

文章编号: 1005-5630(2022)04-0073-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.004.010

# 基于光子晶体光纤的轨道角动量模式的产生

曹家帅, 贾宏志

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 为了让光纤中产生轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 模式更加集成化, 提出了一种利用光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 产生轨道角动量模式的方法。通过设计特殊的 PCF, 使其本征模的奇偶模传输速度不同, 在传输一段距离后形成  $\pi/2$  相位差, 从而产生 OAM 模式。该 PCF 由中心空气孔、二氧化硅环形层和外包层构成, 其中外包层由两层圆形空气孔组成, 每层圆的数目为  $2n+2$  个, 对应产生  $n$  阶 OAM 模式。采用有限元法对所设计光纤进行了三维数值仿真分析, 成功产生了 +2、+3、+4、+5 阶 OAM 模式。该 PCF 产生 OAM 模式的方法, 满足了未来光纤通信系统集成化、小型化的趋势, 在全光纤模分复用系统中有着潜在的应用前景。

**关键词:** 光子晶体光纤; 轨道角动量; 光纤通信

**中图分类号:** TN 252 **文献标志码:** A

## Generation of orbital angular momentum mode based on photonic crystal fiber

CAO Jiashuai, JIA Hongzhi

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

**Abstract:** In order to make the orbital angular momentum (OAM) mode generated in the optical fiber more integrated, a method to generate the orbital angular momentum mode using photonic crystal fiber (PCF) is proposed. By designing a special PCF, the transmission speeds of the eigenmodes of the odd and even modes are different, and thus a  $\pi/2$  phase difference is formed after transmission for a certain distance to produce an OAM mode. The PCF is composed of a central air hole, a silica ring layer and an outer cladding layer. The outer cladding layer is composed of two layers of circular air holes. The number of circles in each layer is  $2n+2$ , corresponding to the  $n$ -order OAM mode. The finite element method was used to carry out three-dimensional numerical simulation analysis of the designed optical fiber, and the +2, +3, +4, and +5 orders of OAM modes were successfully generated. The PCF method for generating OAM modes meets the trend of future integration and miniaturization for optical fiber communication systems, and has potential

收稿日期: 2021-12-31

作者简介: 曹家帅 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光纤通信。E-mail: 1974991665@qq.com

通信作者: 贾宏志 (1968—), 男, 教授, 研究方向为光学仪器、光纤光栅等。E-mail: hzjia@usst.edu.cn

application prospects in all-fiber mode division multiplexing systems.

**Keywords:** photonic crystal fiber; orbital angular momentum; optical fiber communication

## 引 言

近年来,国内外科研工作者着手于涡旋光束的研究工作。涡旋光束具有复杂的强度、相位和偏振特性,已经广泛应用于光学操控、传感、成像、材料处理、通信和量子信息等领域<sup>[1-10]</sup>。涡旋光束携带螺旋相位波前  $\exp(\pm il\phi)$ , 其中  $\phi$  是方位角,  $l$  是拓扑电荷数,  $l$  可取任意正、负的整数<sup>[11]</sup>。1992年, Allen 等<sup>[12]</sup> 通过实验研究发现具有螺旋相位因子  $\exp(\pm il\phi)$  的光束携带了  $l\hbar$  的轨道角动量 ( $\hbar$  是约化普朗克常数,  $\hbar=h/2\pi$ ,  $h$  为普朗克常数), 所以涡旋光束也被称为轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 光束。由于涡旋光束所有的本征模式都是正交的, 理论上无穷多个模式数目, 因此在应用于光通信时, 通过复用技术能显著提高频谱效率和通信容量<sup>[13]</sup>。

关于产生 OAM 模式, 各国科研工作者提出了众多解决方案。在自由空间中, 主要是在传统激光器的输出光路增加转换器的模式转换法, 转换器可以是螺旋相位板<sup>[11]</sup>、超材料<sup>[14]</sup>、柱透镜对<sup>[15]</sup>、相位全息图<sup>[16]</sup> 和  $q$  板<sup>[17]</sup> 等。在光纤中, 产生 OAM 模式的光纤器件主要有以下四种: 光纤耦合器、光纤端面微加工、多相干光束叠加、光纤光栅。例如: 2011年, Yan 等<sup>[18]</sup> 设计了一种光纤耦合器, 将厄米-高斯光束注入环形纤芯周围的四个圆形单模纤芯内, 在环形纤芯中产生 OAM 模式。2016年, Vayalamkuzhi 等<sup>[19]</sup> 在光纤末端刻蚀出“叉”型光栅和螺旋相位板, 都产生了携带螺旋相位的 OAM 光束。2012年, Yan 等<sup>[20]</sup> 提出了多相干光束叠加法, 产生了 99% 纯度、 $l=1, 2$  和 3 的 OAM 模式。2016年, Zhao 等<sup>[21]</sup> 使用  $\text{CO}_2$  激光, 在二模光纤上制备了长周期光纤光栅, 产生了  $\text{OAM}_{\pm 1}$  模式。然而, 螺旋相位板的缺点是需要加工出纳米级的螺旋面, 这导致制作成本高, 且只能产生一种 OAM 光束; 柱透镜对需要对透镜进行精细的加工, 严格地控制透

镜之间的距离, 不能灵活使用;  $q$  板、超材料和相位全息图的集成化程度低。光纤耦合器和多相干光束叠加需要严格地控制注入光束的相位和偏振态; 光纤端面微加工法对光纤端面微加工的要求非常高; 还有基于光纤光栅的全光纤轨道角动量产生器件, 在奇模与偶模进行  $\pi/2$  相位差叠加时, 采用外加压力和偏振控制器的方法, 不利于光纤的集成化、小型化。而使用可灵活设计的光子晶体光纤产生轨道角动量模式正好满足未来光纤通信系统的集成化趋势。

本文提出了一种基于光子晶体光纤产生 OAM 模式的全光纤轨道角动量产生器件。该光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 由最中心空气孔、二氧化硅环形层和外包层构成, 其中外包层由两层圆形空气孔组成, 每层圆的数目为  $2n+2$  个, 对应产生  $n$  阶 OAM 模式。利用 PCF 固有特性, 在设计的光纤端面输入  $\text{HE}_{4,1}$  奇模与  $\text{HE}_{4,1}$  偶模, 在传输  $11.13 \mu\text{m}$  后形成  $\pi/2$  相位差, 产生了 +3 阶 OAM 模式。同样地, 对包层圆的参数及数目进行调节后, 产生了 +2、+4、+5 阶 OAM 模式, 成功证明了所设计的 PCF 产生 OAM 模式的可行性。

## 1 PCF 设计和原理

通过有限元分析软件 COMSOL 对设计的 PCF 进行三维数值仿真分析, 在输入面添加端口 1、端口 2, 光纤周围及末端分别添加散射边界条件和完美匹配层 (PML) 吸收出射波。图 1 为其二维横截面图。PCF 的中心是充满空气的大孔, 周围是二氧化硅 ( $\text{SiO}_2$ ) 环形层, 外包层由 2 层圆形空气孔构成, 每层圆的数目为 8 个, 背景材料为  $\text{SiO}_2$ , 在  $1.55 \mu\text{m}$  处折射率  $n$  为 1.444。PCF 的中心空气孔、圆环、光纤整体的半径分别用  $R_0$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  表示, 参数设置为  $R_0=0.5 \mu\text{m}$ ,  $R_1=1.5 \mu\text{m}$ ,  $R_2=7 \mu\text{m}$ 。外包层 2 层圆形空气孔中心到中心空气孔中心的距离分别用  $L_1$ 、 $L_2$  表

示, 参数设置为  $L_1=2.5 \mu\text{m}$ ,  $L_2=5 \mu\text{m}$ 。另外, 包层每层圆形空气孔的直径分别设置为  $d_1=1.8 \mu\text{m}$ ,  $d_2=3.6 \mu\text{m}$ 。

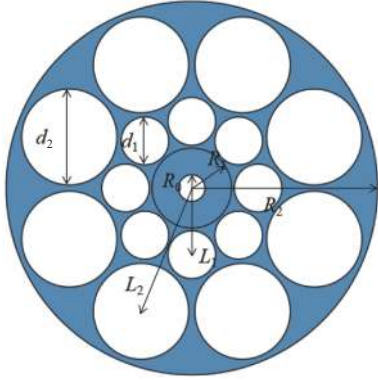


图1 二维光纤结构横截面图及结构参数

Fig. 1 Cross-sectional view of two-dimensional optical fiber structure and structural parameters

在光纤中, 轨道角动量模式可以用拓扑电荷  $l$ 、径向指数  $m$ 、偏振方向和螺旋前端方向来表示。偏振方向通常用上标表示, 螺旋前端方向通常用下标表示。因此, OAM 模式可以表示为  $\text{OAM}_{\pm l, m}^{\pm \sigma}$ 。OAM 模式可以由光纤中同阶矢量模的奇模与偶模叠加而成<sup>[22]</sup>:

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

式中:  $\sigma=1$  是自旋角动量, 即光的偏振态,  $+\sigma$  表示左旋圆偏振态,  $-\sigma$  表示右旋圆偏振态;  $\pm j$  表示 HE 或 EH 的奇偶模叠加时具有  $\pm\pi/2$  的相位差<sup>[23]</sup>。叠加产生的 OAM 模式具有圆偏振特性, 所以 OAM 模式既有轨道角动量也有自旋角动量。其中由  $\text{HE}_{l+1, m}$  奇偶模式叠加而成的 OAM 模式, 轨道角动量与自旋角动量方向一致, 每个光子有  $(l+1)\hbar$  的总角动量。而由  $\text{EH}_{l-1, m}$  奇偶模式叠加而成的 OAM 模式, 其轨道角动量与自旋角动量方向相反, 每个光子有  $(l-1)\hbar$  的总角动量<sup>[23]</sup>。当拓扑电荷  $l=0$  时, 由  $\text{HE}_{1, m}$  奇偶模叠加产生的模式, 没有螺旋状相位结构, 轨道角动量值为 0, 只表现左、右旋圆偏振态, 对应为二重简并。当  $|l| \geq 1$  时, 存在 4 个相位涡旋模式, 即顺时针和逆时针螺旋相位、左旋和右旋圆偏振态, 此时对应为四重简并。此外, 光纤中定义简并的奇偶模式具有随机性<sup>[24]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 产生的 OAM 模式

本文通过在包层设置特定个数的圆形空气孔, 对光纤引入空间扰动因素, 来打破光纤的圆形对称性, 使奇偶模传输速度不同<sup>[25]</sup>。PCF 中  $\text{HE}_{4,1}$  的奇偶模传输速度不同, 在传输一段距离后产生  $\pi/2$  相位差, 叠加后形成 +3 阶 OAM 模式。利用 COMSOL 软件对所设计的 PCF 进行三维数值仿真研究。图 2 (a) 所示为在输入端面输入的  $\text{HE}_{4,1}$  奇偶模的电场强度图, 以及在产生  $\pi/2$  相位差后形成的 +3 阶 OAM 模式电场强度图。图 2 (b) 所示为在输入端面输入的  $\text{HE}_{4,1}$  奇偶模的相位图, 奇偶模存在  $\pi/6$  的角向相位差, 在经过一小段距离后产生了螺旋状的相位结构, 相位变化为  $6\pi$ , +3 阶 OAM 模式产生, 这与之前的文献报道相同<sup>[26]</sup>。

### 2.2 产生距离

本文数值仿真所用二氧化硅的折射率由 Sellmeier 公式表示<sup>[27]</sup>:

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

式中:  $A_1=0.6961663$ ,  $A_2=0.4079426$ ,  $A_3=0.8974794$ ,  $B_1=0.0684043$ ,  $B_2=0.1162414$ ,  $B_3=9.896161$ 。

PCF 中本征模的奇偶模传输速度不同, 产生的相位差与传播距离相关, 可由以下公式表示<sup>[28]</sup>:

$$L_{\pi/2} = \frac{\lambda}{4(n_{\text{eff}}^{\text{odd}} - n_{\text{eff}}^{\text{even}})} \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为真空中的波长;  $n_{\text{eff}}^{\text{odd}}$  和  $n_{\text{eff}}^{\text{even}}$  分别为本征模奇模、偶模的有效折射率。图 3 所示为输入的  $\text{HE}_{4,1}$  奇偶模有效折射率及产生 OAM 模式距离  $L$  与波长的关系。图中  $\text{HE}_{4,1}$  奇偶模有效折射率是两条近乎平行的线段, 随着波长的增大而缓慢减小。与之相反, 产生 OAM 模式的长度  $L$  随着波长的增大而增大。

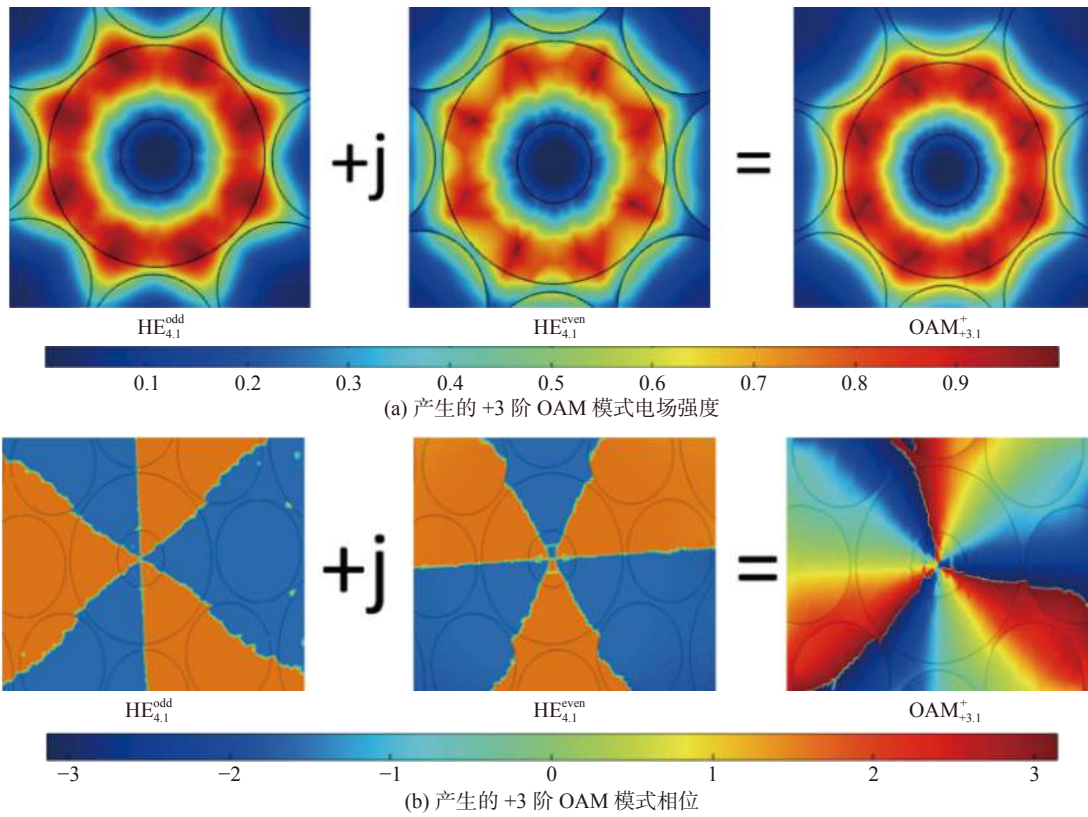


图 2 电场强度及相位图

Fig. 2 Electric field intensity and phase diagram

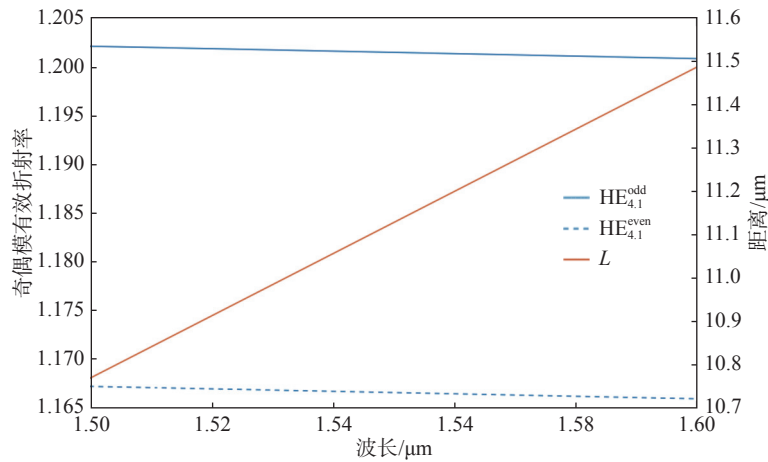


图 3  $\text{HE}_{4,1}$  奇偶模有效折射率及产生 OAM 模式距离与波长的关系图

Fig. 3 The effective refractive index of  $\text{HE}_{4,1}$  odd and even modes, as well as generated OAM mode distance, as a function of wavelength

### 2.3 第二层气孔的影响

对 PCF 的第二层空气孔大小与产生 OAM 模式距离进行讨论, 其他结构参数及材料不变。图 4 为产生 OAM 模式距离在  $d_2$  变化的条件下与波长之间的关系。图中 5 条线段几乎平行, 产

生 OAM 模式距离随着波长的增大而增大,  $d_2$  为  $3.6 \mu\text{m}$  时, 产生 OAM 模式距离略大一些,  $d_2$  为  $2 \sim 3.2 \mu\text{m}$  时, 产生 OAM 模式距离几乎相等, 整体表明了第二层空气孔大小对 OAM 模式产生距离影响不大, 可以容纳一定的制造公差。

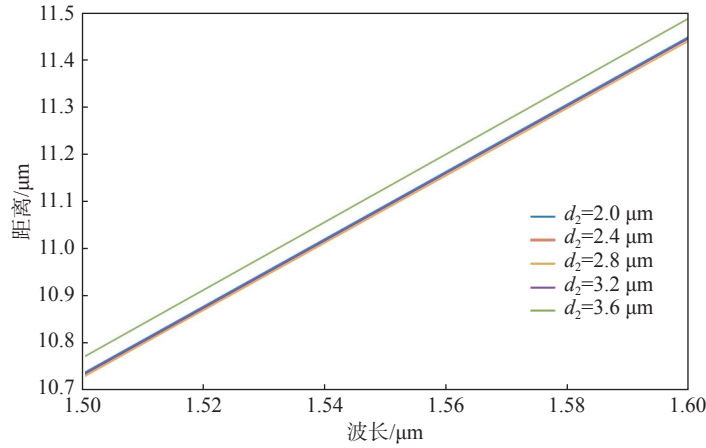


图 4 产生 OAM 模式距离在  $d_2$  变化时与波长的关系图

Fig. 4 The relationship between the distance and wavelength of the OAM mode when  $d_2$  changes

限制损耗 ( $L_C$ ) 是光纤的重要特性之一。光束在环芯传输时, 不可避免地会向包层泄漏。 $L_C$  可以用有效折射率的虚部来计算<sup>[29]</sup>:

$$L_C = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{20}{\ln(10)} \text{Im}(N_{\text{eff}}) \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  是真空中波长;  $\text{Im}(N_{\text{eff}})$  是有效折射率的虚部。

图 5 为  $1.55 \mu\text{m}$  波长下,  $d_2$  与 OAM 模式产生距离和限制损耗的关系图。 $d_2$  为  $2 \sim 3.6 \mu\text{m}$  时, 产生 OAM 模式距离波动范围很小。限制损耗的范围为  $10^0 \sim 10^2 \text{ dB/m}$ , 当  $d_2=0 \mu\text{m}$  时, 限制损耗为  $5130 \text{ dB/m}$ , 可见第二层空气孔变大时, 限制损耗总体呈变小趋势。由于本文设计的 PCF 产生 OAM 模式所需光纤长度较短, 即使限制损耗很大, 依然能产生 OAM 模式。

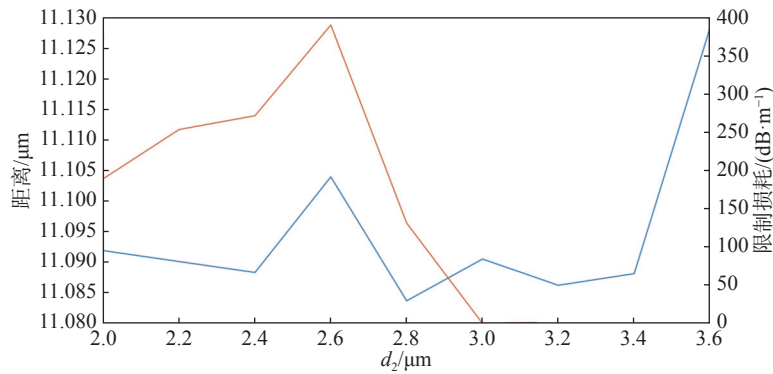


图 5  $1.55 \mu\text{m}$  处, 产生 OAM 模式距离和限制损耗与  $d_2$  的关系图

Fig. 5 The OAM mode generation distance and confinement loss, as a function of  $d_2$  at  $1.55 \mu\text{m}$

### 2.4 环形层折射率的影响

将环形层换成折射率高的 BAK4 材料, 其他结构参数不变的情况下, 讨论产生 OAM 模式所需长度  $L$  的变化。根据肖特光学玻璃数据表, BAK4 的折射率由 Sellmeier 公式表示:

$$n^2(\lambda) - 1 = \frac{D_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{D_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{D_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3} \quad (5)$$

式中:  $D_1=1.28834642$ ,  $D_2=0.132817724$ ,

$D_3=0.945395373$ ,  $C_1=0.00779980626$ ,  $C_2=0.0315631177$ ,  $C_3=105.965875$ 。

图 6 所示为输入的  $\text{HE}_{4,1}$  奇偶模有效折射率及产生 OAM 模式距离  $L$  与波长的关系图。图中  $\text{HE}_{4,1}$  奇偶模有效折射率是两条近乎平行的线段, 随着波长的增大而缓慢地减小, 与二氧化硅材料相比, 输入的本征模折射率更高。BAK4 材料产生 OAM 模式所需距离要比二氧化硅更长。

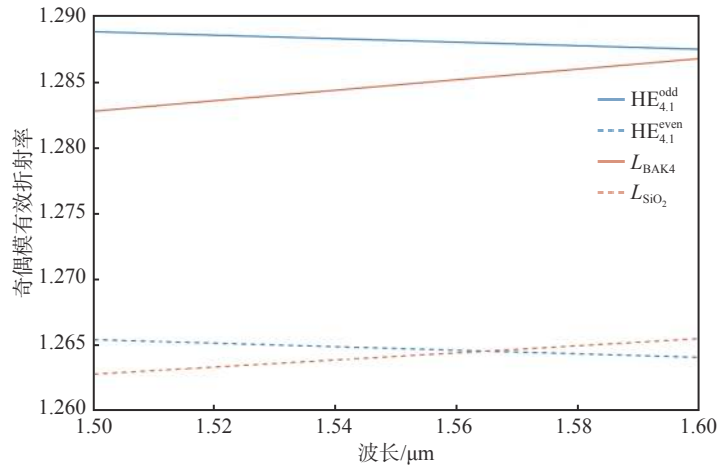


图 6 HE<sub>4,1</sub> 奇偶模有效折射率及产生 OAM 模式距离与波长的关系图

Fig. 6 The effective refractive index of HE<sub>4,1</sub> odd and even modes, as well as generated OAM mode distance, as a function of wavelength

### 2.5 其他阶数 OAM 模式产生

为了验证本文提出的 PCF 产生 OAM 模式具有普遍性，以二氧化硅为基底材料，只对光纤的结构参数进行调整分析。由于有限元软件 COMSOL 在进行三维数值仿真分析时计算量太大，为此设计的光纤结构普遍较小。表 1 是 PCF 的结构参数以及在 1.55  $\mu\text{m}$  处产生  $\pi/2$  相位

差时，产生的 OAM 模式距离为 6.93~13.17  $\mu\text{m}$ 。图 7 (a)~7(c) 分别表示输入端面输入的 HE<sub>3,1</sub>、HE<sub>5,1</sub>、HE<sub>6,1</sub> 奇偶模的相位图，奇偶模分别存在  $\pi/4$ 、 $\pi/8$ 、 $\pi/10$  的角向相位差，在经过一小段距离后产生了螺旋状的相位结构，相位变化分为  $4\pi$ 、 $8\pi$ 、 $10\pi$ ，对应产生了 +2、+4、+5 阶 OAM 模式，成功证明了所设计的 PCF 产生 OAM 模式具有普遍性。

表 1 生成各阶 OAM 模式的光纤结构参数及产生距离

Tab. 1 Fiber structure parameters and generation distance of each order OAM mode

阶数	$R_0/\mu\text{m}$	$R_1/\mu\text{m}$	$R_2/\mu\text{m}$	$L_1/\mu\text{m}$	$L_2/\mu\text{m}$	$d_1/\mu\text{m}$	$d_2/\mu\text{m}$	$n_{\text{eff}}^{\text{odd}}$	$n_{\text{eff}}^{\text{even}}$	$L/\mu\text{m}$
2	0.2	1	7.6	1.9	4.9	1.8	4.8	1.124624	1.068755	6.93
3	0.5	1.5	7	2.5	5	1.8	3.6	1.201495	1.166674	11.13
4	1	2	7	2.8	4.8	1.6	2.8	1.205164	1.17574	13.17
5	1	2.1	6	2.8	4.5	1.4	2.2	1.137505	1.10548	12.10

## 3 结 论

提出了一种基于 PCF 产生 OAM 模式的全光纤轨道角动量产生器件。在外包层每层设置  $2n+2$  个圆形气孔，对应产生  $n$  阶 OAM 模式。利用 COMSOL 软件对所设计的 PCF 进行三维数值仿真研究。结果表明，第二层气孔对产生 OAM 模式距离影响不大，但是能降低光纤的限制损耗，环形层材料折射率变高时，产生 OAM 模式需要的距离变长。在传输一小段距离

后分别产生了 +2、+3、+4、+5 阶 OAM 模式，成功证明了所设计的 PCF 产生 OAM 模式的可行性。当光纤中的基模通过光纤光栅产生高阶模后，本文所设计的 PCF 可替代偏振控制器和压力等，利用自身特性对高阶模的奇偶模引入  $\pi/2$  相位差，进而产生 OAM 模式。尽管本文的工作主要是模拟仿真，但近几年光子晶体光纤的制作工艺日渐成熟，TANDJÉ 等<sup>[30]</sup> 采用堆叠和拉伸的方法制作了光子晶体光纤，其结构与本文设计的结构类似，采用相同的工艺制作本文设计的光子晶体光纤也是完全可行的。利用 PCF 产

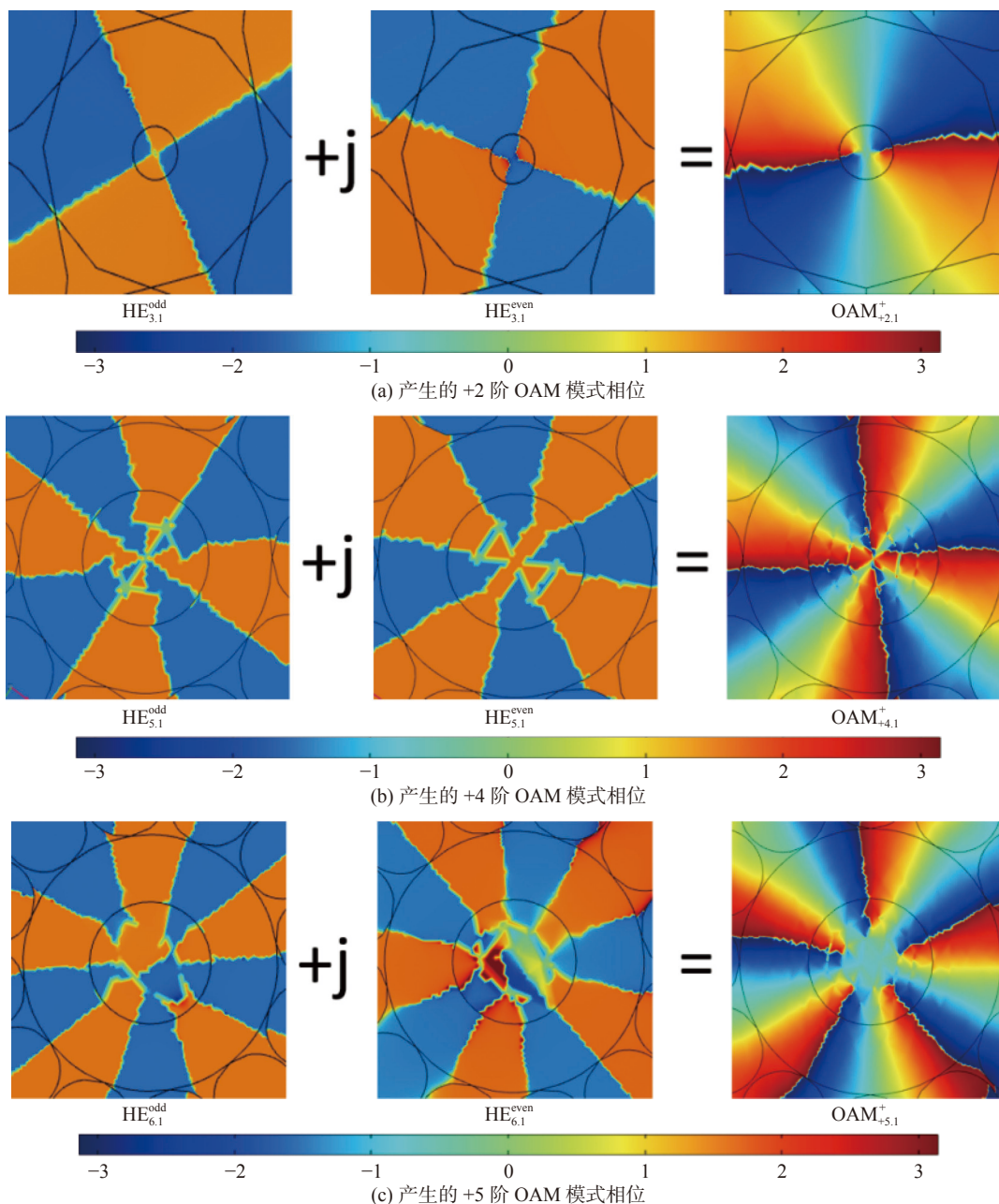


图 7 产生的 OAM 光束相位图

Fig. 7 Phase of generated OAM beam

生 OAM 模式的方法, 能满足未来光纤通信系统集成化、小型化的趋势, 在全光纤轨道角动量模式产生系统中有着潜在的应用前景。

参考文献:

[ 1 ] PADGETT M, BOWMAN R. Tweezers with a twist[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 343 – 348.  
 [ 2 ] QIU X D, LI F S, ZHANG W H, et al. Spiral phase

contrast imaging in nonlinear optics: seeing phase objects using invisible illumination[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 208 – 212.

[ 3 ] LAVERY M P J, SPEIRITS F C, BARNETT S M, et al. Detection of a spinning object using light’s orbital angular momentum[J]. *Science*, 2013, 341(6145): 537 – 540.  
 [ 4 ] WANG J, YANG J Y, FAZAL I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7):

- 488 – 496.
- [ 5 ] 殷亮, 张大伟, 洪瑞金. 振幅调控双曲余弦高斯涡旋光束的聚焦特性[J]. *光学仪器*, 2015, 37(6): 509 – 512.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] WANG J. Advances in communications using optical vortices[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(5): B14 – B28.
- [ 8 ] WANG J. Data information transfer using complex optical fields: a review and perspective[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(3): 030005.
- [ 9 ] NI J C, WANG C W, ZHANG C C, et al. Three-dimensional chiral microstructures fabricated by structured optical vortices in isotropic material[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(7): e17011.
- [10] WANG X L, CAI X D, SU Z E, et al. Quantum teleportation of multiple degrees of freedom of a single photon[J]. *Nature*, 2015, 518(7540): 516 – 519.
- [11] YAO A M, PADGETT M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161 – 204.
- [12] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physics Review A*, 1992, 45(11): 8185 – 8189.
- [13] 衡小波. 高纯度全光纤轨道角动量模式产生及激光研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [14] YU N F, GENEVEY P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333 – 337.
- [15] BEIJERSBERGEN M W, ALLEN L, VAN DER VEEN H E L O, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. *Optics Communications*, 1993, 96: 123 – 132.
- [16] BAZHENOV V Y, VASNETSOV M V, SOSKIN M S. Laser beams with screw dislocations in their wavefronts[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1990, 24: 951 – 962.
- [17] OEMRAWSINGH S S R, VAN HOUWELINGEN J A W, ELIEL E R, et al. Production and characterization of spiral phase plates for optical wavelengths[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(3): 688 – 694.
- [18] YAN Y, WANG J, ZHANG L, et al. Fiber coupler for generating orbital angular momentum modes[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(21): 4269 – 4271.
- [19] VAYALAMKUZHI P, BHATTACHARYA S, EIGENTHALER U, et al. Direct patterning of vortex generators on a fiber tip using a focused ion beam[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2133 – 2136.
- [20] YAN Y, YUE Y, HUANG H, et al. Efficient generation and multiplexing of optical orbital angular momentum modes in a ring fiber by using multiple coherent inputs[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3645 – 3647.
- [21] ZHAO Y H, LIU Y Q, ZHANG L, et al. Mode converter based on the long-period fiber gratings written in the two-mode fiber[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6186 – 6195.
- [22] 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.
- [23] 李树辉. 轨道角动量及其在光通信中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [24] CHEN S, WANG J. Theoretical analyses on orbital angular momentum modes in conventional graded-index multimode fibre[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 3990.
- [25] HUANG W, LIU Y G, WANG Z, et al. Generation and excitation of different orbital angular momentum states in a tunable microstructure optical fiber[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33741 – 33752.
- [26] CHEN C, ZHOU G Y, ZHOU G, et al. A multi-orbital-angular-momentum multi-ring micro-structured fiber with ultra-high-density and low-level crosstalk[J]. *Optics Communications*, 2016, 368: 27 – 33.
- [27] AGRAWAL G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2001: 195 – 211.
- [28] YUE Y, YAN Y, AHMED N, et al. Mode properties and propagation effects of optical orbital angular momentum (OAM) modes in a ring fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(2): 535 – 543.
- [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*, 2019, 36(4): 533 – 539.
- [30] TANDJÈ A, YAMMINE J, DOSSOU M, et al. Ring-core photonic crystal fiber for propagation of OAM modes[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(7): 1611 – 1614.

(编辑: 张 磊)