

## 轨道角动量模传输的圆环形光子晶体光纤

白秀丽<sup>1,2</sup>, 陈鹤鸣<sup>1</sup>, 张凌菲<sup>1</sup>

- (1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023;
2. 南京晓庄学院 电子工程学院, 江苏 南京 211171)

**摘要:** 设计了一种新型轨道角动量模传输的圆环形光子晶体光纤, 包层为排列有序的矩形空气孔围绕纤芯呈圆形排列, 纤芯为大的空气孔, 中间环形高折射率区为光子轨道角动量传输区。利用基于有限元法的 COMSOL Multiphysics 软件进行仿真分析, 对光子轨道角动量模式在光纤中的传输特性进行了详细讨论。结果表明, 该结构可实现 1.2~2.0  $\mu\text{m}$  波段 50 个轨道角动量模式的有效分离和稳定传输, 简并模式的有效折射率差大于  $10^{-4}$ , 保证了每个模式的稳定传输; 限制损耗仅为  $10^{-9} \text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$ , 非线性系数低至  $0.833 \text{km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 。该光纤可以应用于模分复用系统, 将大大提高通信系统容量和频谱效率。

**关键词:** 轨道角动量模; 光子晶体光纤; 色散; 限制损耗; 非线性系数

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0222002

## Circular photonic crystal fiber supporting orbital angular momentum modes transmission

Bai Xiuli<sup>1,2</sup>, Chen Heming<sup>1</sup>, Zhang Lingfei<sup>1</sup>

- (1. College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;
2. School of Electronic Engineering, Nanjing Xiao Zhuang University, Nanjing 211171, China)

**Abstract:** A new type of circular photonic crystal fiber supporting orbital angular momentum was proposed. The designed circular photonic crystal fiber is composed of well-ordered rectangular air hole rings in the cladding, a large air-core in the center and the annular high-index region for orbital angular momentum modes transmission. Utilizing the COMSOL Multiphysics software based on the finite element method, propagation properties of orbital angular momentum modes in fibers were discussed in detail. The results show that the designed circular photonic crystal fiber realizes effective segregation and stable transmission of 50 orbital angular momentum modes over the bandwidth from 1.2  $\mu\text{m}$  to 2.0  $\mu\text{m}$ . Large effective index differences ( $>10^{-4}$ ) guarantee the stable transmission of every mode, confinement losses are lower than  $10^{-9} \text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$ , and nonlinear coefficients are as low as  $0.833 \text{km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ . The proposed rectangular holes circular photonic crystal fiber applied in mode-division multiplexing fiber communication systems might greatly improve channel capacity and spectral efficiency.

**Key words:** orbital angular momentum modes; photonic crystal fiber; dispersion; confinement loss; nonlinear coefficient

收稿日期: 2018-09-05; 修订日期: 2018-10-03

基金项目: 国家自然科学基金(61077084, 61571237); 江苏省自然科学基金(BK20151509);  
江苏省研究生科研创新计划(KYLX15\_0835, KYCX18\_0843)

作者简介: 白秀丽(1983-), 女, 博士生, 主要从事光子轨道角动量光纤通信方面的研究。Email: baixl1983@163.com

导师简介: 陈鹤鸣(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信技术、信息光电子技术和光波技术方面的研究。Email: chhm@njupt.edu.cn

## 0 引言

OAM 光束具有螺旋相位波前  $\exp(\pm il\phi)$  ( $l$  是拓扑荷,  $\phi$  是方位角), 理论上可取无穷多个彼此正交的模式<sup>[1-2]</sup>, 而且由于 OAM 是光纤的本征模, 所以模式之间的隔离度更好, 减少了模式耦合, 从而可避免使用复杂的 MIMO 技术<sup>[3]</sup>。因此采用基于光纤中光子轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 的模式复用技术可以同时复用/解复用任意数目的模式, 在提高光通信容量方面具有很大潜力, 已经引起了广泛的关注<sup>[4]</sup>。但 OAM 模的缺点是在传统光纤中不能稳定存在, 需要设计特殊的光纤结构来支持 OAM 的传输。因此, 设计支持更多个 OAM 模式传输的光纤结构具有重要研究价值。

科学工作者对各种不同结构的 OAM 传输光纤进行了研究, 较早提出的用于传输 OAM 模式的光纤有环形光纤, 逆抛物线梯度折射率分布的少模光纤和空气芯光纤等<sup>[5-7]</sup>。但是, 这些 OAM 传输光纤没有足够的可调参数来保证 OAM 模式良好的特性, 而且大都需要精确地掺杂来获得高的折射率差, 故支持的 OAM 模式数较少。光子晶体光纤结构参数灵活可调, 具有大模场面积、损耗低、非线性和色散可调节等特性, 用于传输 OAM 模式时可有效控制其传输特性。最早提出利用光子晶体光纤传输 OAM 的是 Yue Y 等<sup>[8]</sup>, 设计的基于  $AS_2S_3$  的环形光子晶体光纤实现了高的折射率差, 但由于包层仍为六角对称结构, 支持的 OAM 模式数只有两个, 且损耗和色散都较大。2012 年, Wong 等<sup>[9]</sup>将光子晶体光纤进行扭转, 通过调节光子晶体光纤的扭转率来控制 OAM 传输的色散、非线性等特性。2016 年, 张羚翔等<sup>[10]</sup>设计的环形光子晶体光纤, 可传输  $OAM_{1,1}$  模式, 且具有传输损耗小、色散平坦等特性, 同年 Hu<sup>[11]</sup>和 Tian<sup>[12]</sup>等分别提出了圆环形光子晶体光纤结构 (C-PCF), 该结构的圆环形 OAM 传输区的设计与 OAM 模场分布匹配地很好, 能稳定传输的 OAM 模式数最多达到 26 个。然而, 文献中 C-PCF 结构传输 OAM 模式的数量偏少, 性能有待改进。

文中提出了一种矩形孔圆环形光子晶体光纤 (RC-PCF), 利用 COMSOL Multiphysics 软件进行仿真分析。结果表明设计的 RC-PCF 可实现  $1.2\sim 2.0\ \mu\text{m}$

波段 50 个 OAM 模式的有效分离和稳定传输, 是目前为止所设计的光子晶体光纤中传输模式数最多的一种结构, 而且每个模式具有平坦的色散特性、低的限制损耗和小的非线性系数。该光纤对于 OAM 通信, 提高光通信容量具有重要价值<sup>[13]</sup>。

## 1 结构模型及 OAM 模式分析

### 1.1 OAM 传输光纤的结构设计

特殊的光纤结构设计首先要具有环形折射率分布, 以实现环状模场分布的 OAM 模式的传输; 其次要有大的折射率差 ( $>10^{-4}$ ), 保证不同模式间不会耦合为 LP 模<sup>[14]</sup>。为满足上述要求, 文中提出了一种特殊结构的 RC-PCF, 如图 1 所示, 图中灰色区域为空气, 紫色区域为高折射率材料。该结构的包层由四层围绕纤芯呈圆形分布的矩形空气孔组成, 纤芯为一大空气孔, 包层和纤芯之间的环形高折射率区用来传输 OAM 模式。包层设计为矩形空气孔时, 比包层为圆形空气孔时有更大的空气填充率, 通过合理调整包层空气孔的大小, 不需要额外的掺杂即可保证包层和环形高折射率区有大的折射率差; 而且包层矩形空气孔的圆形排列又可以阻止高阶模泄漏至包层。

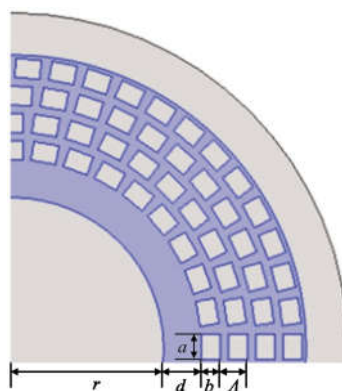


图 1 RC-PCF 的 1/4 横截面图及结构参数

Fig.1 1/4 cross section of the RC-PCF and structure parameters

基于以上的设计原则, 影响高折射率区中 OAM 模式数的主要结构参数有纤芯的半径  $r$ 、环形传输区宽度  $d$  和包层中矩形空气孔的占比  $b/A$ 。从图 2(a) 可以看出, 随着环形传输区宽度  $d$  的增加, OAM 模式数快速增加, 而损耗随之减小, 这是由于随着  $d$  的增加环形区域对 OAM 模式有更强的限制。当  $d > 1.8\ \mu\text{m}$

时,开始出现径向二阶( $m=2$ )OAM 模式,但为了简化 OAM 模式的复用和解复用,这里只考虑径向一阶( $m=1$ )的 OAM 模式。当  $1.4 \mu\text{m} \leq d \leq 1.8 \mu\text{m}$  时,该结构可支持的 OAM 模式数都较大且不会出现径向二阶,这也意味着传输区的宽度有较大的制作容差。图 2(b)显示,随着纤芯半径和占空比的增大 OAM 模式数增加迅速,当芯径  $r > 7.2 \mu\text{m}$ , 占空比  $b/\Lambda > 0.6$  时,OAM 模式数增加缓慢。因此,权衡以上结构参数对 OAM 模式数的影响以及制作工艺技术,经过大量优化仿真,最终设计的 RC-PCF 具体结构参数可选择如下:纤芯半径  $r=7 \mu\text{m}$ , 环形区域宽度  $d=1.8 \mu\text{m}$ , 各包层间距  $\Lambda=1.5 \mu\text{m}$ , 矩形空气孔长  $a=1.2 \mu\text{m}$ 、宽  $b=0.9 \mu\text{m}$ , 基底材料为二氧化硅( $\text{SiO}_2$ );包层中每一层的矩形孔数量分别为  $N_1=36$  (第 1 层),  $N_2=40$ (第 2 层),  $N_3=45$ (第 3 层),  $N_4=50$ (第 4 层)。

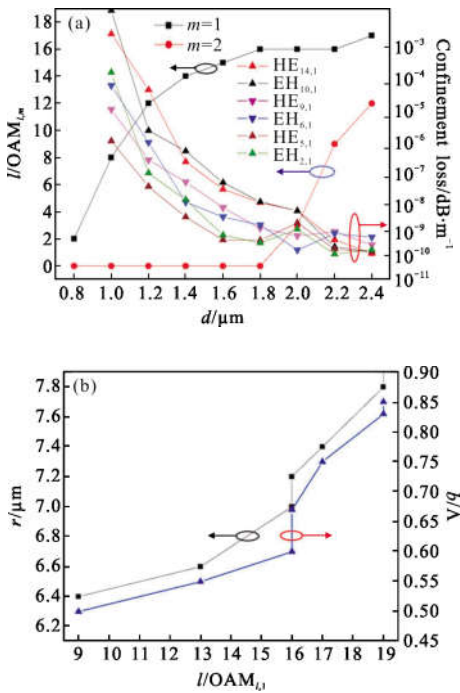


图 2 (a)OAM 模式数和限制损耗随波长的变化曲线;(b)OAM 模式数随纤芯半径和占空比的变化曲线

Fig.2 (a) Number of OAM modes and the confinement loss as a function of the wavelength; (b) number of OAM modes varies with the radius of fiber-core and the duty ratio

### 1.2 RC-PCF中可支持的 OAM 模式分析

在光纤中,将相位差为  $\pi/2$  的同一阶模式(HE 或 EH)的奇偶模线性叠加,即可得到 OAM 模式,具

体叠加方式如下<sup>[15]</sup>:

$$\text{OAM}_{\pm l, m}^{\pm} = \text{HE}_{l+1, m}^{\text{even}} \pm j \text{HE}_{l+1, m}^{\text{odd}} \quad (1)$$

$$\text{OAM}_{\pm l, m}^{\mp} = \text{EH}_{l-1, m}^{\text{even}} \pm j \text{EH}_{l-1, m}^{\text{odd}} \quad (2)$$

式中: $l$ 为拓扑荷; $m$ 为径向阶数,为了简化光纤中模分复用时的 OAM 模式的复用和解复用,可取  $m=1$ 。如图 3 所示, $l=1$  时对应的  $\text{OAM}_{\pm 1, 1}$ ,有相同的圆偏振和旋转方向,只能作为两个信息态,而拓扑荷  $l \geq 2$  的 OAM 模具有同向和反向的偏振和旋转方向,这就产生了 4 个独立的信息态<sup>[15]</sup>。因此每一个  $\text{OAM}_{\pm l, m}^{\pm}$  ( $l \geq 2$ ) 模式群组包含 4 个 OAM 态,在光纤通信中,每一个 OAM 态都可以作为一个独立的信道来传输信息。通过对 RC-PCF 结构的优化仿真,本征模  $\text{HE}_{14, 1}$  和  $\text{EH}_{12, 1}$  ( $l=13$ ) 在  $1.2 \mu\text{m}$  波长处折射率差最小为  $3.84 \times 10^{-4}$ , 而本征模  $\text{HE}_{l+1, 1}$  和  $\text{EH}_{l-1, 1}$  ( $l > 13$ ) 的折射率差在  $1.3 \mu\text{m}$  波长处开始小于  $10^{-4}$ , 故模式数大于 13 的本征模不能合成为 OAM 模。因此,RC-PCF 在整个  $1.2 \sim 2.0 \mu\text{m}$  波段可稳定支持 OAM 传输的本征模  $\text{HE}_{l+1, 1}$  和  $\text{EH}_{l-1, 1}$  的模式阶数  $l=2 \sim 13$ , 可合成 12 个  $\text{OAM}_{\pm l, 1}^{\pm}$  模式群组。12 个  $\text{OAM}_{\pm l, 1}^{\pm}$  模式群组(每个  $\text{OAM}_{\pm l, 1}^{\pm}$  包含 4 个 OAM 态)和  $\text{OAM}_{\pm 1, 1}$  ( $\text{HE}_{2, 1}$ ) 共同组成了 50 个 OAM 模态。因此,在模分复用系统中利用 OAM 模态作为模分复用的信息态时,RC-PCF 总共可支持 50 个独立的信息态。

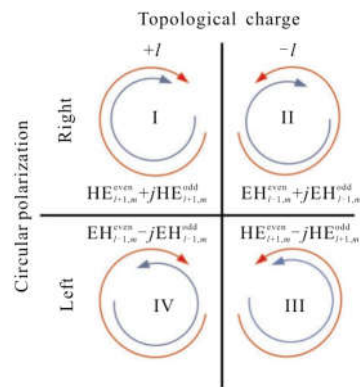


图 3 4 个 OAM 模简并态<sup>[15]</sup>

Fig.3 Four OAM mode degeneracies<sup>[15]</sup>

图 4 所示分别为波长为  $1.55 \mu\text{m}$  时,  $\text{HE}_{14, 1}$ ,  $\text{EH}_{10, 1}$ ,  $\text{HE}_{9, 1}$ ,  $\text{EH}_{5, 1}$ ,  $\text{HE}_{3, 1}$  本征模的电场强度分布和  $E_z$  方向的场强分布。从图 4 中可以看出,这些模式在高折射率环形区域内稳定传输,但是从电场强度

分布很难分辨各阶本征模, 然而从  $E_z$  方向的场强分布可清晰地辨别出各阶模式, 而且 HE 模式分布

在环形区域的外边界, EH 模式分布在环形区域的内边界。

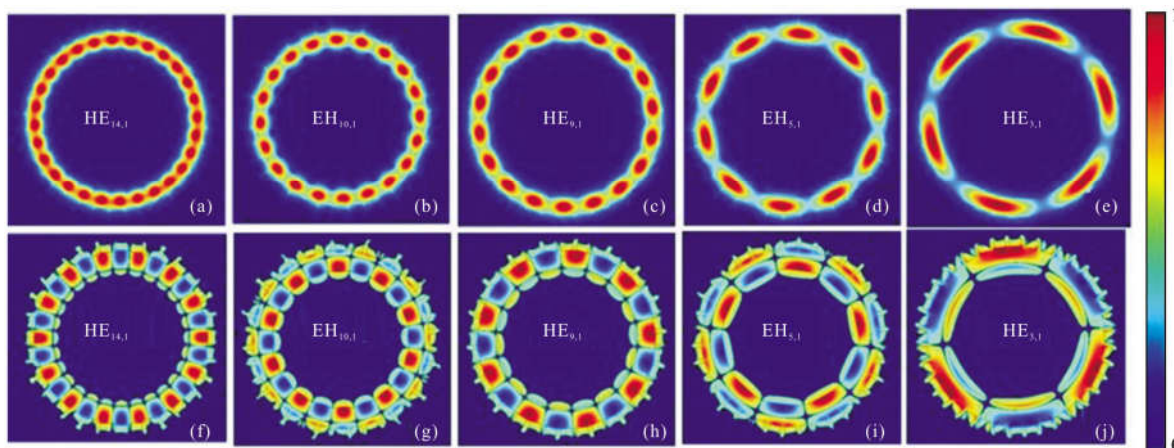


图 4 (a)~(e)为  $HE_{14,1}, EH_{10,1}, HE_{9,1}, EH_{5,1}$  和  $HE_{3,1}$  模式  $E_{nm}$  的电场强度分布; (f)~(j)为  $HE_{14,1}, EH_{10,1}, HE_{9,1}, EH_{5,1}$  和  $HE_{3,1}$  模式的  $E_z$  方向的电场分布

Fig.4 (a)~(e)  $E_{nm}$  field intensity of  $HE_{14,1}, EH_{10,1}, HE_{9,1}, EH_{5,1}$  and  $HE_{3,1}$  modes; (f)~(j)  $E_z$  field intensity of  $HE_{14,1}, EH_{10,1}, HE_{9,1}, EH_{5,1}$  and  $HE_{3,1}$  modes

由公式(1)和(2), 可以得到 HE 模和 EH 模合成的 OAM 模, 图 5 所示为合成的  $OAM_{13,1}, OAM_{11,1}, OAM_{8,1}, OAM_{6,1}$  和  $OAM_{2,1}$  模式的模场强度图和相位图。合成的 OAM 的模场都限制在环形传输区, 随着 OAM 模式阶数的增大, 环形模场的半径增大, 宽度减小, 但是从图 5(a)~(e)很难看出 OAM 环形模场半

径随模式阶数增大的趋势, 这是由于环形传输区的宽度较小, 模场半径变化又不明显, 因此单从模场图很难分辨出 OAM 模的拓扑荷数。然而如图 5(f)~(j) OAM 模式的相位图所示,  $OAM_{l,1}$  模式有  $2l\pi$  的相位变化<sup>[12]</sup>, 因此, 从其相位图上很容易确定 OAM 模式的拓扑荷数。

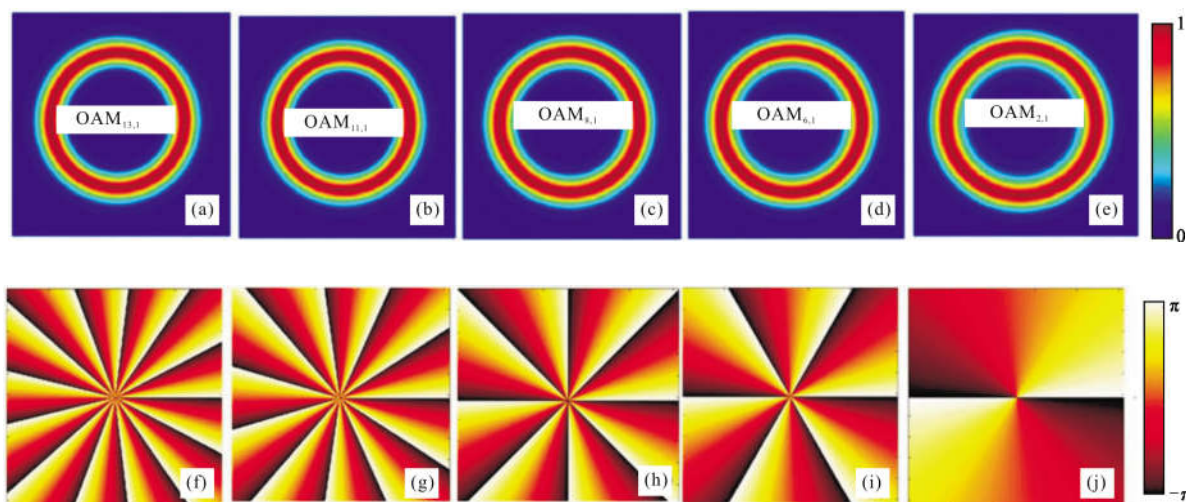


图 5 (a)~(e) 为合成的  $OAM_{13,1}, OAM_{11,1}, OAM_{8,1}, OAM_{6,1}$  和  $OAM_{2,1}$  模式的模场强度分布; (f)~(j) 为合成的  $OAM_{13,1}, OAM_{11,1}, OAM_{8,1}, OAM_{6,1}$  和  $OAM_{2,1}$  模式的相位图

Fig.5 (a)~(e) Field intensity of  $OAM_{13,1}, OAM_{11,1}, OAM_{8,1}, OAM_{6,1}$  and  $OAM_{2,1}$  modes; (f)~(j) phase of  $OAM_{13,1}, OAM_{11,1}, OAM_{8,1}, OAM_{6,1}$  and  $OAM_{2,1}$  modes

## 2 RC-PCF 中 OAM 的传输特性研究

RC-PCF 中要能够传输 OAM, 首要条件是光纤中的本征模  $HE_{l+1,1}$  与  $EH_{l-1,1}$  之间的有效折射率差要大于  $10^{-4}$ , 其次要使 OAM 在 RC-PCF 中能够稳定传输还必须满足: 低的限制损耗、相对平坦的色散系数、大的有效面积即尽可能小的非线性系数<sup>[12]</sup>。文中主要从这几个方面对 RC-PCF 中的 OAM 传输特性进行了分析。

### 2.1 有效折射率及有效折射率差

通过仿真计算可得到每个模式的有效折射率, 进而求得  $HE_{l+1,1}$  与  $EH_{l-1,1}$  之间的有效折射率差。光纤中的有效折射率可定义为以光强分布为权重的平均折射率, 随着波长的增加, 光束的场分布逐渐扩展到包层区域, 因此有效折射率减小。而且在多模光纤中, 高阶模式的光场更容易进入包层, 其有效折射率低于低阶模式。如图 6(a) 所示, 模式的有效折射率随

着波长的增大而减小, 波长越大, 模式的折射率下降得越快, 本征模式  $HE_{l+1,1}$  与  $EH_{l-1,1}$  分地越开, 即二者的折射率差越大, 因此光纤中本征模式的折射率差随着波长的增大而增大, 如图 6(b) 所示。由于包层微结构具有大的占空比, 使得包层与环形传输区域具有大的折射率差, 从而使得光纤中本征模式  $HE_{l+1,1}$  与  $EH_{l-1,1}$  的折射率差大于  $10^{-4}$ 。而且简并模式的阶数越低, 折射率差越大。如图 6(b) 所示,  $OAM_{13,1}$  的折射率差最小, 在波长  $1.2 \mu\text{m}$  处为  $3.84 \times 10^{-4}$ ,  $OAM_{2,1}$  的折射率差最大, 在波长  $2.0 \mu\text{m}$  处达到了  $7.69 \times 10^{-3}$ 。大的有效折射率差避免了 HE 模和 EH 模耦合为 LP 模, 减少了模间耦合, 保证了每个模式的独立稳定传输。

### 2.2 色散特性分析

光子晶体光纤的色散由材料色散和波导色散组成, 由于有限元计算的过程中已经将塞尔迈耶尔方程 (Sellmeier) 所给出的材料色散包含在内, 因此光子晶体光纤的总色散值  $D$  可以通过波长与有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的关系获得, 其表达式如下<sup>[16]</sup>:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2} \quad (3)$$

式中:  $c$  为真空中的光速;  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  为有效折射率的实部。

利用有限元法可得到光纤中模式的有效折射率, 然后通过公式 (3) 的计算, 并结合 MATLAB 软件可绘制出各本征模式的色散随波长的变化关系如图 7 所示。图中显示几个低阶模式 (即  $HE_{2-7,1}$  和  $EH_{1-5,1}$  模) 随波长的增大而减小, 其余的高阶模式 (即  $HE_{8-14,1}$  和  $EH_{6-12,1}$  模) 都是随波长的增大而增大, 而且阶数越高色散值越大, 主要是由于低阶模的有效折射率变化随着波长的增大小于高阶模的变化。高阶模的色散随波长变化较大, 在传输过程中会引起模式的脉冲展宽, 导致模式间的串扰, 不利于 OAM 模式的合成,

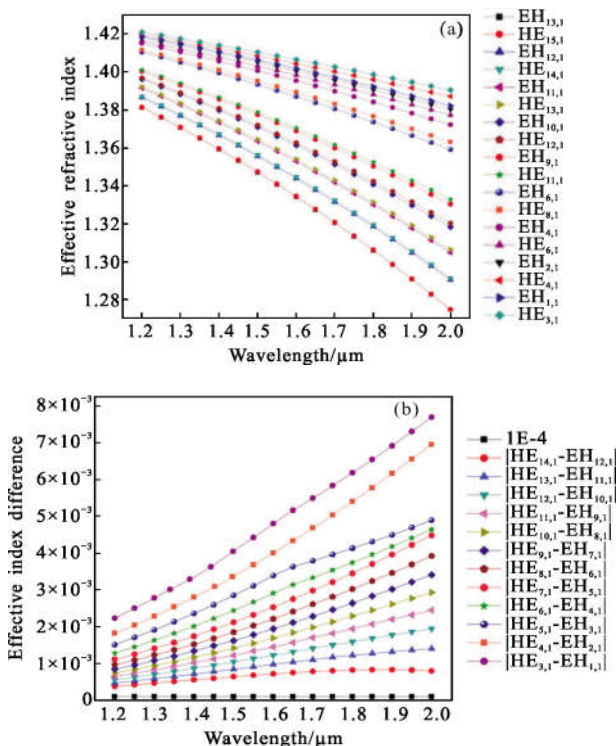
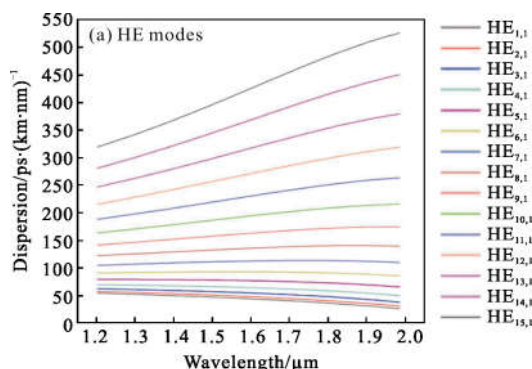


图 6 (a)  $HE_{l+1,1}$  与  $EH_{l-1,1}$  模式的有效折射率随着波长的变化曲线; (b)  $HE_{l+1,1}$  与  $EH_{l-1,1}$  模式之间的有效折射率差随波长的变化曲线

Fig.6 (a) Effective index as a function of wavelength between  $HE_{l+1,1}$  and  $EH_{l-1,1}$  modes; (b) effective index differences as a function of wavelength between  $HE_{l+1,1}$  and  $EH_{l-1,1}$  modes



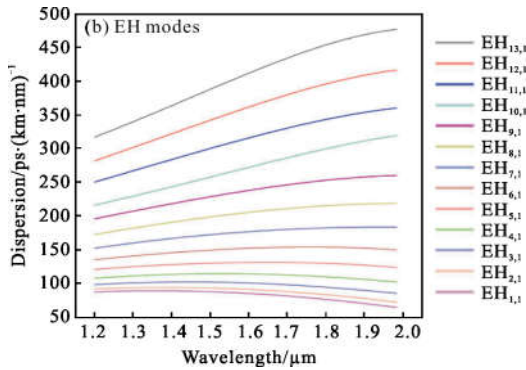


图 7 色散随波长的变化曲线  
Fig.7 Dispersion as a function of wavelength

因此,高阶 OAM 模式在光纤中的传输稳定性较差,限制了 OAM 多模光纤的传输容量和传输距离。然而,由图 7 可知低阶模式的有效折射率随波长的变化曲线近似为线性关系,即低阶模式的色散值更趋于平坦。例如,HE<sub>3,1</sub> 的色散变化为 2.48 ps·nm<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>,EH<sub>6,1</sub> 的色散变化为 2.45 ps·nm<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>。平坦的色散非常有利于 OAM 模式在光纤中的传输。

### 2.3 限制损耗分析

限制损耗是由光子晶体光纤的结构产生的一种损耗,由于包层的空气孔数量有限,光在纤芯中传输时会泄漏至包层的空气孔中,并且限制损耗会随着波长的增大而增大。PCF 的限制损耗  $L$  可由下式计算出<sup>[16]</sup>:

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

式中:Im( $n_{\text{eff}}$ )为有效折射率的虚部,代表了光能衰减的参量,也称为消光系数。Im( $n_{\text{eff}}$ )由仿真计算得出,通过公式(4)计算可得各模式的限制损耗随波长的变化曲线如图 8 所示。计算所得的每个模式的有效折射率的虚部在波长 1.2~1.65 μm 范围内有明显的波动,故各模式的损耗随波长的变化出现明显的上下波动,没有显著的规律性。但是在 1.65~2.0 μm 波段,随着波长的增大,光能泄露至包层中的机会越多,因此限制损耗呈现近似线性上升趋势。这是由于随着光波长的增加,光能泄露至包层中的机会越多,而且越高阶的模式,对光场的限制越弱。因此,短波损耗小,随着波长和模式阶数的增大,限制损耗越大。但是可以看出各模式在 1.55 μm 处的限制损耗都在 10<sup>-9</sup> dB·m<sup>-1</sup> 数量级,最大损耗仅为 10<sup>-7</sup> dB·m<sup>-1</sup>,比传统圆孔型 C-PCF 的限制损耗(低于 10<sup>-3</sup> dB·m<sup>-1</sup>)

小了 4 个数量级<sup>[8]</sup>,理论上证明了该 RC-PCF 传输 OAM 的能力较强。

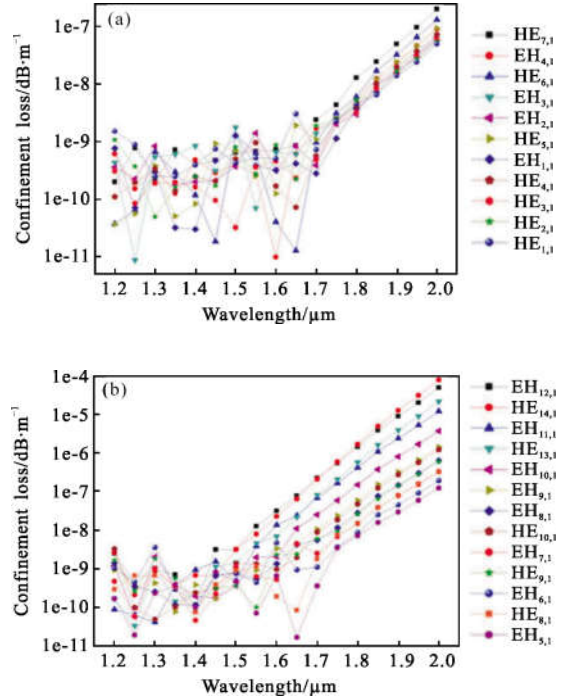


图 8 各模式限制损耗随波长的变化曲线  
Fig.8 Confinement loss as a function of wavelength for each mode

### 2.4 有效模场面积及非线性系数分析

非线性效应是光纤性能的重要参数,非线性系数的大小可定量描述光纤中的非线性效应,非线性系数越小,光纤中的非线性效应越弱,光纤通信系统的传输性能越好。光子晶体光纤非线性效应一般用非线性系数  $\gamma$  来表征,其计算公式如下<sup>[17]</sup>:

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

式中: $n_2=2.3 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$  为背景材料的非线性折射率系数; $A_{\text{eff}}$  为光子晶体光纤的有效模场面积,可由下式确定<sup>[17]</sup>:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left( \iint |E(x, y)|^2 dx dy \right)^2}{\iint |E(x, y)|^4 dx dy} \quad (6)$$

式中: $E(x, y)$ 为光传播时的光纤横截面上电场分布。由上两式可知光子晶体光纤的非线性系数与有效面积是成反比的。图 9 和图 10 所示为 RC-PCF 中支持的本征模式的有效模场面积和非线性系数随着波

长的变化曲线。有效模场面积描述了光的能量集中度,能量越集中,有效模场面积的值越小。波长越长,光束传输区对模场强度的限制越弱,而且高阶模的光场更容易泄露至包层中。因此如图 9 所示,波长越长,模式数越大,RC-PCF 中有效模场面积越大。由公式(5)和公式(6)可知,模式的有效面积与非线性系数成反比,故图 10 中的非线性系数随着波长的增加而减小,且模式的阶数越高非线性系数越小,比如 HE<sub>14,1</sub> 模式在 2.0 μm 波长处的非线性系数只有 0.833 km<sup>-1</sup>·W<sup>-1</sup>。总之,在整个 1.2~2.0 μm 波段,所有非线性系数都较小 (<2.3 km<sup>-1</sup>·W<sup>-1</sup>) 这非常有利于 OAM 模式在光纤中传输。

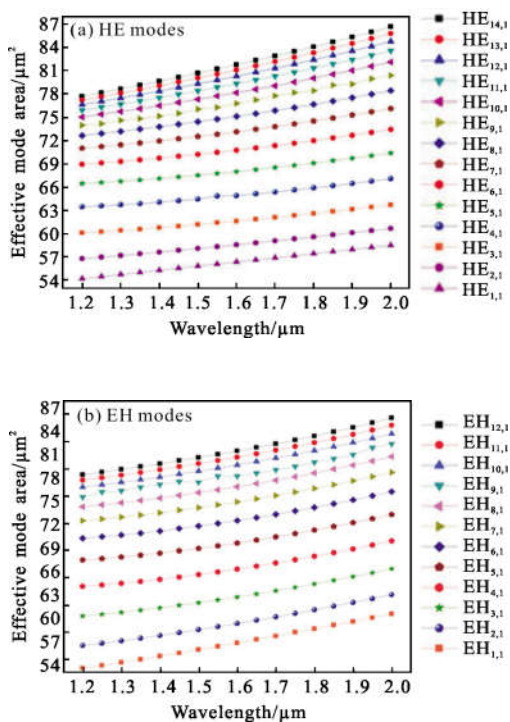


图 9 模式有效模场面积随波长的变化曲线

Fig.9 Effective mode area as a function of wavelength

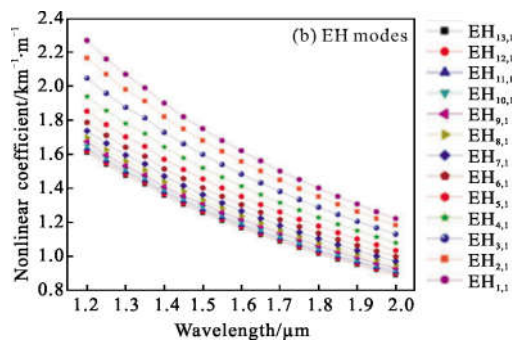
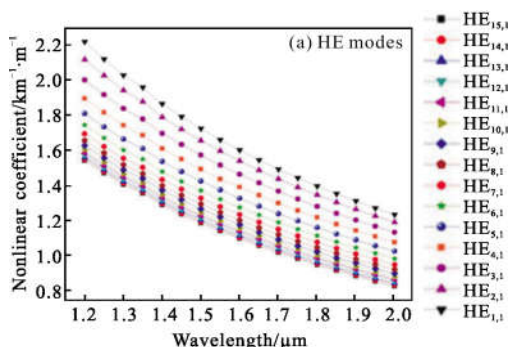


图 10 非线性系数随波长的变化曲线

Fig.10 Nonlinear coefficient as a function of wavelength

### 3 结论

文中提出了一种新型矩形空气孔圆环形光子晶体光纤,在 1.2~2.0 μm 波段可稳定支持 50 个 OAM 模式传输,是目前光子晶体光纤中能稳定传输 OAM 模式数最多的一种结构。仿真结果表明,该 RC-PCF 具有优良的传输特性,不需要额外的掺杂即可实现各模式间大的有效折射率差(>10<sup>-4</sup>),保证了简并模式的有效分离;平坦的色散特性,尤其是低阶模式的色散曲线更趋于平坦,以及较低的限制损耗(10<sup>-11</sup>~10<sup>-7</sup> dB·m<sup>-1</sup>),使其应用在 OAM 通信系统中可大大提升传输的质量和距离;较小的非线性系数(低至 0.833 km<sup>-1</sup>·W<sup>-1</sup>),可减少非线性效应的影响,更有利于 OAM 模式在光纤中的传输。设计的 RC-PCF 支持 50 个 OAM 模态,每个模态都可作为独立的信道传递信息,可以成倍地提高光通信的系统容量和频谱效率。此外,该结构光纤采用传统的预制棒拉伸的办法是很难制作的,但采用溶胶-凝胶(Sol-Gel)浇铸法是可以实现的。而且该方法制作的 PCF 杂质少更清洁,且空气孔的形状、大小和间距都可以独立的调整,参考文献[18-19]中已报道过矩形空气孔光子晶体光纤。因此,随着技术的发展,文中提出的 RC-PCF 是可以实际制作出的。将 RC-PCF 用于 OAM 通信,对于提高光通信容量具有重要价值。

### 参考文献:

[1] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. *Advances in Optics & Photonics*, 2011, 3(2): 161-204.  
 [2] Gao Chunqing, Zhang Shikun, Fu Shiyao, et al. Adaptive optics wavefront correction techniques of vortex beams [J]. *Infrared*

- and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0201001. (in Chinese)
- [3] Bozinovic N, Ramachandran S. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers [J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545–1548.
- [4] Bu Jing, Zhang Lichao, Dou Xiujie, et al. Generation and application of optical vortices with arbitrary topological charges [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0634001. (in Chinese)
- [5] Gregg P, Kristensen P, Golowich S E, et al. Stable transmission of 12 OAM states in air-core fiber[C]//CLEO, 2013: CTu2K.2.
- [6] Ung B, Vaity P, Wang L, et al. Few-mode fiber with inverse-parabolic graded-index profile for transmission of OAM-carrying modes [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18044–18055.
- [7] Brunet C, Ung B, Messaddeq Y, et al. Design of an optical fiber supporting 16 OAM modes[C]//OFC, 2014: TH2A.24.
- [8] 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.
- [9] Wong G K, Kang M S, Lee H W, et al. Excitation of orbital angular momentum resonances in helically twisted photonic crystal fiber [J]. *Science*, 2012, 337(6093): 446.
- [10] Zhang Lingxiang, Wei Wei, Zhang Zhiming, et al. Propagation properties of vortex beams in a ring photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(1): 14205. (in Chinese)
- [11] Hu Z A, Huang Y Q, Luo A P, et al. Photonic crystal fiber for supporting 26 orbital angular momentum modes [J]. *Optics Express*, 2016, 4(15): 17285–17291.
- [12] Tian W, Zhang H, Zhang X, et al. A circular photonic crystal fiber supporting 26 OAM modes [J]. *Optical Fiber Technology*, 2016, 30: 184–189.
- [13] Lou Yan, Chen Chunyi, Zhao Yiwu, et al. Characteristics of Gaussian vortex beam in atmospheric turbulence transmission [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 768–776. (in Chinese)
- [14] Ramachandran S, Kristensen P, Yan M F. Generation and propagation of radially polarized beams in optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(16): 2525–2527.
- [15] 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.
- [16] Maji P S, Chaudhuri P R. Circular photonic crystal fibers: numerical analysis of chromatic dispersion and losses[J]. *Isrn Optics*, 2013, 2013(4): 1–9.
- [17] Saitoh K, Florous N, Koshiba M. Ultra-flattened chromatic dispersion controllability using a defected-core photonic crystal fiber with low confinement losses [J]. *Optics Express*, 2005, 13(21): 8365–8371.
- [18] Inci H D, Ozsoy S. Birefringence, dispersion and loss properties for PCFs with rectangular air-holes [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67: 354–358.
- [19] Jiang G, Fu Y, Huang Y. High birefringence rectangular-hole photonic crystal fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 26: 163–171.