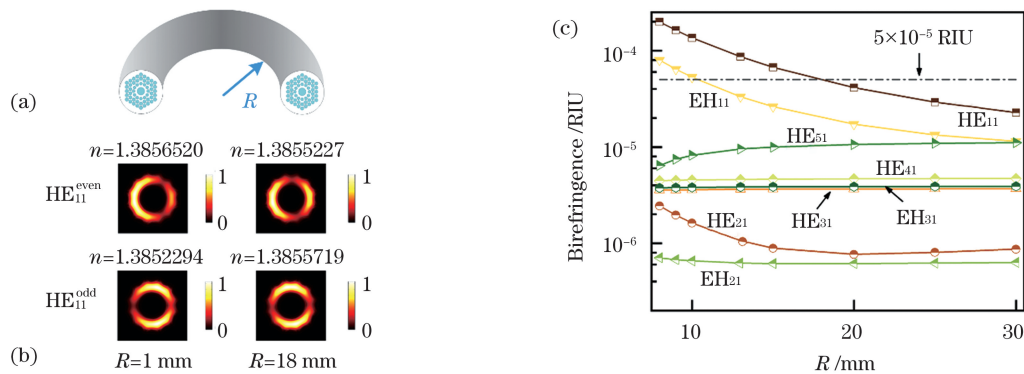


图 7 矢量模式在不同弯曲半径下的双折射值。(a)弯曲测试示意图;(b)当弯曲半径为 1 mm 和 18 mm 时,HE<sub>11</sub><sup>odd</sup> 和 HE<sub>11</sub><sup>even</sup> 模式有效折射率及场分布;(c)各矢量模式折射率差随弯曲半径的变化

Fig. 7 Birefringence of vector modes at 1.55 μm corresponding to various bending radii. (a) Bending diagram; (b) effective refractive index and field distribution of HE<sub>11</sub><sup>odd</sup> and HE<sub>11</sub><sup>even</sup> modes when the bending radius is 1 mm and 18 mm; (c) variation of refractive index difference of selected vector modes with bending radius

本征模式的场分布可能出现了很严重的变形,且部分模式的双折射效应明显,因而较难组合成 OAM 模式<sup>[22]</sup>。如当  $R$  为 1 mm,图 7(b)给出了 HE<sub>11</sub> 模式的有效折射率和场分布,因此不能单方面根据模式的限制损耗来判定光纤的抗弯曲能力。图 7(c)为各模式的双折射随弯曲半径的变化关系,总体看来,各模式的双折射均随弯曲半径减小而增大,尤其是 HE<sub>11</sub> 和 EH<sub>11</sub> 模式更加明显。这可能是由于 HE<sub>11</sub> 和 EH<sub>11</sub> 模式的场分布更加集中在环形芯(SiO<sub>2</sub>),弯曲导致材料折射率分布的不均匀性愈发明显。这里不妨令双折射值高于  $5 \times 10^{-5}$  RIU,即认为该模式的奇偶模较难组合成 OAM。例如,当弯曲半径小于 18 mm,双折射最大的 HE<sub>11</sub> 模的模场并没有发生变形,且弯曲损耗仍然较低,如图 7(b)右侧所示。因此,本文设计的 OAM 光纤能够在低至 18 mm 弯曲情况下实现稳定传输。

## 6 结 论

基于光子晶体光纤的灵活性,提出一种可传输多阶涡旋光的光纤设计方案。利用有限元法计算出各矢量模式的有效折射率、OAM 模场和相位分布。数据分析发现,本设计方案确保了同一矢量模式组 HE 模和 EH 模之间的有效折射率差远大于  $10^{-4}$  RIU,并且各模式限制损耗极低。仅分析了相对较低阶的 10 个模式的传输特性,如若允许存在更多的高阶矢量模式,则可以调整光纤的结构参数,例如通过增加光纤孔周期就能实现模式数量的激增,这在早期光子晶体光纤的设计工作中经常被用到。其次,对光纤模式的传输性能进行了一系列结构参数优化分析,得到一组最优参数。最后,该结构具有很好的抗弯曲损耗能力,分析发现,当弯曲半径  $R$  低至 18 mm 时,该光纤还能确保较多的 OAM 模式的稳定高效传输,在提高光通信容量方面具有很好

的应用价值。

### 参 考 文 献

- [1] Allen L, Beijersbergen W M, Spreeuw J R, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review. A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161-204.
- [3] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y X, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [4] Willner A E, Huang H, Yan Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 66-106.
- [5] Brunet C, Vaity P, Messaddeq Y, et al. Design, fabrication and validation of an OAM fiber supporting 36 states[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26117-26127.
- [6] Wang X H, Song Y X. Encoding and decoding by the states of vector modes for vortex beams propagating in air-core fiber[J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 29342-29355.
- [7] Gregg P, Kristensen P, Ramachandran S. 13.4 km OAM state propagation by recirculating fiber loop [J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 18938-18947.
- [8] Li SH, Wang J. Adaptive power-controllable orbital angular momentum (OAM) multicasting [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9677.
- [9] He T, Wu B J. Low confinement loss photonic crystal fibre capable of supporting 54 orbital angular momentum modes [J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(6): 556-562.
- [10] Yang K, Liu Y G, Wang Z, et al. Triple-order orbital-angular-momentum modes generation based on single tilted fiber Bragg grating in a few-mode ring-core fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 55: 102155.
- [11] Zhang H K, Zhang B, Liu Q, et al. OAM-basis transmission matrix in optics: a novel approach to manipulate light propagation through scattering media [J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15006-15015.
- [12] Wen Y H, Chremmos I, Chen Y J, et al. Arbitrary multiplication and division of the orbital angular momentum of light [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(21): 213901.
- [13] Song W, Liu H H, Pang F F, et al. Excitation of high-order optical vortex modes by tilting tapered and lensed single mode fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0906001.
- 宋巍, 刘奂奂, 庞拂飞, 等. 倾斜锥形微透镜单模光纤激发高阶涡旋光模式 [J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0906001.
- [14] Xia C M, Zhou G Y. Progress and prospect of microstructured optical fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170603.
- 夏长明, 周桂耀. 微结构光纤的研究进展及展望 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170603.
- [15] Li B Y, Zhou G Y, Liu J T, et al. Orbital-angular-momentum-amplifying helical vector modes in Yb<sup>3+</sup>-doped three-core twisted microstructure fiber [J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 21110-21120.
- [16] Bai X L, Chen H M, Zhang L F. Circular photonic crystal fiber supporting orbital angular momentum modes transmission [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0222002.
- 白秀丽, 陈鹤鸣, 张凌菲. 轨道角动量模传输的圆环形光子晶体光纤 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(2): 0222002.
- [17] Yue Y, Zhang L, Yan Y, et al. Octave-spanning supercontinuum generation of vortices in an As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> ring photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 1889-1891.
- [18] Zhang H, Zhang W B, Xi L X, et al. A new type circular photonic crystal fiber for orbital angular momentum mode transmission [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(13): 1426-1429.
- [19] Xu M N, Zhou G Y, Chen C, et al. A novel microstructured fiber for OAM mode and LP mode simultaneous transmission [J]. *Journal of Optics*, 2018, 47(4): 428-436.
- [20] Hassan M M, Kabir M A, Hossain M N, et al. Photonic crystal fiber for robust orbital angular momentum transmission: design and investigation [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 52(1): 1-14.
- [21] Zhang L, Zhang K C, Peng J, et al. Circular photonic crystal fiber supporting 110 OAM modes [J]. *Optics Communications*, 2018, 429: 189-193.
- [22] Tandjè A, Yamine J, Dossou M, et al. Ring-core photonic crystal fiber for propagation of OAM modes [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(7): 1611-1614.
- [23] Wang W, Xu H, Yang Q, et al. Large mode area microstructured fiber supporting 56 super-OAM modes[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27991-28008.
- [24] Wei W, Zhang L X, Zhang Z M, et al. Design of three vortex photonic crystal fibers [J]. *Acta Optica*

- Sinica, 2019, 39(9): 0906006.
- 魏薇, 张羚翔, 张志明, 等. 三种涡旋光光子晶体光纤的设计[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0906006.
- [25] Wang W C, Sun C Y, Wang N, et al. A design of nested photonic crystal fiber with low nonlinear and flat dispersion supporting 30 + 50 OAM modes [J]. Optics Communications, 2020, 471: 125823.
- [26] Bozinovic N, Golowich S, Kristensen P, et al. Control of orbital angular momentum of light with optical fibers [J]. Optics Letters, 2012, 37 (13): 2451-2453.
- [27] Dashti P Z, Alhassen F, Lee H P. Transfer of orbital angular momentum between acoustic and optical vortices in optical fiber[C]//2006 Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 5-10, 2006, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2006.
- [28] Chen M Y, Sun B, Zhang Y K, et al. Design of broadband polarization splitter based on partial coupling in square-lattice photonic-crystal fiber [J]. Applied Optics, 2010, 49(16): 3042-3048.
- [29] Han J L, Liu E X, Liu J J. Circular gradient-diameter photonic crystal fiber with large mode area and low bending loss [J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 2019, 36(4): 533-539.
- [30] Chen M Y, Zhang Y K, Sun B, et al. Design and analysis of single-mode polymer segment cladding optical fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3250-3257.

## Annular and Hollow-Core Photonic Crystal Fiber for Propagation of Multi-Order Vorticity

Jin Xiaoling<sup>1</sup>, Wang Youwei<sup>1</sup>, Sun Bing<sup>1\*</sup>, Zhang Zuxing<sup>1</sup>, Chen Mingyang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Advanced Photonic Technology, College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

<sup>2</sup> School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

### Abstract

**Objective** Orbital angular momentum (OAM) beams have recently spurred great interest because they are widely applicable to optical manipulation, quantum information, imaging, and communications. The four states of the OAM<sub>*l,m*</sub> mode family have been already demonstrated in multiple-input multiple-output (MIMO)-free transmission. When using the four states of a LP<sub>*l,m*</sub> mode ( $l \geq 1$ ) in an optical fiber with circular symmetry,  $4 \times 4$  MIMO processing is necessary. As  $N \times N$  MIMO complexity scales with  $N^2$ , OAM modes are preferred in communication systems for mobile device management. However, the effective refractive index difference  $\Delta n_{\text{eff}}$  between the HE<sub>*(l+1)m*</sub> and EH<sub>*(l-1)m*</sub> modes should be below  $10^{-4}$  to minimize coupling between the OAM modes. Ring-core geometry, usually with a high-index contrast, is well adaptable to the guidance of OAM modes because it can eliminate the undesirable modes ( $m = 2$ ) and reaches a sufficiently large intra-mode-group OAM  $\Delta n_{\text{eff}}$  value. Moreover, avoiding the higher-order OAM modes ( $m \geq 2$ ) simplifies the multiplexing-demultiplexing of the modes because all OAM modes present an annular-shaped intensity.

**Methods** Photonic crystal fibers (PCFs) can be flexibly designed to provide unique fiber properties such as endlessly single mode, controllable nonlinearity and confinement loss, and tailorable chromatic dispersion. The PCF structure that realizes OAM-mode transmission is potentially applicable to fiber communications. Although air-silica PCFs achieving high index contrast, OAM-dedicated PCFs are not yet realized, and an OAM with  $l = 1$  guidance in a PCF has been reported only in twisted PCFs. This study evaluates the potential of a new ring-core PCF designed for guiding OAM modes with low mode coupling. Such a geometry appears to be easily manufactured by the stack-and-draw method.

**Results and Discussions** In the proposed structure [Fig. 1(a)], the solid ring core is installed in a central hole surrounded by a circular ring of air holes in the cladding structure. This structure is prolonged by several rings of air holes with hexagonal symmetry. The intensity profiles of the first 10 vector modes in the PCF structure are theoretically studied using the finite element method, and are displayed in Fig. 1(b). The minimum effective refractive index (ERI) difference between the HE and EH modes corresponding to the same order OAM mode

exceeds  $3.04 \times 10^{-3}$  within the wavelength range 1.3–2.0  $\mu\text{m}$ . Here, the diameter of the hollow core is 5.6  $\mu\text{m}$ , the diameters of the first-ring, second-ring, and third-ring air holes in the cladding region are 2.67, 2.87, and 2.87  $\mu\text{m}$ , respectively, and the pitch of the air holes in the two outermost rings is set to 3.09  $\mu\text{m}$  (Figs. 3 and 4). The maximum ERI difference between the HE and EH modes reaches  $1.55 \times 10^{-2}$  (Fig. 5). Such a large ERI difference has not been previously achieved in a 10-mode OAM guiding fiber. Bending is known to induce modal birefringence (Fig. 7). When the bending radius is only 18 mm, the birefringence is less than  $5 \times 10^{-5}$  RIU, implying that the odd and even modes are not easily combined into an OAM.

**Conclusions** We have designed an annular, hollow-core photonic crystal fiber for vortex light transmission that exploits the flexible characteristics of PCF. The structural parameters were simulated in a finite element analysis method and the transmission characteristics of the orbital angular momentum modes in the PCF structure were analyzed. In this new design, the degeneracy lifting between the even and odd modes was limited to less than  $3.5 \times 10^{-7}$  by the size of the air holes. The  $n_{\text{eff}}$  values of the HE and EH modes are well separated by 1.55  $\mu\text{m}$ . In a theoretical analysis of the transmission characteristics of the first 10 vector modes, the number of allowable high-order vector modes was increased by adjusting the structural parameter (air-hole period) of the fiber. This strategy typified the early design of PCFs. More significantly, the proposed structure presented excellent bending-loss resistance. The simulations demonstrated that hollow-core PCFs ensure the stable and efficient transmission of multiple OAM modes when the bending radius is low (18 mm or less). The proposed PCF structure can potentially enhance the capacity of future optical communication systems.

**Key words** fiber optics; photonic crystal fiber; vortex light; vector mode; bending loss

**OCIS codes** 060.2330; 060.5295; 060.2605