

## 高阶轨道角动量传输光纤设计及传输特性研究（内封底文章）

赵丽娟 吴雨静 徐志钮

### Design and transmission characteristics of high-order orbital angular momentum transmission fiber (*inside back cover paper*)

Zhao Lijuan, Wu Yujing, Xu Zhiniu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20240007>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 轨道角动量模传输的圆环形光子晶体光纤

Circular photonic crystal fiber supporting orbital angular momentum modes transmission

红外与激光工程. 2019, 48(2): 222002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0222002>

#### 轨道角动量叠加态的产生及其检验

Generation of Orbital Angular Momentum superpositions and its test

红外与激光工程. 2018, 47(4): 417007 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0417007>

#### 激光二极管端面抽运梯度浓度掺杂介质激光器热效应的有限元法分析

Finite element method analysis of thermal effect in gradient dopant concentration medium laser end-pumped by laser diode

红外与激光工程. 2019, 48(11): 1105004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1105004>

#### 光束轨道角动量谱的测量技术研究进展（特邀）

Advances on the measurement of orbital angular momentum spectra for laser beams (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(9): 20210145 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210145>

#### 大气湍流下轨道角动量复用态串扰分析

Crosstalk analysis of orbital angular momentum-multiplexed state under atmospheric turbulence

红外与激光工程. 2018, 47(11): 1122002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1122002>

#### 大气湍流信道中OAM光束与高斯光束传输性能的实验研究

Experimental research on transmission performance on OAM beam and Gaussian beam in atmospheric turbulence channel

红外与激光工程. 2021, 50(8): 20200400 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200400>

# 高阶轨道角动量传输光纤设计及传输特性研究 (内封底文章)

赵丽娟<sup>1,2,3</sup>, 吴雨静<sup>1</sup>, 徐志钮<sup>1\*</sup>

1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;
2. 华北电力大学 河北省电力物联网技术重点实验室, 河北 保定 071003;
3. 华北电力大学 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室, 河北 保定 071003)

**摘要:** 为解决一般轨道角动量传输光纤传输轨道角动量模式数量少、质量差的问题, 提出了一种基于正六边形空气孔排列的新型光子晶体光纤结构。该光纤引入了空气填充率高的矩形空气孔以及采用高折射率材料填充环形传输区域, 能够有效提高环形传输区域和包层间的折射率差, 且正六边形排列空气孔有利于提高模间有效折射率差。经过结构优化得到最优光纤结构, 有限元法的分析结果表明, 最优结构下, 该光纤在常用波段 S+C+L+U 波段上能够支持 142 种轨道角动量模式的传输, 最高阶数达到 36 阶。且所提出光纤具有良好的传输特性, 本征模式的最高限制性损耗为  $10^{-9}$  dB/m 量级, 与典型轨道角动量传输光子晶体光纤相比至少降低了一个数量级; 最大有效模场面积能够达到  $206.18 \mu\text{m}^2$ , 最小非线性系数低至  $0.397 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ; 色散平坦且最小色散变化低至  $1.4578 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ; 所有本征模式纯度均在 93.4%~96.8% 范围内。且该光纤具有较好的制备可行性, 对制造精度要求不高。因此, 该光纤在基于轨道角动量光纤的复用系统中具有广阔的应用前景, 为提高通信容量提供了一种有效手段。

**关键词:** 光纤光学; 轨道角动量; 有限元法; 限制性损耗; 通信容量

**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240007

## 0 引言

移动互联网、大数据以及云计算的不断发展使得人们对通信容量的需求日益增长。近年来, 时分复用 (time division multiplexing, TDM)<sup>[1]</sup>、波分复用 (wavelength division multiplexing, WDM)<sup>[2]</sup> 等方法尽管能够实现基于单模光纤通信容量的增长, 但由于单模光纤非线性效应的限制, 通信容量始终无法突破香农极限<sup>[3]</sup>。空分复用 (space division multiplexing, SDM)<sup>[4]</sup> 作为一种新型提高通信容量的方式, 能够有效解决通信容量受限的问题。基于轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM)<sup>[5]</sup> 的复用是空分复用的一种特殊形式, 在不需要额外带宽的情况下能极大提高信道容量, 在光纤通信领域引起了极大的研究兴趣。

涡旋光束具有螺旋相位  $\exp(jl\theta)$ , 因此携带  $lh$  的轨道角动量<sup>[6]</sup> ( $l$  为拓扑荷数,  $\theta$  为方位角,  $h$  为约化普朗克常量)。不同的 OAM 模式之间相互正交<sup>[7]</sup>, 基于此不同模式可携带不同的信息。可将多个不同拓扑荷的 OAM 光束作为载波进行信息传输, 同时不同模式间的正交性使得能够通过合适的方法对复用信号进行解复用, 这显示出提高信道通信容量的巨大潜力。在自由空间中传输的 OAM 会受到大气湍流等因素的影响进而限制传输距离, 而在光纤中传输 OAM 模式能够有效避免外界因素的干扰。通常能够传输 OAM 模式的光纤需要满足以下条件<sup>[8]</sup>: 具有与 OAM 模式模场分布相对应的环形传输区域; 合成 OAM 模式的矢量模式 HE 模式和 EH 模式之间的有效折射率差应大于  $10^{-4}$ , 以防止简并矢量模式耦合成 LP 模式<sup>[9]</sup>。普通

收稿日期: 2023-11-27; 修订日期: 2024-01-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62171185, 62273146); 河北省自然科学基金项目 (E2020502010);  
河北省省级科技计划项目 (SZX2020034)

作者简介: 赵丽娟, 女, 教授, 博士, 主要从事光纤传感与光纤通信方面的研究。

通讯作者: 徐志钮, 男, 教授, 博士, 主要从事分布式光纤传感及其在电力系统中的应用方面的研究。

光纤矢量模式间折射率差一般在  $10^{-7} \sim 10^{-6}$ , 无法达到 OAM 模式传输需求。光子晶体光纤作为一种结构可设计性高的特殊光纤<sup>[10-11]</sup>, 为实现 OAM 模式的传输提供了可能性, 近年来设计能够支持 OAM 模式传输的光子晶体光纤成为一大研究热点。2017 年, Zhang 等<sup>[12]</sup> 提出了一种圆形光子晶体光纤用于 OAM 传输, 与传统单模光纤相比这种光子晶体光纤能够获得最佳数量的高质量 OAM 模式, 最高可达 42 个。为了提高可支持的 OAM 模式数目, 2018 年, Bai 等<sup>[13]</sup> 提出一种含有矩形空气孔的光子晶体光纤, 矩形空气孔能够提高包层空气填充率进而增大传输区域与包层间的折射率差, 有利于 OAM 的有效传输。结果表明, 该光纤能够支持 46 种 OAM 模式的传输, 并且具有低限制性损耗特性。此外, 在环形传输区域填充高折射率材料有利于实现更多数目 OAM 模式的高质量传输。2020 年, Fahad 等<sup>[14]</sup> 提出了一种采用 SF<sub>2</sub> 填充环形区域的光子晶体光纤, 结果表明, 该光纤能够支持 76 个 OAM 模式和 4 个 LP 模式的高质量传输, 最高模式纯度能够达到 96%。根据现有光纤设计, 能够发现通过在包层引入矩形空气孔有利于提高包层空气填充率进而降低包层折射率; 在环形传输区域填充高折射率材料能够提高环形区域的折射率, 这两种方式均能增大环形传输区域与包层间的折射率差, 进而有利于更多 OAM 模式的高质量传输。但这两种方式组合起来是否有更好的效果尚待开展系统的研究。

为实现更多数目 OAM 模式的高质量传输, 文中综合利用了矩形空气孔和环形传输区域填充高折射率材料两种方式, 提出了一种基于六边形结构的光子晶体光纤设计方法。该光纤由中间大圆形空气孔、环形传输区域、靠近环形传输区域的矩形空气孔及以正六边形排列的圆形空气孔构成, 其中光纤的基底材料为二氧化硅, 环形传输区域采用折射率为 1.56 的高折射率材料进行填充。矩形空气孔的引入以及采用高折射率材料填充环形传输区域, 这两种方式的联合有利于增大包层和环形传输区域间的折射率差, 与单独使用其中一种方式相比有望进一步提高 OAM 模式的传输数目及质量。采用有限元法<sup>[15]</sup> 对设计的光纤进行计算, 结果表明, 该光纤能够在 S+C+L+U 波段支持 142 种 OAM 模式的稳定传输, 所有相邻本征模式

间的有效折射率差均大于  $10^{-4}$ , 满足 OAM 模式的传输条件。此外, 所有本征模式限制性损耗均在  $10^{-9} \sim 10^{-12}$  量级上, 最小非线性系数低至  $0.397 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ , 最小色散变化低至  $1.4578 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ , 模式纯度均大于 93.4%。与现有的典型光子晶体光纤相比, 该光纤不仅能够支持较多数目 OAM 模式的传输, 同时具有低限制性损耗特性等良好的传输特性, 保证了 OAM 模式的高质量传输。

## 1 基本原理及光纤结构

### 1.1 OAM 模式分析

光纤中传输 OAM 模式的基本原理在于同阶本征模式 TE 模、TM 模、HE 模以及 EH 模的叠加, 具体叠加方式如公式 (1) 所示<sup>[16]</sup>:

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

$$\begin{cases} \text{OAM}_{\pm l, m}^{\pm} = \text{HE}_{2, m}^{\text{even}} \pm j\text{HE}_{2, m}^{\text{odd}} \\ \text{OAM}_{\pm l, m}^{\mp} = \text{TM}_{0, m} \pm j\text{TE}_{0, m} \end{cases} (l = 1)$$

式中:  $\text{HE}^{\text{even}}$  和  $\text{EH}^{\text{even}}$  分别为 HE 和 EH 模式的偶模;  $\text{HE}^{\text{odd}}$  和  $\text{EH}^{\text{odd}}$  分别为 HE 和 EH 模式的奇模;  $m$  为径向阶数; OAM 模式由同阶本征模式的奇偶模叠加而成。j 表示  $\pi/2$  的相位差, OAM 的上标符号“+”表示右旋圆偏振, “-”表示左旋圆偏振, 下标符号“±”表示螺旋相位旋转方向。当  $m > 1$  时, 会出现“意外退化”而导致不支持 OAM 模式<sup>[17]</sup>。当  $l=1$  时, 由于 TM 模式和 TE 模式具有不同的有效折射率, 在传播过程中会造成模式走离现象。因此两种模式叠加生成的 OAM 模式不稳定, 不做考虑, 故此时同一拓扑荷数下包含两个 OAM 模式。当  $l > 1$  时, 同一拓扑荷数下包含 4 个 OAM 模式。

### 1.2 光纤结构

根据传输 OAM 模式光纤的设计要求<sup>[18]</sup>: 首先, 光纤需要具有环形传输区域, 这与 OAM 模式的模态分布有关; 其次, 光纤结构设计要能够满足 OAM 传输基本要求, 即相邻本征模式间的有效折射率差应大于  $10^{-4}$  以防止耦合不能承载 OAM 模式的 LP 模式。Bai 等<sup>[13]</sup> 通过分析比较得出结论: 可支持的 OAM 模式数量随包层空气填充率的增加而增加, 环形传输区域与包层间较大的折射率差有利于支持更多 OAM 模式的传输。同时较大的折射率差也能够有

效防止环形传输区域内的光强泄露进包层中,从而保证了高质量传输。空气折射率小于 SiO<sub>2</sub> 的折射率,因此可通过提高光纤包层空气填充率进而降低包层折射率以增加环形传输区域与包层之间的折射率差。对于圆形空气孔和矩形空气孔,其相关充气分数分别如公式 (2) 所示<sup>[13]</sup>:

$$f_{cs} = \frac{\pi}{4} \left( \frac{d}{\Lambda} \right)^2; f_{ss} = \frac{ab}{\Lambda^2} \quad (2)$$

式中:  $f_{cs}$  为圆形空气孔的相关充气分数;  $d$  为圆的直径;  $\Lambda$  为孔间距;  $f_{ss}$  为矩形空气孔的相关充气分数;  $a$  和  $b$  分别为矩形的长和宽。将两种空气孔的相关充气分数进行对比,当  $a$  和  $b$  均等于  $d$  时,矩形空气孔具有更大的相关充气分数。

因此,矩形空气孔有更高的空气填充率,为了进一步降低包层的折射率,采用矩形空气孔进行排列;同时环形区域填充折射率为 1.56 的高折射率材料进一步提高了二者的折射率差。为使相邻本征模式间实现较大的有效折射率差以防止 LP 模式的合成,包层中第二层空气孔采用圆形空气孔以正六边形排列。具体的光子晶体光纤横截面如图 1 所示,包括中间大空气孔及环形传输区域,分别由 18 个大小相同的矩形空气孔以及 36 个圆形空气孔在包层中按照图 1 方式均匀排列一周。综合考虑性能和加工难度,经过反复计算确定  $r_1$  为 20  $\mu\text{m}$ ,  $r_2$  为 35  $\mu\text{m}$ ,  $b$  为 4  $\mu\text{m}$ ,  $d$  为 5  $\mu\text{m}$ ,  $d_1$  为 22.5  $\mu\text{m}$ ,  $d_2$  为 31.2  $\mu\text{m}$ ,  $d_3$  为 24  $\mu\text{m}$ ,  $d_4$  为 5.2  $\mu\text{m}$ 。

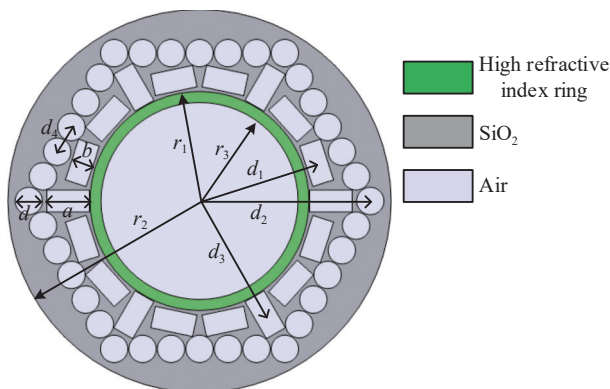


图 1 光子晶体光纤横截面图

Fig.1 Cross-section of photonic crystal fiber

## 2 结构优化、建模结果及分析

利用有限元软件 Comsol Multiphysics 对设计的

光子晶体光纤进行建模计算,为了提高计算精度、保证结果的可靠性,采用较细化网格剖分且在光纤外层添加一层完美匹配层作为边界条件。为了实现光纤结构的最佳性能,对包层中矩形空气孔的长宽比、环形传输区域的厚度进行调整以分析对结果的影响。确定最优结构后,对所提出光子晶体光纤支持传输的 OAM 模式数目进行了分析,为了保证 OAM 模式的高质量传输,对光纤的传输特性,主要包括有效折射率、相邻本征模式间的有效折射率差、有效模场面积、非线性系数、限制性损耗、色散分布以及模式纯度进行了分析。

### 2.1 光纤结构优化

#### 2.1.1 矩形空气孔长宽比的影响

环形传输区域周围规律排列矩形空气孔,矩形空气孔的长宽比直接影响到包层空气填充率,进而影响包层与环形传输区域间的折射率差,对 OAM 模式的传输性能具有一定的影响。通过调整矩形空气孔的长度  $a$  来改变长宽比,分析了其大小对支持传输 OAM 数目及传输质量的影响,选择典型模式 HE<sub>15,1</sub> 在 1 550 nm 处的传输性能进行了分析。综合考虑传输性能以及制造难度,同时考虑到光纤结构的限制,为防止气孔间出现接触现象,设置  $a$  在 7~7.8  $\mu\text{m}$  范围进行分析。结果表明,在参数变化范围内,光纤在 1 550 nm 处均支持 150 种 OAM 模式的传输,说明  $a$  对 OAM 传输数目影响不大。图 2 为 HE<sub>15,1</sub> 在 1 550 nm 处的模式纯度及 HE<sub>15,1</sub> 和 EH<sub>13,1</sub> 间的有效折射率差随  $a$  的变

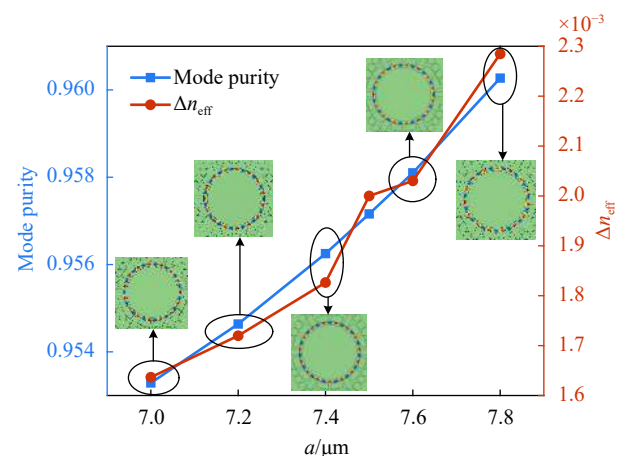


图 2 模式纯度及有效折射率差随  $a$  的变化

Fig.2 Change of mode purity and effective refractive index difference with  $a$

化, 结果表明,  $a$  越大, 模式纯度越高、有效折射率差越大, 传输性能越好。综上, 综合考虑 OAM 模式传输数目、传输质量以及光纤制造难度, 选择  $a$  为  $7.8 \mu\text{m}$ 。

### 2.1.2 环形传输区域厚度的影响

光纤环形传输区域的厚度  $r$  也对光纤性能具有较大的影响,  $r$  等于  $r_1$  与  $r_3$  的差值, 通过调整  $r_3$  的大小实现传输区域厚度的变化来分析其对光纤的影响。图 3 为  $1550 \text{ nm}$  处  $r$  在  $1.5\sim 2.5 \mu\text{m}$  范围内变化对传输 OAM 数目以及传输质量的影响。结果表明, 随着  $r$  的增大, 支持 OAM 数目呈现出先增加后减小的趋势, 在  $1.9 \mu\text{m}$ 、 $2.0 \mu\text{m}$  及  $2.1 \mu\text{m}$  处能够实现最大 150 种 OAM 模式的传输。通过对典型模式  $\text{HE}_{15,1}$  在  $1550 \text{ nm}$  处的性能分析发现, 随着  $r$  的增大, 模式纯度呈增大趋势, 原因是环形传输区域厚度的增加使得

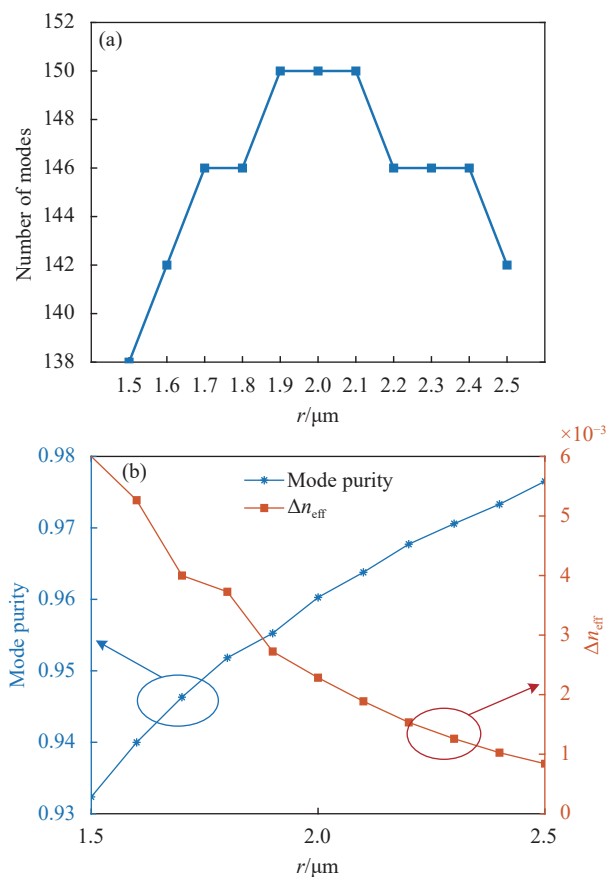


图 3 环形传输区域厚度对传输性能的影响。(a) 对传输 OAM 数目的影响; (b) 对模式纯度及有效折射率差的影响

Fig.3 Influence of the thickness of the ring transmission area on the transmission performance. (a) Effect on the number of transmitted OAM; (b) Effect on mode purity and effective refractive index difference

OAM 模式所占功率在所有功率中的比例增大。但模间有效折射率差有所减小, 原因是传输区域厚度的增大降低了光纤结构的不对称性。综合考虑两个参数及可支持的 OAM 数目, 选择  $r$  为  $2 \mu\text{m}$ , 即  $r_3$  为  $18 \mu\text{m}$ 。

### 2.1.3 最优结构验证

为了验证 2.1.1 及 2.1.2 节所选取的结构参数, 考虑到  $a$  和  $r$  的交叉影响, 设置  $a$  在  $7\sim 7.8 \mu\text{m}$  范围,  $r$  在  $1.5\sim 2.5 \mu\text{m}$  范围组成 55 种结构组合方式。分析了在这 55 种结构参数组合方式下在  $1550 \text{ nm}$  处所支持的 OAM 传输数目及传输性能, 具体的组合方式及结果如图 4 及表 1 所示。结果表明, 无论  $r$  取值为多少, 有效折射率差和模式纯度随  $a$  的变化趋势均为正相关,  $a=7.8 \mu\text{m}$  时性能均为最佳, 验证了 2.1.1 节的结论。另外, 无论  $a$  如何取值, 有效折射率差及模式纯度随  $r$  的变化趋势分别为负相关和正相关, 与 2.1.2 节的结论一致。首先考虑了所支持的 OAM 数目, 然后

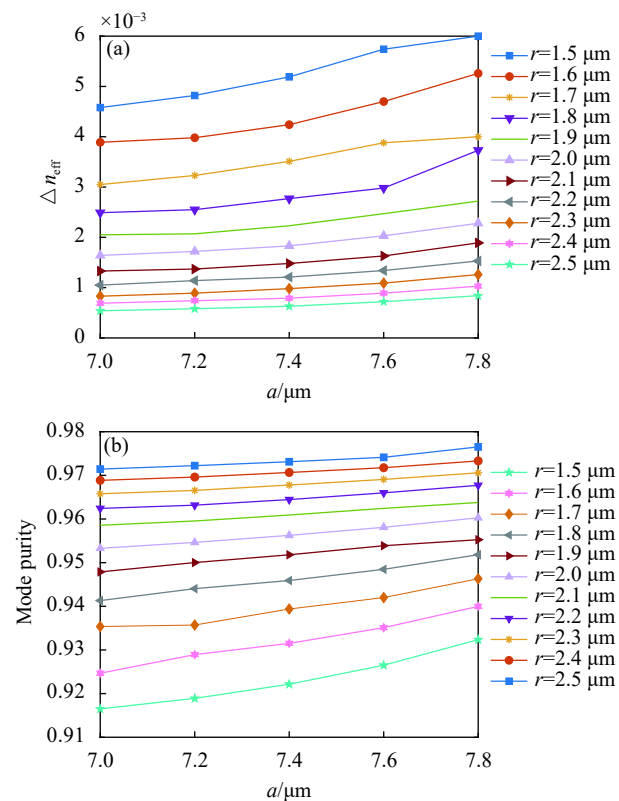


图 4 结构组合及其对有效折射率差和模式纯度。(a) 有效折射率差; (b) 模式纯度

Fig.4 Structure combination and corresponding effective refractive index difference and mode purity. (a) Effective refractive index difference; (b) Mode purity

综合考虑了有效折射率差和模式纯度。当  $a=7.8 \mu\text{m}$ 、 $r=2 \mu\text{m}$  时,虽然有效折射率差和模式纯度不是最优,但却是在支持 OAM 数目最多条件下,唯一同时满足有效折射率差大于 0.002、模式纯度大于 0.96 的参数组合方式。因此,所选取的  $a$  和  $r$  的取值能够兼顾 OAM 模式传输数目及传输质量。

表 1 结构组合对应支持的传输 OAM 数目

Tab.1 The supported number of transmitted OAM corresponding to the structure combination

Ring thickness/ $\mu\text{m}$	$a=7.0$	$a=7.2$	$a=7.4$	$a=7.6$	$a=7.8$
$r=1.5$	138	138	138	138	138
$r=1.6$	142	142	142	142	142
$r=1.7$	146	146	146	146	146
$r=1.8$	150	150	150	150	146
$r=1.9$	150	150	150	150	150
$r=2.0$	150	150	150	150	150
$r=2.1$	150	150	150	150	150
$r=2.2$	150	150	150	146	146
$r=2.3$	142	142	146	146	146
$r=2.4$	142	146	146	142	146
$r=2.5$	142	142	142	142	142

## 2.2 建模结果及分析

### 2.2.1 支持的 OAM 数目及有效折射率差

通过有限元法能够得到各个波长下本征模式对应的  $z$  方向上的电场分布,通过  $z$  方向上的电场分布能够清楚分辨出本征模式的类型、阶数及奇偶。图 5 为 1 550 nm 处一些典型本征模式对应的  $z$  方向电场分布图。图 6 为该光子晶体光纤支持的 OAM 数目随波长

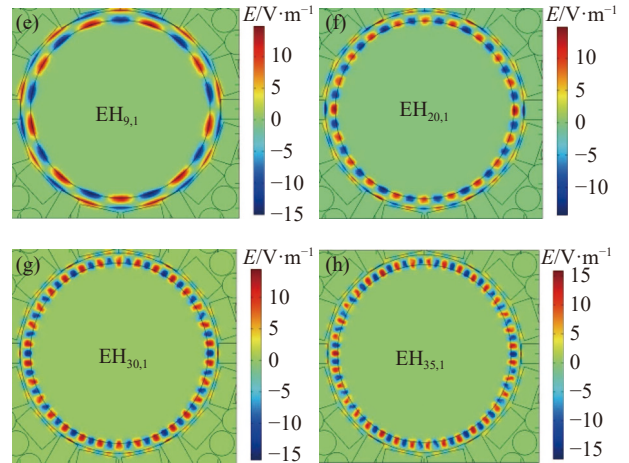


图 5  $z$  方向电场分布图。(a)  $\text{HE}_{9,1}$ ; (b)  $\text{HE}_{20,1}$ ; (c)  $\text{HE}_{30,1}$ ; (d)  $\text{HE}_{37,1}$ ; (e)  $\text{EH}_{9,1}$ ; (f)  $\text{EH}_{20,1}$ ; (g)  $\text{EH}_{30,1}$ ; (h)  $\text{EH}_{35,1}$

Fig.5 Diagram of electric field distribution in  $z$  direction. (a)  $\text{HE}_{9,1}$ ; (b)  $\text{HE}_{20,1}$ ; (c)  $\text{HE}_{30,1}$ ; (d)  $\text{HE}_{37,1}$ ; (e)  $\text{EH}_{9,1}$ ; (f)  $\text{EH}_{20,1}$ ; (g)  $\text{EH}_{30,1}$ ; (h)  $\text{EH}_{35,1}$

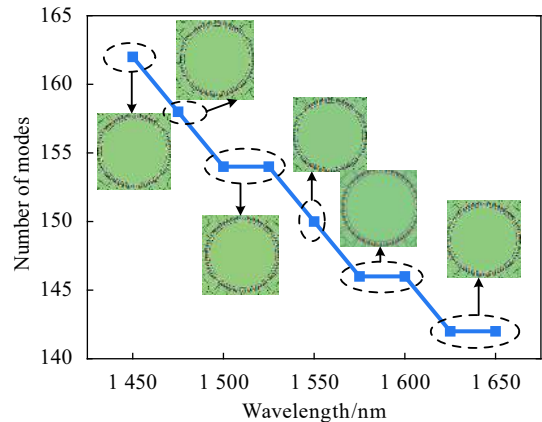
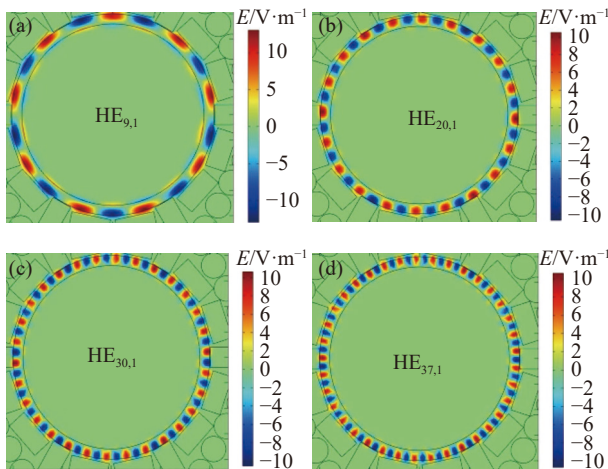


图 6 支持 OAM 数目随波长的变化

Fig.6 Change of supported number of OAM with wavelength



的变化以及不同波长对应的最高阶 HE 模式,图中的模式依次为  $\text{HE}_{42,1}$ 、 $\text{HE}_{41,1}$ 、 $\text{HE}_{40,1}$ 、 $\text{HE}_{39,1}$ 、 $\text{HE}_{38,1}$  以及  $\text{HE}_{37,1}$ ,可以看出,支持传输的 OAM 模式数随着波长的增加而逐渐减少。在 S+C+L+U 波段,该光纤能够支持的 OAM 数目达到 142。

较高的有效折射率差有利于保证轨道角动量模式的稳定传输,在外界微扰情况下,能够有效避免简并矢量模式间的耦合,相邻本征模式间有效折射率差大于  $10^{-4}$  是光纤支持 OAM 模式稳定传输的基本要求<sup>[9]</sup>。有效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}$  能够通过公式 (3) 得到:

$$\Delta n_{\text{eff}} = |n_{\text{eff}}(\text{HE}_{l+1,m}) - n_{\text{eff}}(\text{EH}_{l-1,m})| \quad (3)$$

式中:  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率。

为实现相邻本征模式间有效折射率差的增大,文中设计的光纤包层中圆形空气孔呈现六边形分布。图 7 为 HE 模式和 EH 模式在 1 450~1 650 nm 范围内有效折射率随波长的变化,可以看出 HE 模式和 EH 模式对应的有效折射率均随波长的增加呈减小趋势,模式阶数越高,减小趋势越明显。

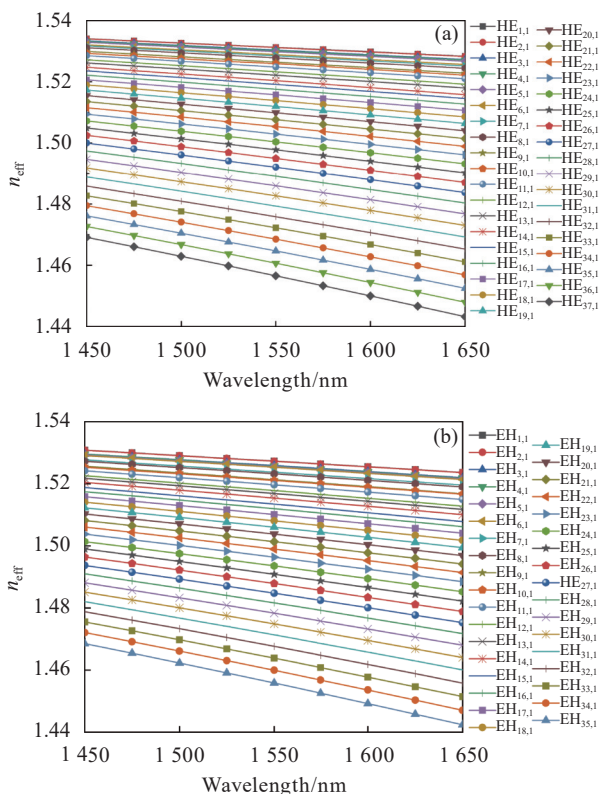


图 7 有效折射率随波长的变化。(a) HE 模式有效折射率随波长的变化; (b) EH 模式有效折射率随波长的变化

Fig.7 Change of effective refractive index with wavelength. (a) Change of effective refractive index of HE mode with wavelength; (b) Change of effective refractive index of EH mode with wavelength

通过 HE 模式和 EH 模式的有效折射率能够计算出相邻本征模式间的有效折射率差,图 8 为相应模间有效折射率差随波长的变化情况,能够看出有效折射率差随波长的增加而增大。大部分相邻模式间的有效折射率差大于  $10^{-3}$ , 所有模间有效折射率均大于  $10^{-4}$ , 满足 OAM 模式传输的基本条件<sup>[18]</sup>, 能够有效防

止简并矢量模式之间耦合成 LP 模式, 保证了 OAM 模式的稳定传输。

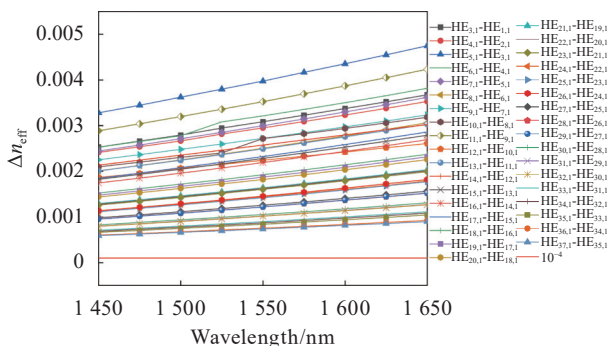


图 8 有效折射率差随波长的变化

Fig.8 Change of effective refractive index difference with wavelength

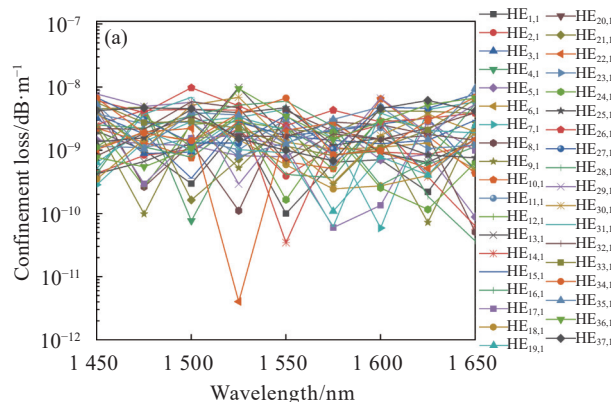
### 2.2.2 限制性损耗

限制性损耗是光通信中的一个重要参数,直接影响到 OAM 模式的传输质量,是判断传输距离的重要参数。限制性损耗主要由光泄露引起,泄露部分的光能量即为光纤的限制性损耗,光纤对光束的约束能力越强,限制性损耗越小。设计出具有低限制性损耗的光纤对于 OAM 模式的长距离传输具有重要意义,具体的限制性损耗  $L$  计算方法如公式 (4) 所示<sup>[19]</sup>:

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

式中:  $\lambda$  为波长;  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  为有效折射率的虚部。

图 9(a) 和图 9(b) 分别为 1 450~1 650 nm 范围内 HE 模式和 EH 模式对应限制性损耗随波长的变化,可以看出在波长范围内限制性损耗变化无规则,但所有模式限制性损耗均保持在  $10^{-12}$ ~ $10^{-9}$  dB/m 量级上。其中,  $\text{EH}_{18,1}$  在 1 450 nm 处能够达到最低限制性



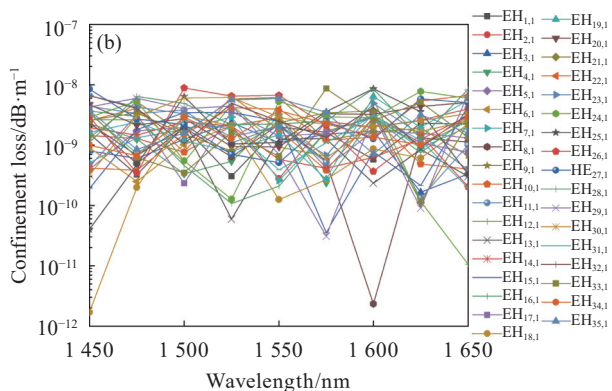


图 9 限制性损耗随波长的变化。(a) HE 模式限制性损耗随波长的变化; (b) EH 模式限制性损耗随波长的变化  
Fig.9 Change of confinement loss with wavelength. (a) Change of the confinement loss of HE mode with wavelength; (b) Change of the confinement loss of EH modes with wavelength

损耗为  $1.7 \times 10^{-12}$  dB/m, HE<sub>26,1</sub> 在 1 500 nm 处达到最高限制性损耗为  $9.8 \times 10^{-9}$  dB/m。因此,该光纤所有本征模式限制性损耗均维持在较低水平,有利于 OAM 模式的长距离传输。

2.2.3 有效模场面积及非线性系数

有效模场面积能够反映光纤内功率密度的大小,直接影响到光纤的非线性系数,光纤中的非线性效应对光纤的容量和性能具有不利影响。较小的非线性系数有利于限制光纤中的非线性效应,有效模场面积  $A_{\text{eff}}$  和非线性系数  $\gamma$  的计算方法如公式 (5)<sup>[20]</sup> 和公式 (6) 所示<sup>[21]</sup>:

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

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (6)$$

式中:  $E(x,y)$  为光传播的横向电场分布;  $n_2$  为背景材料的非线性折射率。

图 10 分别为 HE 模式和 EH 模式对有效模场面积在 1 450~1 650 nm 范围内随波长的变化情况,能够看出随波长的增大,有效模场面积平稳增加,变化趋势不明显。有效模场面积随波长增大的原因可解释为随波长的增加,光纤对光强的限制能力逐渐减弱,导致部分光场泄露进包层中,引起模场面积的增加。其中,HE<sub>37,1</sub> 在 1 650 nm 处的有效模场面积最

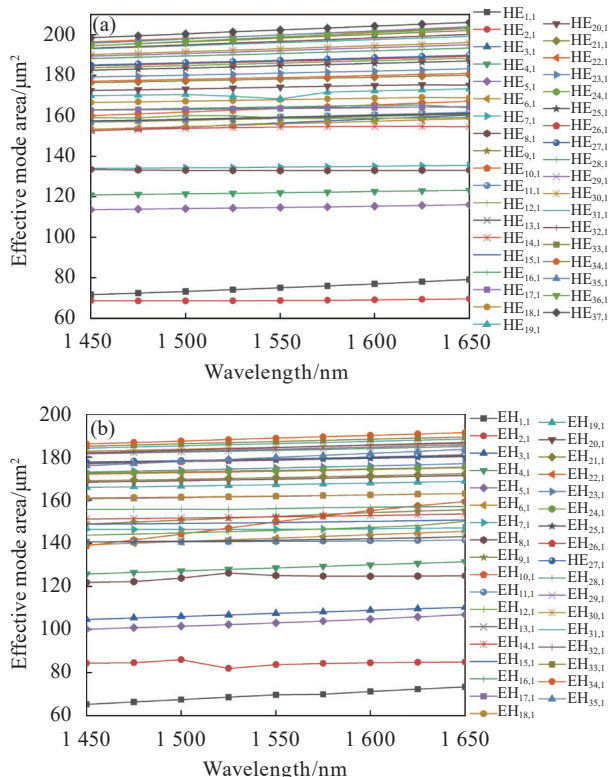
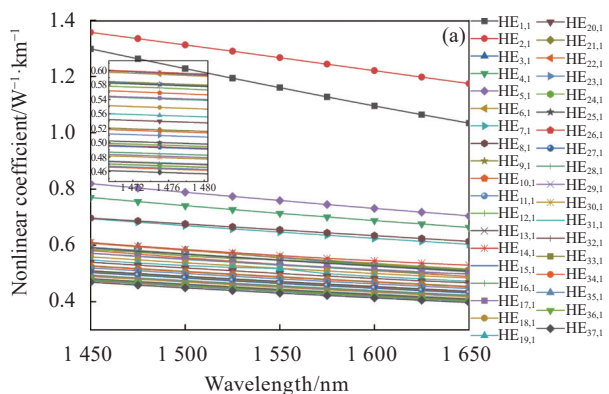


图 10 有效模场面积随波长的变化。(a) HE 模式有效模场面积随波长的变化; (b) EH 模式有效模场面积随波长的变化  
Fig.10 Change of effective mode field area with wavelength. (a) Change of effective mode field area of HE mode with wavelength; (b) Change of effective mode field area of EH mode with wavelength

大,能够达到  $206.18 \mu\text{m}^2$ 。

图 11 为非线性系数随波长的变化情况,与有效模场面积随波长的变化趋势相反,非线性系数随波长的增加呈减小趋势,与公式 (6) 吻合。与有效模场面积对应,HE<sub>37,1</sub> 在 1 650 nm 处获得最小非线性系数为  $0.397 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,所有模式的非线性系数均小于





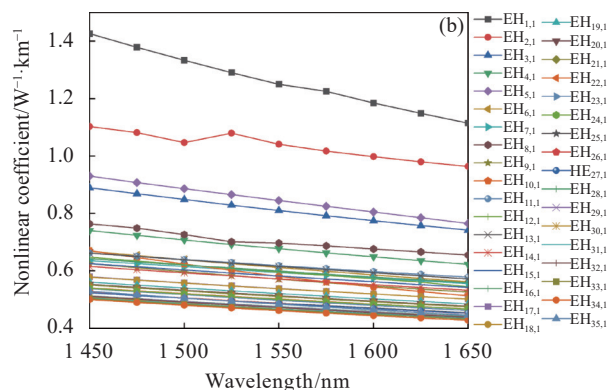


图 11 非线性系数随波长的变化。(a) HE 模式非线性系数随波长的变化; (b) EH 模式非线性系数随波长的变化

Fig.11 Change of nonlinear coefficient with wavelength. (a) Change of nonlinear coefficient of HE mode with wavelength; (b) Change of nonlinear coefficient of EH mode with wavelength

1.426 W<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>。因此, 所提出的光纤在抑制非线性效应方面表现较好, 有助于 OAM 模式的长距离传输。

### 2.2.4 色散分布及模式纯度

色散是光通信中重要的参数, 是造成脉冲展宽以及光纤模式传输不稳定的重要原因。在描述光纤的传输特性时, 色散变化越平坦, 光纤性能越好。光纤的色散系数  $D$  与有效折射率随波长的变化有关, 具体的计算方式如公式 (7) 所示<sup>[22]</sup>:

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2} \quad (7)$$

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

图 12 分别为 HE 模式和 EH 模式在 1450~1650 nm 范围内色散系数随波长的变化情况。可看出色散系数随波长的增加线性增大, 基本趋势是, 模式阶数越高, 变化趋势越明显, 这与有效折射率随波长的变化

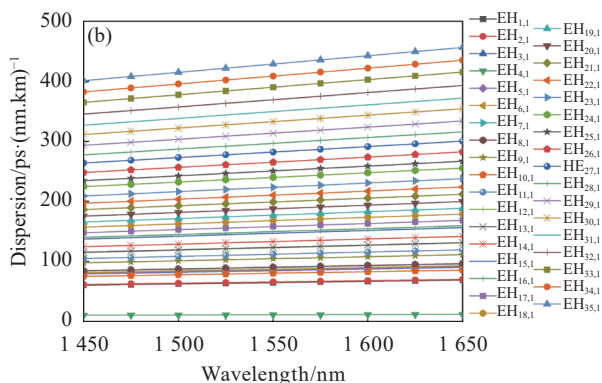


图 12 色散随波长的变化。(a) HE 模式色散随波长的变化; (b) EH 模式色散随波长的变化

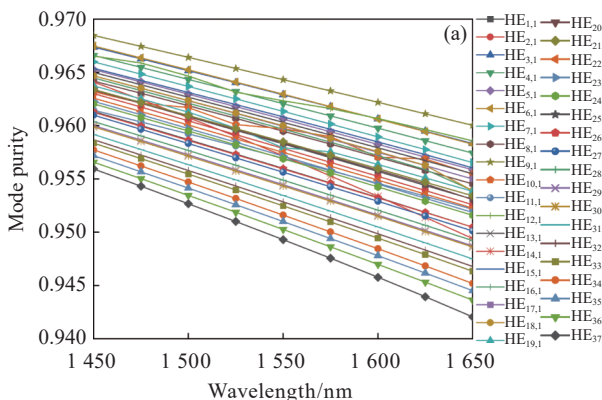
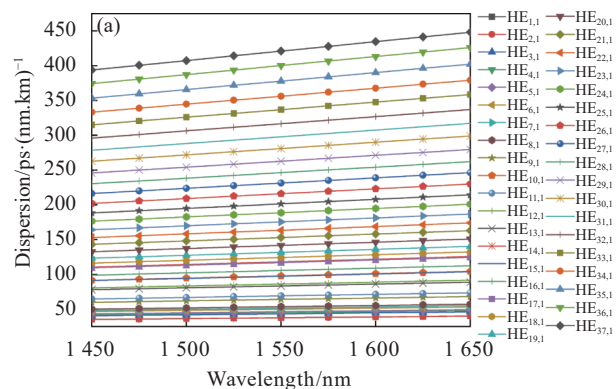
Fig.12 Change of dispersion with wavelength. (a) Change of HE mode dispersion with wavelength; (b) Change of EH mode dispersion with wavelength

趋势相对应。其中, 在 1450~1650 nm 范围内最小色散变化为 1.4578 ps/(nm·km), 因此该光纤具有较为平坦的色散系数变化。

模式纯度表示 OAM 模式所占功率在所有功率中的比例, 它是评估 OAM 模式传输性能的重要指标, 影响着复用和解复用, 模式纯度越高, 表示轨道角动量模式的传输质量越好, 且较高的模式纯度有利于防止模式间串扰。模式纯度  $\eta$  具体的计算方法如公式 (8) 所示<sup>[23]</sup>:

$$\eta = \frac{\iint_{\text{ring}} |E(x,y)|^2 dx dy}{\iint_{\text{cross-section}} |E(x,y)|^2 dx dy} \quad (8)$$

图 13 分别为 HE 和 EH 模式对应模式纯度随波长的变化, 能够看出所有模式的纯度均随波长的增加而减小。这与有效模场面积随波长的变化相对应, 波长越大, 光纤对光束的限制能力越弱, 导致了模式纯



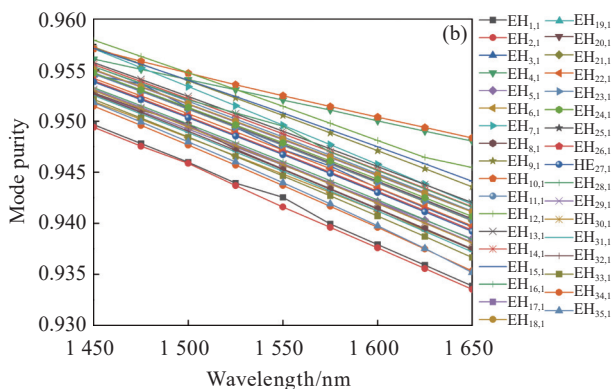


图 13 模式纯度随波长的变化。(a) HE 模式纯度随波长的变化;(b) EH 模式纯度随波长的变化

Fig.13 Change of mode purity with wavelength. (a) Change of mode purity of HE mode with wavelength; (b) Change of mode purity of EH mode with wavelength

度的下降。HE 模式的纯度在 94.2%~96.8% 范围内, EH 模式的纯度在 93.4%~95.8% 范围内, 所有模式的纯度均大于 93.4%。因此, 所提出光纤所有本征模式均具有较高的模式纯度, 这保证了 OAM 模式的高质量传输。

### 3 光纤制造可行性分析

文中提出光纤由中间大空气孔、高折射率材料填充环形传输区域、矩形空气孔以及圆形空气孔组成。圆形空气孔的制备较为常见, 对于矩形空气孔的制备, 早在 2004 年, Baek J H 等<sup>[24]</sup> 已研究过矩形气孔制造方法。溶胶-凝胶法<sup>[25]</sup> 能够灵活地改变光纤空气孔的形状、尺寸以及孔间距, 通过这种方法可制造任意一种光子晶体光纤结构, 进一步提高了矩形空气孔制造的可行性。对于高折射率环的制造, 首先可获得折射率为 1.56 的材料 FBG1 玻璃, 其由 56.7% 的 SiO<sub>2</sub>、0.35% 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、30% 的 PbO、4.15% 的 Na<sub>2</sub>O 和 8.65% 的 K<sub>2</sub>O 组成<sup>[26]</sup>。然后, 用旋转声波钻机<sup>[27]</sup> 在上述玻璃的中心钻一个圆孔, 制成高折射率环。因此, 在现有技术下, 完全能够完成文中提出光纤结构的制造。但在制造过程中, 难免会存在一定的制造误差。因此, 讨论了矩形空气孔、圆形空气孔及圆环分别具有 -2%~2% 制造误差情况下对 OAM 传输的影响。图 14(a) 为矩形空气孔制造误差对光纤在 1 550 nm 处支持 OAM 数目及 HE<sub>15,1</sub> 在 1 550 nm 处模式纯度的影响。

能够看出, 矩形空气孔制造误差对光纤支持 OAM 模式数目没有影响, 对模式纯度具有一定的影响, 但影响不大且均处于较高的模式纯度。图 14(b) 为圆形空气孔和圆环制造误差对 1 550 nm 处可支持 OAM 模式数目及 HE<sub>15,1</sub> 模式纯度的影响。可看出在 -2%~2% 制造误差范围内, 圆形空气孔和圆环制造误差对传输 OAM 数目仍未见影响, 均在 1 550 nm 处能达到 150 种 OAM 模式的传输。同时圆形空气孔误差对模式纯度影响很小, 在制造误差范围内波动很小, 圆环误差对其的影响略大于圆形空气孔, 但总体波动仍不大且模式纯度均处于较高水平。因此, 文中设计光纤对制造精度要求不高。

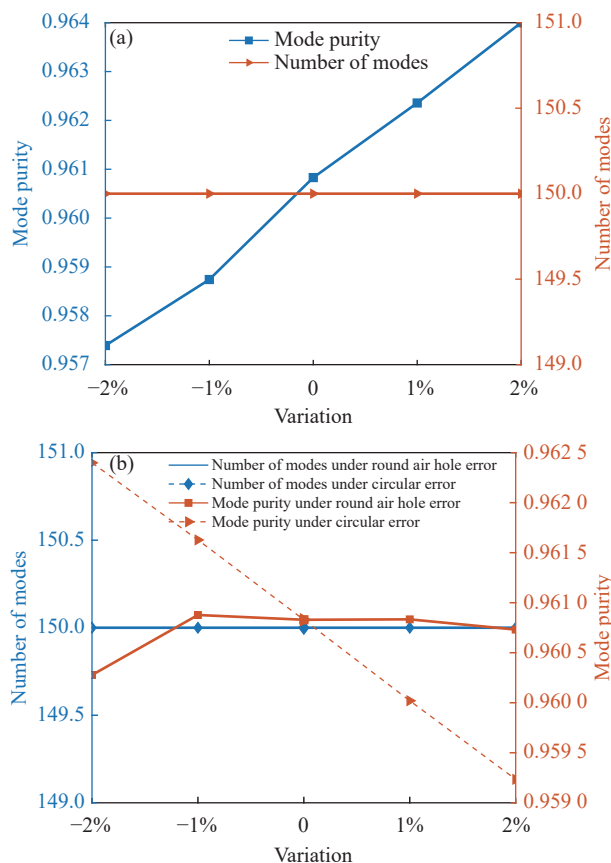


图 14 制造误差的影响。(a) 矩形空气孔制造误差的影响;(b) 圆形空气孔和圆环制造误差的影响

Fig.14 Effects of manufacturing errors. (a) Effects of manufacturing errors of rectangular air holes; (b) Effect of circular air holes and ring manufacturing errors

### 4 与典型 OAM 传输光纤的比较

表 2 为文中光子晶体光纤与典型 OAM 传输光子

晶体光纤在包层空气孔形状、环形传输区域所用填充材料、传输 OAM 数目  $N$ 、最小非线性系数  $\gamma_{\min}$ 、最大限制性损耗  $L_{\max}$ 、最小色散变化  $\Delta D_{\min}$  以及模式纯度方面的比较。结果表明,文中提出光纤在 S+C+L+U 波段能够支持 142 种 OAM 的传输,与其它典型光子晶体光纤相比处于较高水平。虽然该光纤的模式纯度不是处于最高水平,但光纤的最大限制性损

耗处于最低水平,有利于 OAM 模式的长距离传输,最小非线性系数相较于其他光纤维持在较低水平、色散变化较平坦。因此,文中所提出光子晶体光纤不仅能够支持传输更多轨道角动量模式,并且具有更加优良的传输性能,在大容量光纤通信系统中具有一定的应用前景。

表 2 与典型光子晶体光纤性能比较

Tab.2 Compared with typical photonic crystal fiber

Ref.	Shape & Material	$N$	$\gamma_{\min}/W^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$	$L_{\max}/\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$	$\Delta D_{\min}/\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$	Mode quality
[14]	Circle & Schott SF <sub>6</sub>	56	-	10 <sup>-8</sup>	-	>80%
[28]	Elliptical & Silica	80	0.55	10 <sup>-8</sup>	23.1	-
[29]	Bezier & SiO <sub>2</sub>	38	1.04	10 <sup>-6</sup>	4.75	>85%
[30]	Circle & GeO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>	48	0.93	10 <sup>-3</sup>	-	-
[31]	Circle & SiO <sub>2</sub>	30	2.178	10 <sup>-7</sup>	3.59	>90.67%
[32]	Circle & Schott SF <sub>6</sub>	48	-	10 <sup>-8</sup>	-	>95%
Proposed	Rectangle & 1.56 high-index material	142	0.397	10 <sup>-9</sup>	1.46	>93.4%

## 5 结 论

文中提出了一种基于正六边形空气孔排列的新型光子晶体光纤结构,该光纤能够用于 OAM 模式的传输。矩形空气孔和高折射率材料的引入使得环形传输区域与包层之间的折射率差增大,进而有利于更多数目 OAM 模式的稳定传输。通过结构优化得到最优光子晶体光纤结构。研究表明,最优结构下该光纤在 S+C+L+U 波段能够支持 142 种 OAM 模式的传输,且波长越小,能够传输的 OAM 数目越多,可基于此特性实现 OAM 模式特定阶数的传输调控。此外,该光纤还具有低限制性损耗特性,所有模式的最高限制性损耗仅达到 10<sup>-9</sup> dB/m 量级,有利于 OAM 模式的长距离传输。且该光纤还具有低非线性系数、色散变化平坦及高模式纯度等特性,因此,该光子晶体光纤在大容量光纤通信中具有一定的应用价值。

### 参考文献:

[1] Spirit D M, Ellis A D, Barnsley P E. Optical time division multiplexing: systems and networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 1994, 32(12): 56-62.  
 [2] Mukherjee B. WDM optical communication networks: progress and challenges [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in*

*Communications*, 2000, 18(10): 1810-1824.

[3] Essiambre R, Kramer G, Winzer P J, et al. Capacity limits of optical fiber networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(4): 662-701.  
 [4] Li S, Wang J. Multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for high-density space-division multiplexing [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(5): 7101007.  
 [5] Liu Jun, Wang Jian. Research progress of optical signal processing with orbital angular moment [J]. *Journal on Communications*, 2021, 42(11): 217-232. (in Chinese)  
 [6] Guo Zhongyi, Pan Zhenzhen, Gong Chaofan, et al. Research on router device of OAM optical communication [J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(11): 185-197. (in Chinese)  
 [7] Zheng Wei, Zhang Di, Yuan Hao, et al. High capacity optical information encryption technology based on OAM holography and frequency shift [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(7): 20230313. (in Chinese)  
 [8] Hu Z, Zhang X, Hui L, et al. The orbital angular momentum modes supporting fibers based on the photonic crystal fiber structure [J]. *Crystals*, 2017, 7(10): 286-286.  
 [9] Kim M, Kim S. Epsilon-near-zero photonic crystal fibers for a large mode separation of orbital angular momentum modes [J]. *Optik*, 2020, 204: 164209.  
 [10] Russell P. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, 299(5605):

- 358-362.
- [11] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1135.
- [12] Zhang H, Zhang X, Li H, et al. A design strategy of the circular photonic crystal fiber supporting good quality orbital angular momentum mode transmission [J]. *Optics Communications*, 2017, 397: 59-66.
- [13] Bai X, Chen H, Yang H, et al. Design of a circular photonic crystal fiber with square air-holes for orbital angular momentum modes transmission [J]. *Optik*, 2018, 158: 1266-1274.
- [14] Wang W, Wang N, Li K, et al. A novel dual guided modes regions photonic crystal fiber with low crosstalk supporting 56 OAM modes and 4 LP modes [J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 57: 1002213.
- [15] Zhao Lijuan, Yin Lixing, Xu Zhiniu. Design of transverse pressure sensor based on Brillouin dynamic grating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(11): 20230137. (in Chinese)
- [16] Li C, Yan B, Liu J. Refractive index sensing characteristics in a D-shaped photonic quasi-crystal fiber sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2019, 36(10): 1663.
- [17] Pakarzadeh H, Sharif V. Control of orbital angular momentum of light in optofluidic infiltrated circular photonic crystal fibers [J]. *Optics Communications*, 2019, 438: 18-24.
- [18] Rodenburg B, Lavery M, Malik M, et al. Influence of atmospheric turbulence on states of light carrying orbital angular momentum [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3735-3737.
- [19] Liu Q, Tai S, Lu W, et al. Design of pure silica-based photonic crystal fiber for supporting 114 OAM modes transmission [J]. *Journal of Optics*, 2021, 23(9): 095701.
- [20] Liu E, Liang S, Liu J. Double-cladding structure dependence of guiding characteristics in six-fold symmetric photonic quasi-crystal fiber [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2019, 130: 61-67.
- [21] Wang Guanjun, Tan Xuxiang, Wang Zhibin. Nonlinearity of dispersion characteristics of nano-core fiber based on selective filling method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(5): 100-105. (in Chinese)
- [22] Exian L, Wei T, Bei Y, et al. Broadband ultra-flattened dispersion, ultra-low confinement loss and large effective mode area in an octagonal photonic quasi-crystal fiber [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(3): 431-436.
- [23] Zhao L, Zhao H, Xu Z, et al. A design of novel photonic crystal fiber with low and flattened dispersion for supporting 84 orbital angular momentum modes [J]. *Communications in Theoretical Physics*, 2021, 73(8): 085501.
- [24] Baek J H, Song D S, Hwang I K, et al. Transverse mode control by etch-depth tuning in 1120-nm GaInAs/GaAs photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Optics Express*, 2004, 12(5): 859-867.
- [25] Ei Hamzaoui H, Ouerdane Y, Bigot L, et al. Sol-gel derived ionic copper-doped microstructured optical fiber: a potential selective ultraviolet radiation dosimeter [J]. *Optics Express*, 2012, 20(28): 29751-29760.
- [26] Lorenc D, Aranvosiova M, Buczynski R, et al. Nonlinear refractive index of multicomponent glasses designed for fabrication of photonic crystal fibers [J]. *Applied Physics B*, 2008, 93(2-3): 531-538.
- [27] Xian F, Mairaj A K, Hewak D W, et al. Nonsilica glasses for holey fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(6): 2046-2054.
- [28] Ma M, Lian Y. Numerical analysis of a photonic crystal fiber with elliptical air hole for supporting 80 orbital angular momentum modes [J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 72: 102986.
- [29] Kabir MA, Hassan M M, Hossain M N, et al. Design and performance evaluation of photonic crystal fibers of supporting orbital angular momentum states in optical transmission [J]. *Optics Communications*, 2020, 467: 125731.
- [30] Rjeb A, Fateallah H, Chebaane S, et al. Design of novel circular lattice photonic crystal fiber suitable for transporting 48 OAM modes [J]. *Optoelectronics Letters*, 2021, 17(8): 501-506.
- [31] Zhang L, Meng Y. Design and analysis of a photonic crystal fiber supporting stable transmission of 30 OAM modes [J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 61(15): 102423.
- [32] Kabir M A, Ahmed K, Hassan M M, et al. Design a photonic crystal fiber of guiding terahertz orbital angular momentum beams in optical communication [J]. *Optics Communications*, 2020, 475: 126192.

# Design and transmission characteristics of high-order orbital angular momentum transmission fiber (*inside back cover paper*)

Zhao Lijuan<sup>1,2,3</sup>, Wu Yujing<sup>1</sup>, Xu Zhiniu<sup>1\*</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

3. Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

## Abstract:

**Objective** Orbital angular momentum based multiplexing is a special form of space division multiplexing, different OAM modes are orthogonal to each other, based on which different modes can carry different information, and multiple OAM beams with different topological loads can be used as carriers for information transmission, which can greatly improve the channel capacity of the communication system without the need for additional bandwidth. Compared with the transmission of OAM in free space, the transmission of OAM modes in optical fibers can effectively avoid the interference of external factors, and ordinary optical fibers are unable to meet the requirements for the transmission of OAM modes. Photonic crystal optical fibers, as a kind of special optical fibers with high structural designability, offer the possibility of realizing the transmission of OAM modes. In order to achieve high quality transmission of more OAM modes, it is necessary to design photonic crystal optical fibers with suitable structures that can support the transmission of OAM modes.

**Methods** In this paper, a novel photonic crystal fiber structure based on a positive hexagonal arrangement of air holes is proposed. The fiber introduces rectangular air holes with high air filling rate and high refractive index materials to fill the ring transmission region, which can effectively improve the refractive index difference between the ring transmission region and the cladding, and the hexagonal arrangement of the air holes is conducive to the improvement of the effective refractive index difference between the modes. Structure optimization and optimal structure verification take into account the number of OAMs that the fiber can support as well as the effective refractive index difference between modes and mode purity. The optimal fiber structure is obtained through structural optimization, and the performance of the fiber is analyzed using finite element analysis.

**Results and Discussions** The results of the finite element method analyses show that the optimal optical fiber structure is optimized to support 142 OAM modes in the commonly used S+C+L+U band, with the topological charge ordering up to 36. Moreover, the proposed fiber has good transmission characteristics. The confinement loss is below  $10^{-9}$  for all eigenmodes, which is at least one order of magnitude lower than the typical photonic crystal fibers; The maximum effective mode field area can reach  $206.18 \mu\text{m}^2$  and the minimum nonlinearity coefficient is as low as  $0.397 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ; Flat dispersion and minimum dispersion variation are as low as  $1.4578 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ; And purity are 93.4%-96.8% for all eigenmodes. Based on the effect of manufacturing errors on the performance of the optical fiber, it can be seen that the optical fiber does not require high manufacturing accuracy.

**Conclusions** In order to achieve high-quality transmission of more number of OAM modes, this paper proposes a design method of photonic crystal fiber based on hexagonal structure by combining the two ways of rectangular

air holes and the filling of annular transmission region with high refractive index materials. The introduction of rectangular air holes and high refractive index materials increases the refractive index difference between the ring transmission region and the cladding, which in turn facilitates the stable transmission of a larger number of OAM modes. The performance analysis of the optical fiber by Comsol Multiphysics finite element analysis software shows that the photonic crystal fiber can not only support a larger number of OAM modes, but also has the characteristics of low confinement loss, low nonlinear coefficient, flat dispersion change, and high mode purity, which is valuable for high-capacity optical fiber communication.

**Key words:** fiber optics; orbital angular momentum; finite element method; confinement loss; communication capacity

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (62171185, 62273146); Natural Science Foundation of Hebei Province (E2020502010); S & T Program of Hebei (SZX2020034)