

一种支持 130 个轨道角动量模式稳定传输的反谐振光纤

王震, 汪静丽*

南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023

摘要 随着光纤通信技术的不断发展,基于轨道角动量(OAM)模式传输的空分复用技术引起了人们的广泛关注。本文提出了一种反谐振光纤(ARF),其结构主要分为三部分:内层高折射率紫水晶玻璃管作为环芯,其有效增大了纤芯与包层的折射率差,有利于 OAM 模式的稳定传输;中间层二氧化硅(SiO₂)玻璃管起到调节色散的作用;外层负曲率管处于反谐振状态,进一步增强了对环芯光子能量的限制。该光纤可在 1.5~1.7 μm 波段内稳定传输 130 个 OAM 模式。基于矢量有限元法(FEM)对 ARF 进行建模仿真与分析,结果表明,最大有效折射率差为 6.08×10^{-3} ,最小色散变化率仅为 $0.43 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,限制损耗(CL)维持在 $10^{-14} \sim 10^{-8} \text{ dB/m}$ 量级之间且最高模式纯度达到 99.26%,有效模场面积最大值为 $187.38 \mu\text{m}^2$,非线性系数最小值为 $0.87 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,数值孔径(NA)均大于 0.064。此外,还分析了光纤制作误差对其性能的影响。本文所设计的支持 OAM 模式传输的 ARF 在长距离光纤通信、高速信息传输等领域具有广泛的应用前景。

关键词 轨道角动量;反谐振光纤;限制损耗;色散;光纤通信

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231373

1 引言

近年来,随着光纤通信的不断发展,时分复用、偏分复用等传统复用技术已无法满足人们对容量的需求^[1]。为解决该问题,研究者们提出了空分复用(SDM)技术,而基于轨道角动量(OAM)模式承载信息是 SDM 实现方式中的一种,任意两种不同 OAM 模式的正交性、拓扑荷数在理论上可以是任意整数等优势可大幅提高通信容量和频谱效率^[2],具有广阔的应用前景。传统的通信光纤虽然可以传输一定数量的 OAM 模式,但较大的损耗往往会导致传输距离过短、传输信息正确率低等问题,因此需要寻找一种更为合适的传输介质。

目前,研究者们主要基于光子晶体光纤(PCF)结构传输 OAM 模式,通过改变纤芯或包层空气孔等参数获得优良特性。基于结构主要分为三类^[3]:六边形 PCF^[4],其在高非线性效应和增大传输带宽方面极具优势;单/多环芯圆形 PCF^[5],可支持传输更多 OAM 模式数;特殊结构 PCF^[6],能改善光纤色散、限制损耗(CL)等。然而,PCF 存在结构复杂、制作难度大且成本高的问题,且对纤芯光子能量的限制能力有限,CL 较大。因此,尝试新的设计方法来解决这些问题很有必要。

反谐振光纤(ARF)是一种由一定厚度的负曲率管堆叠而成的新型光纤^[7],负曲率管的菲涅耳反射可以增强纤芯对光束的限制,进一步降低 CL。另外,ARF 的制作方法相比 PCF 更加简单,较少的结构参数令 ARF 更容易被优化,从而令光纤性能更优。基于以上两点优势,研究者们尝试利用 ARF 传输 OAM 模式来解决当前 PCF 结构存在 CL 较高及结构复杂的问题。2019 年, Tu 等^[8]设计了一种可传输 26 个 OAM 模式的 ARF, CL 可低至 10^{-13} 量级。2021 年, Fu 等^[9]提出了一种结构极为简单的 ARF,仅由环芯与内外两层负曲率管组成,可稳定传输 30 个 OAM 模式。2022 年, Mehedi 等^[10]通过在 ARF 环芯中引入高折射率 SF2 材料,可实现稳定传输 64 个 OAM 模式。目前利用 ARF 传输 OAM 模式的设计中,虽然具有提高光纤传输特性和简化光纤制作难度等优势,但依然存在传输 OAM 模式数少的问题。

本文设计了一种由两组不同尺寸负曲率反谐振管组合而成的 ARF,通过在环芯与包层中分别引入高折射率材料与负曲率管,可传输更多 OAM 模式,且提高光纤传输特性的同时简化了制作难度。基于矢量有限元法(FEM),采用专业商用 COMSOL Multiphysics 软件^[11-12]对光纤进行建模和仿真。结果表明:在 1.5~1.7 μm 波段内,所提出的 ARF 可传输 130 个 OAM 模

收稿日期: 2023-08-07; 修回日期: 2023-09-11; 录用日期: 2023-10-07; 网络首发日期: 2023-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(12174199, 61571237)、江苏省自然科学基金(BK20221330, BK20151509)

通信作者: *jlwang@njupt.edu.cn

式且有效折射率差都大于 8.5×10^{-4} , 色散较小且十分平坦, CL 均低于 10^{-8} dB/m, 模式纯度均大于 98.51%, 并且有效模场面积、非线性系数、数值孔径 (NA) 光学特性均较好。

2 基本原理与 ARF 结构设计

2.1 基本原理

OAM 模式在环芯中受到全内反射限制的同时还受到来自包层负曲率管菲涅耳反射的限制, 又称为反谐振^[8]。OAM 模式由一系列本征模的奇偶模矢量叠加形成, 这些本征模作为亥姆霍兹方程的解, 分为横电模 (TE)、横磁模 (TM) 以及混合模 (HE、EH)。当 $l \geq 2$ 时, 不同阶数的 OAM 模式由相应 HE 模或 EH 模^[13]按下式叠加而成:

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

式中: l 是拓扑荷数, 即光纤中 OAM 模式阶数; m 是径向阶数, 为了便于解复用, m 通常为 1; OAM 上标“ \mp ”分别表示右或左旋圆偏振, 下标“ \pm ”则代表右或左波前旋转方向。此时, 对于 $l \geq 2$ 的任意整数对应着 4 个 OAM 模式, 即 4 个信息态可用作四个独立的信道。

当 $l=1$ 时, OAM 模式的叠加规律如下式所示:

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

由式 (2) 可知, OAM 模式可由横电模 $\text{TE}_{0, m}$ 和横磁模 $\text{TM}_{0, m}$ 以及 HE 奇偶模矢量叠加组成。但 TE 模和 TM 模在光纤中的传播常数不同, 容易产生模间色散, 使叠加得到的 OAM 模式不能稳定传输, 因此 $l=1$ 时只有

HE 奇偶模矢量叠加得到的 2 个 OAM 模式才能在光纤中稳定传输, 可被用作两个独立的信道。由式 (1) 和式 (2) 可知, 光纤中可传输的 OAM 模式数为 $4 \times l - 2$, 而更多的 OAM 模式则能承载更多的信息, 从而提高通信容量。

2.2 ARF 结构设计

ARF 截面结构如图 1 所示, 由内而外: 中心是半径为 R_0 的空气孔; 内层是厚度为 d_0 的紫水晶玻璃管用作环芯, 其中 R_0 和 R_1 分别为环芯的内外径; 中间层是厚度为 d_1 的二氧化硅 (SiO_2) 玻璃管, 其内外径分别为 R_1 和 R_2 ; 外层的内外径分别为 R_2 和 R_3 , 其中均匀分布着十组 SiO_2 嵌套管, 嵌套管由外半径 $r_2=3.5 \mu\text{m}$ 的负曲率管内切于外半径 $r_1=6 \mu\text{m}$ 的负曲率管构成, $t=0.5 \mu\text{m}$ 为管厚度。环芯之外的中间层、外层以及最外侧起结构支撑作用的 SiO_2 环为光纤的包层, 其余部分为空气。紫水晶的折射率为

$$n_1 \left(\frac{1}{n_1^2 - 1} = -\frac{0.0065}{\lambda^2} + 0.7359 \right), \text{SiO}_2 \text{ 的折射率为 } n_2 \left[n_2 = \left(1 + \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161} \right)^{1/2} \right]$$

分别由文献 [14] 与文献 [15] 中所示的 Sellmeier 公式确定, 其中 λ 为入射波长。在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下, $n_1=1.55, n_2=1.44$, 显然, 纤芯与包层存在较大的折射率差, 有利于提高混合模的有效折射率差, 并允许更多高阶 OAM 模式同时传输, 通过优化相关结构参数可以获得优异的光纤传输特性。

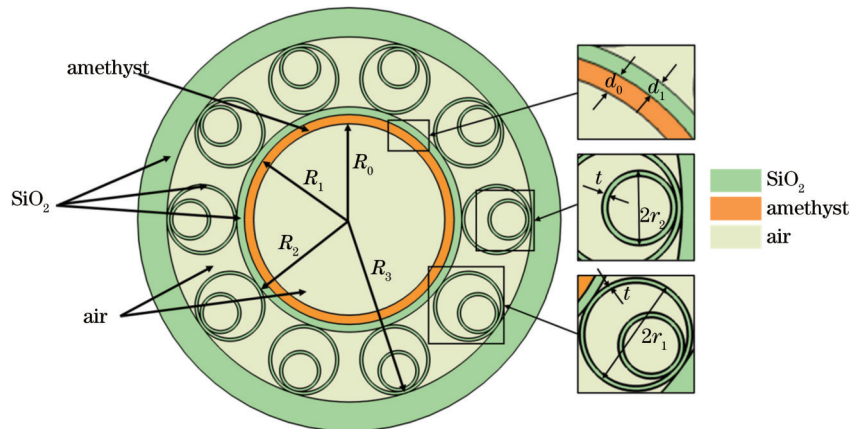


图 1 ARF 横截面

Fig. 1 Cross section of ARF

3 结构优化与特性分析

本节首先在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下对提出的 ARF 进行参数优化, 考虑到光纤的实际应用, 因而分析并讨论了 ARF 在 $1.5 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段内稳定传输 OAM 的模式数及光纤传输特性, 希望其满足: 1) 叠加形成同阶 OAM

模式的混合模有效折射率差大于 1.0×10^{-4} , 避免相邻矢量模式间的简并, 影响 OAM 模式稳定传输; 2) 在不出现高阶径向模的前提下, 传输更多 OAM 模式, 以提高光纤通信容量; 3) 具有良好的光纤性能, 即平坦色散、低 CL、高模式纯度等。

3.1 优化与讨论

中心空气孔半径 R_0 、内层环芯厚度 d_0 、中间层玻璃管厚度 d_1 作为 ARF 中的关键参数对 OAM 模式数、光纤传输特性产生着重要影响。为了便于研究,以下优化过程在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下展开且 $m=1$ 。假设 $R_1=18 \mu\text{m}$ 、 $d_1=1 \mu\text{m}$ 不变,观察 R_0 在 $13.0\sim 16.5 \mu\text{m}$ 范围内变化时对 OAM 模式数的影响。由图 2 可见,OAM 模式数随 R_0 的增大而线性递增,在 R_0 为 $16.4\sim 16.5 \mu\text{m}$ 范围内达到最大值,随后线性递减,这是由于环芯过厚将会激发高阶径向模式,太薄又会对模式纯度产生不利影响并导致模式数减少^[16]。适当增大环芯厚度可以更好地限制环芯中 OAM 模式的传输,因此选择 $R_0=16.4 \mu\text{m}$ 。

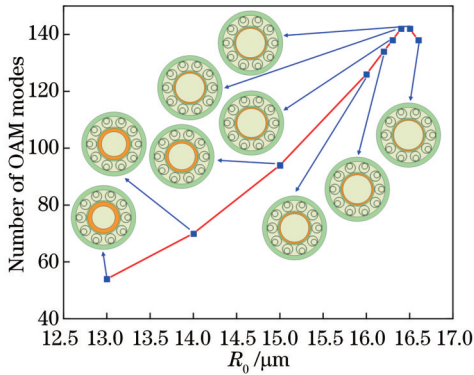


图 2 OAM 模式数随 R_0 的变化曲线

Fig. 2 Relationship between R_0 and number of OAM modes

在 $R_0=16.4 \mu\text{m}$ 、 $d_1=1 \mu\text{m}$ 保持不变的前提下,分析环芯厚度 d_0 在 $0.9\sim 2.1 \mu\text{m}$ 范围内变化时对 OAM 模式数的影响,结果如图 3 所示,OAM 模式数呈先递增后递减的趋势,在 d_0 为 $1.5\sim 1.6 \mu\text{m}$ 范围内达到最

大值。由于适当增大环芯厚度可用于优化色散、有效模场面积和非线性系数^[17],因此取 $d_0=1.6 \mu\text{m}$ 。

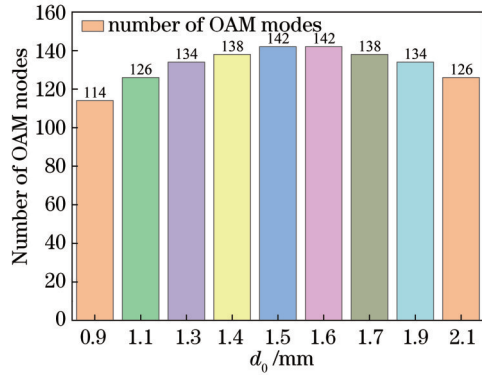


图 3 OAM 模式数随 d_0 的变化曲线

Fig. 3 Relationship between d_0 and number of OAM modes

保持 $R_0=16.4 \mu\text{m}$ 、 $d_0=1.6 \mu\text{m}$ 不变,分析 d_1 在 $0.7\sim 1.6 \mu\text{m}$ 范围内变化时对 OAM 模式数的影响,结果如表 1 所示,很明显,OAM 模式数随 d_1 变化并不敏感,在 $d_1=0.8 \mu\text{m}$ 时达到最大值。而且改变 d_1 可以优化色散, $d_1=0.8 \mu\text{m}$ 时 ARF 稳定传输 OAM 模式数虽能达到最大但色散并非最佳。为了获得接近零且平坦的色散,选择基模 $\text{HE}_{1,1}$ 为观察项,分析 d_1 在 $0.7\sim 1.6 \mu\text{m}$ 范围变化时基模 $\text{HE}_{1,1}$ 色散随波长的变化关系。如图 4 所示,当 $d_1=1.3 \mu\text{m}$ 时色散较小且变化率仅为 $3.97 \text{ ps}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$,综合考虑 ARF 传输 OAM 模式数及色散特性,取 $d_1=1.3 \mu\text{m}$ 最合适。综上所述,当 ARF 参数选择为 $R_0=16.4 \mu\text{m}$ 、 $d_0=1.6 \mu\text{m}$ 、 $d_1=1.3 \mu\text{m}$ 、 $R_1=18 \mu\text{m}$ 、 $R_2=19.3 \mu\text{m}$ 、 $R_3=31.3 \mu\text{m}$ 时,光纤色散特性最佳且稳定传输 OAM 模式数最大。

表 1 OAM 模式数随 d_1 的变化关系

Table 1 Relationship between d_1 and number of OAM modes

| $d_1 / \mu\text{m}$ | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Supported OAM modes | 142 | 146 | 142 | 142 | 138 | 138 | 138 | 134 | 134 | 130 |

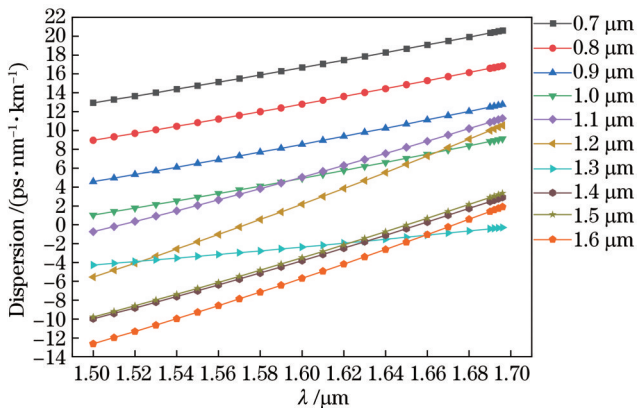


图 4 $\text{HE}_{1,1}$ 色散随 d_1 的变化曲线

Fig. 4 Relationship between dispersion of $\text{HE}_{1,1}$ and d_1

最后,还分析了光纤处于弯曲状态时对 OAM 模式数及弯曲损耗的影响。用弯曲半径表征光纤弯曲状态,图 5 所示为弯曲半径在 $1\sim 100 \text{ mm}$ 范围内变化时对 OAM 模式数的影响。结果表明,当弯曲半径大于 3 mm 时 ARF 可保持 126 个 OAM 模式稳定传输。以矢量叠加成 $\text{OAM}_{2,1}$ 、 $\text{OAM}_{9,1}$ 、 $\text{OAM}_{17,1}$ 、 $\text{OAM}_{25,1}$ 的 8 组混合模为观察项,讨论弯曲半径在 $1\sim 100 \text{ mm}$ 范围内变化时对弯曲损耗的影响,如图 6 所示,当弯曲半径逐渐增大时,弯曲损耗能够维持在 $10^{-11}\sim 10^{-8} \text{ dB/m}$ 范围内,说明该结构具有良好的抗弯曲性能。

3.2 传输模式

考虑到光纤的实际应用,希望其具有一定的传输带宽。基于 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下优化得到的 ARF 进行仿真,结果表明,在 $1.5\sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段内稳定传输的最高

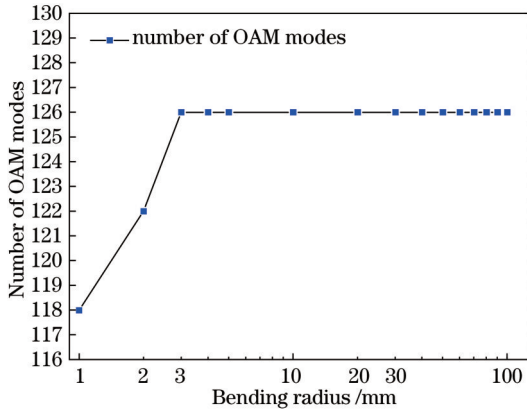


图 5 OAM 模式数随弯曲半径的变化曲线

Fig. 5 Number of OAM modes varying with bending radius

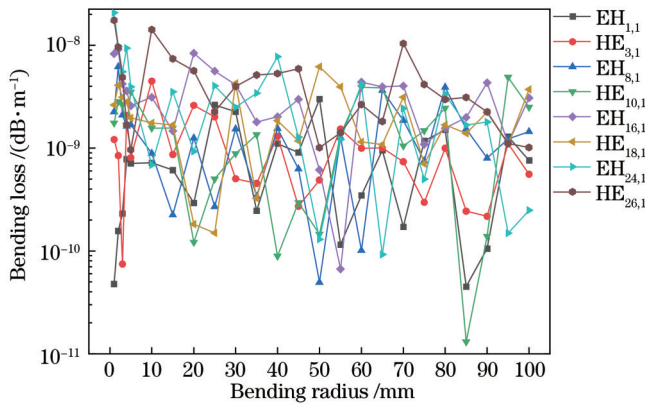


图 6 部分混合模弯曲损耗随弯曲半径的变化曲线

Fig. 6 Bending loss of partial hybrid modes varying with bending radius

OAM 模式阶数 $l=33$, 共 130 个 OAM 模式, 极大提高了光纤通信容量。对于相同阶数的混合模而言, HE 模和 EH 模具有 $\pi/2$ 的相位差, 为了能够直观地了解混合模及 OAM 模式相关特性, 在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下将 4 组 HE/EH 模的偶模分量沿 z 方向光场分布图及相应的 OAM 模式归一化电场强度分布图和相位分布图归纳于图 7 中。由图 7 (a)~(h) 可知, HE 模的光场更靠近包层, EH 模则更靠近纤芯, 此方法可有效区分 HE/EH 模。图 7 (i)~(l) 给出了混合模矢量叠加得到的 4 个 OAM 模式的归一化电场强度分布图, 由图可见, 随着 l 的不断增大, 光子能量泄漏到包层的趋势变大, 中心空气孔的占比增大, 光环也越来越细。图 7 (m)~(p) 给出了相应 OAM 模式相位随 l 的变化关系, 由于携带相位因子 $e^{i\theta}$, 相位结构始终呈螺旋状, 变化范围为 $[0, 2\pi l]$ 。

3.3 有效折射率和有效折射率差

有效折射率作为 ARF 的基本物理量, 决定了有效折射率差和色散。图 8 给出了在 $1.5\sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段内, 混合模的有效折射率随波长的变化曲线, 高阶模相对低阶模而言, 其有效折射率随波长的变化更加明显。

这是因为高阶模光场随波长增大而展宽, 能量容易泄漏到包层, 导致相同波长间隔下高阶模有效折射率下降幅度更大。此外, 同阶混合模在相同波长条件下, HE 模的有效折射率更大。

另外, 判断光纤能否支持 OAM 模式稳定传输^[18] 应满足下式:

$$\Delta n_{\text{eff}} = |n_{\text{eff}}(\text{HE}_{l+1,1}) - n_{\text{eff}}(\text{EH}_{l-1,1})| > 10^{-4}, \quad (3)$$

即相邻混合模间的有效折射率差 Δn_{eff} 大于 10^{-4} , 否则 OAM 模式在传输过程中将退化为线偏振(LP)模式。

图 9 给出了 Δn_{eff} 随波长的变化曲线, 在 $1.5\sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段内, Δn_{eff} 随波长的增大而不断增大, 均大于 8.5×10^{-4} , 最大值为 6.08×10^{-3} ($\text{OAM}_{2,1}$)。这是由于紫水晶折射率高于 SiO_2 , ARF 纤芯与包层间较大的折射率差有利于相邻混合模间形成大的 Δn_{eff} 。另外, 相同波长下低阶模会有更大的 Δn_{eff} , 因此低阶模更稳定。因为较大的有效折射率差可有效抑制 OAM 模式退化为 LP 模式, 减少模间串扰^[19]。

3.4 色散

不同波长的光因传输路径不完全相同, 到达终点的时间也不相同, 从而出现脉冲展宽的现象, 称之为色散。多模光纤中, 光纤色散包括材料色散、波导色散和模间色散, 由于光纤传输 OAM 模式的有效折射率差大于 10^{-4} , 可忽略模间色散的影响, 其总色散可通过下式来计算^[20]:

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2}, \quad (4)$$

式中: c 为真空中的光速; $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 是模式有效折射率的实部。色散主要取决于 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 对波长的二阶导数, 在相同间隔波长下, 模式有效折射率的变化越小, 色散越平坦。

图 10 给出了在 $1.5\sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段内混合模的色散变化曲线, 从图中可以看出, 色散与波长呈正相关, 且高阶模相对低阶模色散更高, 这是由于随波长的增加, 高阶模的有效折射率变化更大, 这表明光纤中传输的高阶模不够稳定。值得一提的是, 所有混合模色散变化都呈现出平坦状态, 最小色散变化量为 $0.43 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ($\text{HE}_{4,1}$), 平坦的色散有利于在光纤通信系统中进行色散补偿。

3.5 限制损耗

ARF 中负曲率管的大小和排列方式不同, 对光波的限制能力也不同, 环芯中将有一部分能量泄漏到包层中, 可用下式所示的 C_L ^[21] 来表征:

$$C_L = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{20}{\ln 10} \text{Im}(n_{\text{eff}}) (\text{dB/m}), \quad (5)$$

式中, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 是有效折射率的虚部, 且 C_L 表征了 ARF 环芯对光子能量约束能力的强弱。

图 11 给出了在 $1.5\sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段内混合模 CL 的变化曲线。很明显, CL 随着波长的递增没有明显规律, 其值维持在 $10^{-14}\sim 10^{-8} \text{ dB/m}$ 之间。图中插图显

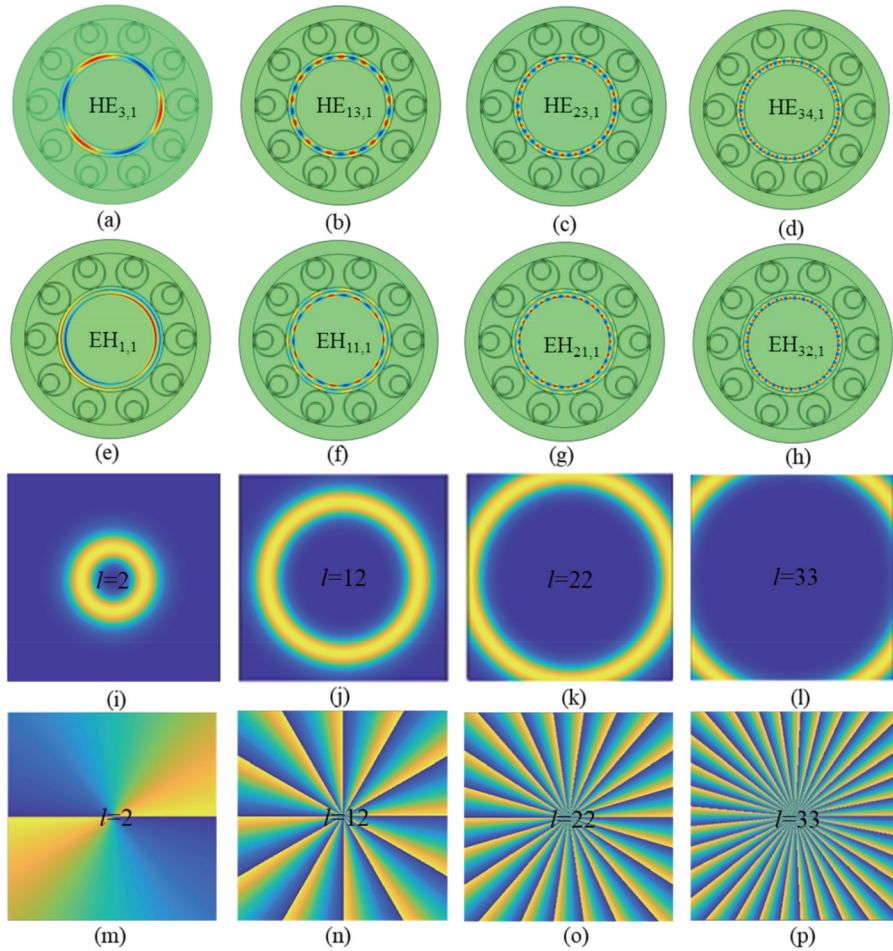


图 7 ARF 仿真结果。(a)~(h) 部分 HE/EH 模沿 z 方向的光场分布图; (i)~(l) $l=2, 12, 22, 33$ 时 OAM 模式的归一化电场强度分布图; (m)~(p) $l=2, 12, 22, 33$ 时 OAM 模式的相位分布图

Fig. 7 Simulation results of ARF. (a)-(h) Optical field distributions of partial HE/EH modes in z direction; (i)-(l) normalized electric field intensity distributions of OAM modes at $l=2, 12, 22, 33$; (m)-(p) phase distribution diagrams of OAM modes at $l=2, 12, 22, 33$

示了 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下各混合模的 CL, 其中 $\text{HE}_{12,1}$ 模 CL 低至 10^{-12} dB/m, 说明该模式在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下能传输更远的距离。

3.6 模式纯度

除了追求更多的 OAM 模式, 还必须注意这些模式的质量。较高的模式质量不仅使 OAM 模式的传播更加稳定, 而且可以降低接收端解复用的难度。模式质量可以用下式所示的模式纯度 η 来表征:

$$\eta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{\iint_{\text{ring}} |\vec{E}|^2 dx dy}{\iint_{\text{cross-section}} |\vec{E}|^2 dx dy}, \quad (6)$$

式中, I_r 和 I_c 分别是环芯和整个 ARF 截面的平均光强度。较高的模式纯度意味着环芯对光子能量约束更强, 此时光纤具有更低的 CL^[23], 且模式纯度与模间串扰成反比, 更高的 η 可以保证更好的光纤传输效率^[24]。

图 12 给出了在 $1.5 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段内混合模的模式纯度随波长的变化曲线。结果表明, 所有混合模的模

式纯度均在 98.16% ($\text{EH}_{1,1}$) 以上, 最大值为 99.25% ($\text{HE}_{1,1}$), HE 模的模式纯度高于 EH 模, 被用于光纤复用系统中的效果也相对更好。图中插图显示了 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下各混合模的模式纯度, 很明显, HE 模的模式纯度逐渐减小, 这是由于 HE 远离环芯, 随 l 的递增光场分布逐渐变宽, 降低了模式纯度。对 EH 模而言, 由于高阶 EH 模光场更靠近环芯, 在环芯中产生更大的电场, 从而导致高阶模的模式纯度逐渐升高。

3.7 有效模场面积和非线性系数

有效模场面积 A_{eff} 是指光纤能量集中区域的横截面积, 由下式^[25]来决定:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\iint |E(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\iint |E(x, y)|^4 dx dy}, \quad (7)$$

式中, $E(x, y)$ 是模式的电场强度分布。

图 13 所示为 $1.5 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段内混合模的 A_{eff} 随波长的变化曲线。从图中可以看出, A_{eff} 与波长呈正相关, 这是因为随着波长的增大, 环芯对光子能量的限制

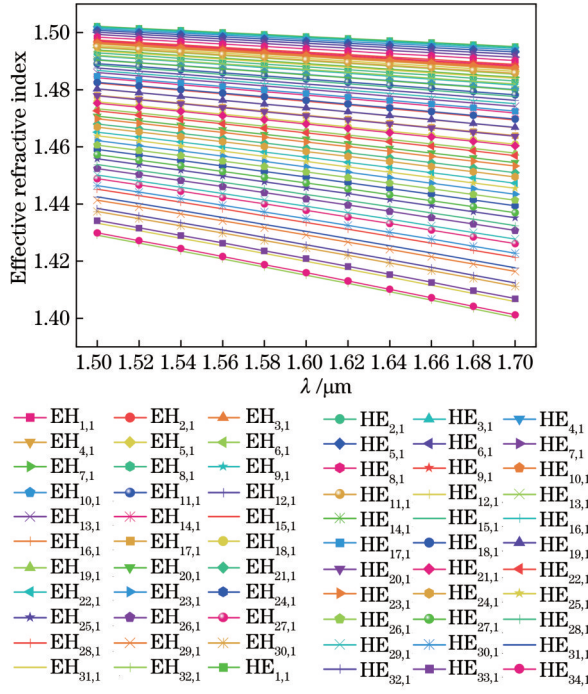


图 8 混合模有效折射率随波长的变化曲线

Fig. 8 Effective refractive index of hybrid modes as a function of wavelength

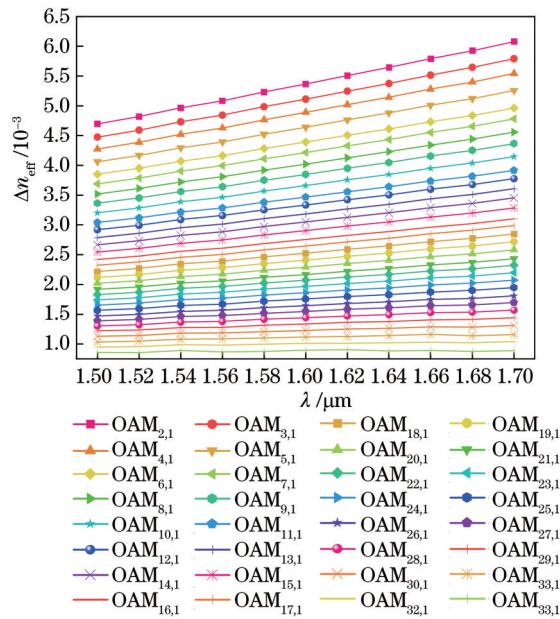


图 9 Δn_{eff} 随波长的变化曲线

Fig. 9 Δn_{eff} as a function of wavelength

减弱,使得光束更容易泄漏到包层。对于同波长合成同阶 OAM 模式的混合模,HE 模的有效模场面积更大,这是因为 HE 模更靠近包层使得光子能量更容易泄漏。此外,在 $1.7 \mu\text{m}$ 处,HE_{34,1} 模的有效模场面积达到最大值,为 $187.38 \mu\text{m}^2$; 而 EH_{32,1} 模在 $1.7 \mu\text{m}$ 处的有效模场面积高达 $176.82 \mu\text{m}^2$ 。有效模场面积在 $1.5 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段内总体分布在 $118 \sim 187 \mu\text{m}^2$ 之间。

非线性效应是指强光作用下由于介质的非线性极

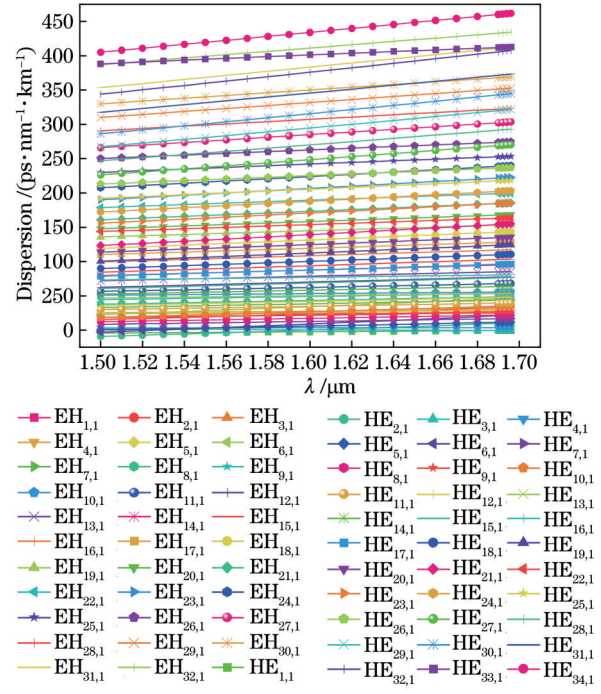


图 10 色散随波长的变化曲线

Fig. 10 Dispersion as a function of wavelength

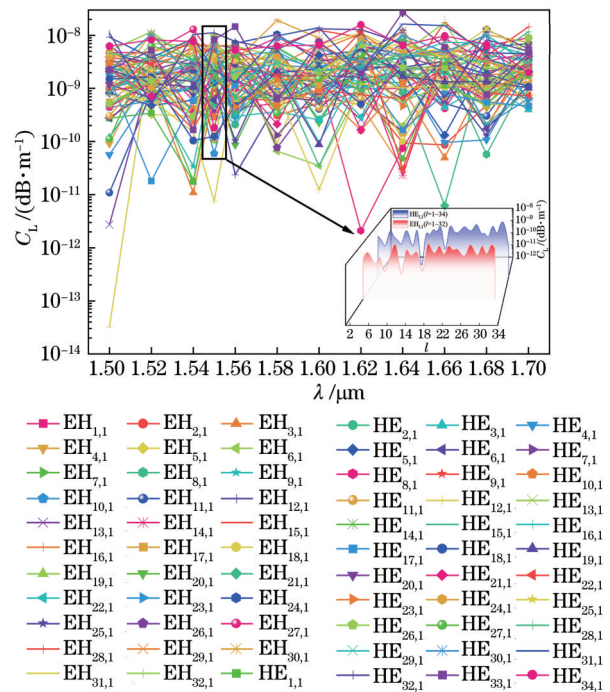


图 11 CL 随波长的变化曲线,其中插图为 $1.55 \mu\text{m}$ 波长下各混合模的 CL 示意图

Fig. 11 Relationship between CL and wavelength. Illustration is a schematic diagram of CL of each hybrid mode at a wavelength of $1.55 \mu\text{m}$

化而产生的效应,非线性系数 γ 是衡量非线性效应的参数指标,可通过下式^[26]计算得到:

$$\gamma = \frac{2\pi n_3}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (8)$$

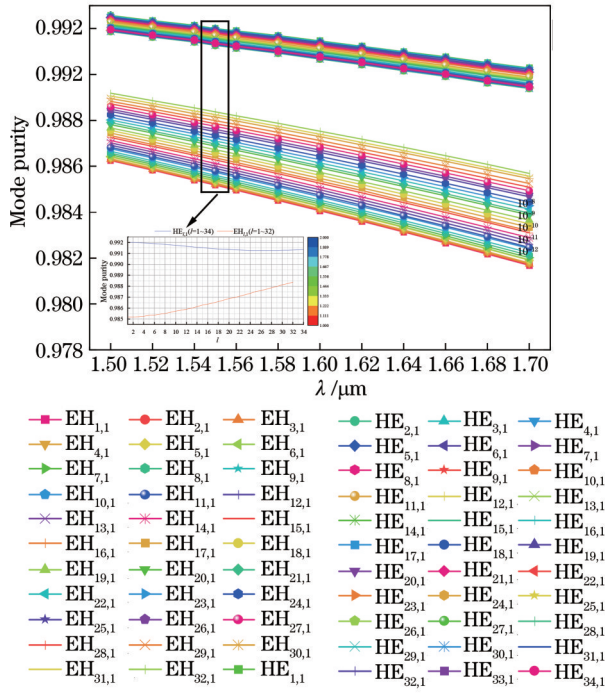


图 12 模式纯度随波长的变化曲线,其中插图为 1.55 μm 波长下各混合模的模式纯度示意图

Fig. 12 Mode purity as a function of wavelength. Illustration is a schematic diagram of mode purity of each hybrid mode at a wavelength of 1.55 μm

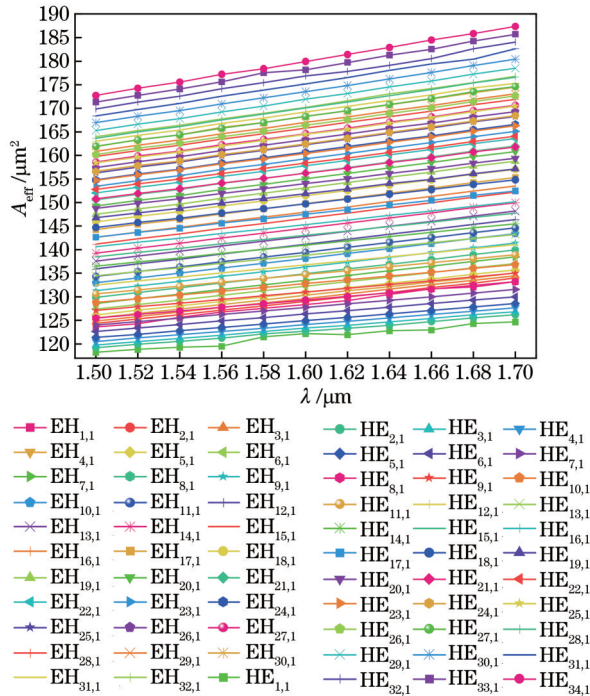


图 13 有效模场面积随波长的变化曲线

Fig. 13 Effective mode area as a function of wavelength

式中, n_3 是紫水晶的非线性折射率系数, 根据文献 [27] 可知, $n_3 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ 。

图 14 所示为在 1.5~1.7 μm 波段内 ARF 的非线性系数 γ 随波长的变化曲线。由于 γ 与 A_{eff} 成反比, 而

HE 模相比 EH 模具有更大的 A_{eff} , 因此前者具有更小的 γ 值。从图中可见, γ 随波长的增加而降低, 所有混合模的 γ 始终保持在 $1.38 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 以下, 且最小值为 $0.87 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ (HE_{34,1}), 说明本文设计的 ARF 可以稳定传输所有模式, 使光纤远距离传输成为可能。

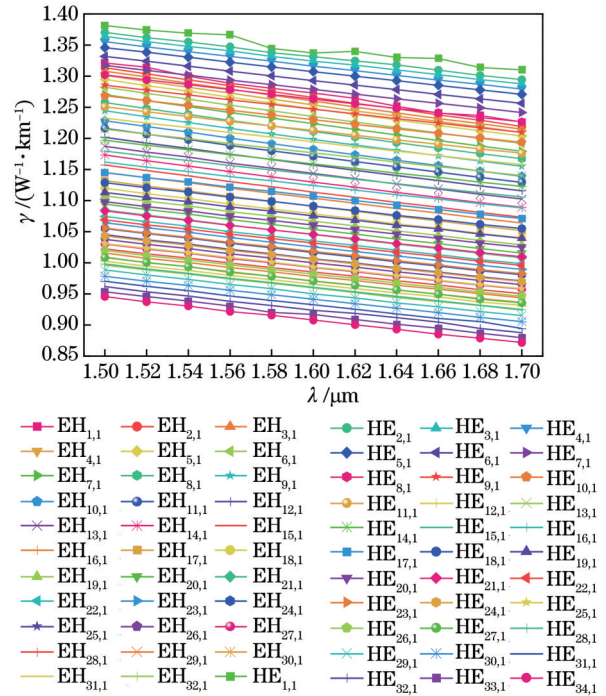


图 14 非线性系数随波长的变化曲线

Fig. 14 Nonlinear coefficient as a function of wavelength

3.8 数值孔径

数值孔径 NA 反映了光纤的集光能力, 是一个无量纲常数, 可由下式 [28] 来确定:

$$NA = \left[1 + \frac{\pi A_{\text{eff}}}{\lambda^2} \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

在衡量光纤性能时, NA 越大, 光纤的集光能力越强。

图 15 给出了混合模的 NA 随波长的变化曲线, 可见随着波长的增加, NA 不断增大, 集光能力更强。在 1.5~1.7 μm 波段内, NA 集中在 0.064~0.086 之间。

3.9 性能对比

将所设计的 ARF 与已报道的光纤进行比较, 如表 2 所示。很明显, 所提出的 ARF 能够传输 130 个 OAM 模式, 数量最多, 且模式纯度较高; CL 和最小色散变化量 ΔD 相比其他文献具有优势; 非线性系数 γ 与其他文献相当。由此可见, ARF 具有一定的优势, 应用于光纤通信系统中将具有更高的通信容量和频谱效率。

此外, 文献调研表明, 本文提出的 ARF 可通过套管法和堆积法相结合来进行制作 [31-33]。但在实际制作过程中, 制作误差不可避免 [34], 因此本文仿真分析了制作误差造成的光纤厚度不理想 (紫水晶管厚度、二氧化硅管厚度、负曲率管厚度)、结构形变 (椭圆形变和坍塌形变) 对光纤性能的影响。结果表明, 提出的支持稳定

表 2 支持稳定传输 OAM 模式的各种类型光纤

Table 2 Various types of optical fibers supporting stable transmission of OAM modes

| Ref. | Structure type | Supported OAM mode | Δn_{eff} | Minimum $\Delta D /$ ($\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$) | CL / ($\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$) | OAM purity / % | $\gamma /$ ($\text{w}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$) |
|-----------|---|--------------------|------------------------------|---|---|-------------------|--|
| [8] | ARF | 26 | $>1.0 \times 10^{-4}$ | — | $>10^{-13}$ | — | 1.30-1.38 |
| [9] | ARF | 30 | $>1.426 \times 10^{-4}$ | 5.98 | 10^{-11} - 10^{-9} | >98.295 | >0.52 |
| [10] | ARF | 64 | $\approx 1.0 \times 10^{-2}$ | -8.838 | 10^{-5} - 10^{-4} | 97.00-99.00 | — |
| [24] | Hollow core tube embedded vortex fiber | 44 | $>2.0 \times 10^{-3}$ | 1.50 | 10^{-13} - 10^{-8} | >94.50 | 0.65-0.89 |
| [29] | Circular PCF | 48 | $>1.0 \times 10^{-4}$ | 5.50 | $<2 \times 10^{-3}$ | — | 0.93-1.22 |
| [30] | Circular PCF | 114 | $>5.73 \times 10^{-4}$ | 20.42 | 10^{-11} - 10^{-7} | — | 0.60-1.80 |
| This work | ARF | 130 | $>8.5 \times 10^{-4}$ | 0.43 | 10^{-14} - 10^{-8} | 98.16-99.20 | 0.37-1.38 |

传输 OAM 的 ARF 有一定的制作容差,降低了制作难度。

制作工艺相对简单,可通过套管法和堆积法相结合来制作,且具有一定的制作容差性。该光纤在长距离光纤通信、高速信息传输等领域有广泛的应用前景,为利用反谐振结构传输 OAM 模式的光纤设计提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Ellis A D, Zhao J, Cotter D. Approaching the non-linear Shannon limit[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28 (4): 423-433.
- [2] 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.
- [3] Lian Y D, Qi X, Wang Y H, et al. OAM beam generation in space and its applications: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 151: 106923.
- [4] 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.
- [5] Han M Z, Liu Q, Sun Y D, et al. A novel nested three-ring-core photonic crystal fiber for OAM transmission[J]. Optik, 2022, 270: 169981.
- [6] Kabir M A, Hassan M M, Ahmed K, et al. Novel spider web photonic crystal fiber for robust mode transmission applications with supporting orbital angular momentum transmission property [J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(7): 1-17.
- [7] Couy F, Benabid F, Light P S. Large-pitch kagome-structured hollow-core photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 2006, 31 (24): 3574-3576.
- [8] Tu J J, Liu Z Y, Gao S C, et al. Ring-core fiber with negative curvature structure supporting orbital angular momentum modes [J]. Optics Express, 2019, 27(15): 20358-20372.
- [9] Fu H H, Yi Z, Shi Y, et al. Circular anti-resonance fibre supporting orbital angular momentum modes with flat dispersion, high purity and low confinement loss[J]. Journal of Modern Optics, 2021, 68(15): 784-791.
- [10] Hassan M M, Abdulrazak L F, Alharbi A G, et al. Novel approach of anti-resonant fiber with supporting 64 orbital angular momentum modes for optical communication[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(12): 9891-9900.
- [11] 马欣欣, 李建设, 郭海涛, 等. $4 \mu\text{m}$ 单模单偏振疏系负曲率反谐振光纤[J]. 光学学报, 2023, 43(19): 1906003. Ma X X, Li J S, Guo H T, et al. Single-mode single-polarization chalcogenide negative-curvature hollow-core fibers at $4 \mu\text{m}$ [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(19): 1906003.
- [12] Gao S F, Wang Y Y, Ding W, et al. Hollow-core conjoined-

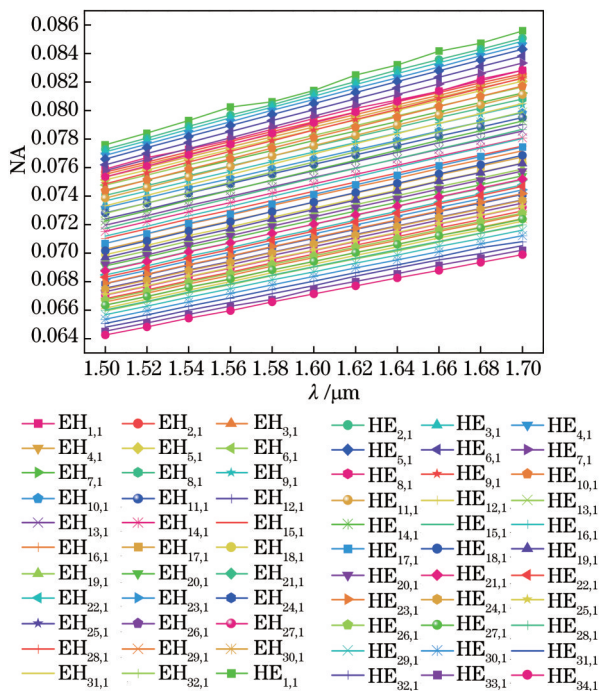


图 15 NA 随波长的变化曲线

Fig. 15 NA as a function of wavelength

4 结 论

本文设计了一种可稳定传输 OAM 模式的 ARF, 分析了中心空气孔半径、环芯厚度、 SiO_2 厚度对光纤传输 OAM 模式数及相关光学特性的影响, 分别讨论了光纤的若干性能指标与波长之间的变化关系。研究表明, 所设计的 ARF 在 $1.5 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段范围内支持 130 个 OAM 模式在光纤中同时稳定传输, 较高的有效折射率差可有效抑制模式耦合, 低且平坦的色散、低 CL、高模式纯度、大有效模场面积、高 NA 和低非线性系数有利于光纤长距离传输。此外, 所设计的 ARF 制

- tube negative-curvature fibre with ultralow loss[J]. Nature Communications, 2018, 9: 2828.
- [13] Hisatomi M, Parker M C, Walker S D. Singular optical fibre featuring refractive index dislocation for chiral waveguiding of high orbital angular momentum light[C]//2005 Pacific Rim Conference on Lasers & Electro-Optics, July 14, 2005, Tokyo, Japan. New York: IEEE Press, 2006: 959-960.
- [14] Shannon R D, Shannon R C, Medenbach O, et al. Refractive index and dispersion of fluorides and oxides[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2002, 31(4): 931-970.
- [15] Biswas B, Ahmed K, Paul B K, et al. Numerical evaluation of the performance of different materials in nonlinear optical applications[J]. Results in Physics, 2019, 13: 102184.
- [16] Hong S, Lee Y S, Choi H, et al. Hollow silica photonic crystal fiber guiding 101 orbital angular momentum modes without phase distortion in C+L band[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(5): 1010-1018.
- [17] Liu C, Fu H H, Hu C J, et al. Optimization of photonic crystal fibers for transmission of orbital angular momentum modes[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(11): 639.
- [18] 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.
- [19] Xu M N, Zhou G Y, Chen C, et al. A novel micro-structured fiber for OAM mode and LP mode simultaneous transmission[J]. Journal of Optics, 2018, 47(4): 428-436.
- [20] Lei Y, Xu X, Wang N, et al. Numerical analysis of a photonic crystal fiber for supporting 76 orbital angular momentum modes [J]. Journal of Optics, 2018, 20(10): 105701.
- [21] Hassan M M, Kabir M A, Hossain M N, et al. Numerical analysis of circular core shaped photonic crystal fiber for orbital angular momentum with efficient transmission[J]. Applied Physics B, 2020, 126(9): 145.
- [22] Ahmad Al-Zahrani F, Ahmed K. Novel design of dual guided photonic crystal fiber for large capacity transmission in high-speed optics communications with supporting good quality OAM and LP modes[J]. Alexandria Engineering Journal, 2020, 59(6): 4889-4899.
- [23] Zhang H, Zhang X G, 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.
- [24] 赵丽娟, 姜焕秋, 徐志钮. 支持可调、高阶轨道角动量模式的涡旋光纤[J]. 光学学报, 2022, 42(22): 2206001.
- Zhao L J, Jiang H Q, Xu Z N. Vortex fiber supporting adjustable and high-order orbital angular momentum mode[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(22): 2206001.
- [25] Huang S H, Ma Q C, Chen W C, et al. Microstructure ring fiber for supporting higher-order orbital angular momentum modes with flattened dispersion in broad waveband[J]. Applied Physics B, 2019, 125(11): 197.
- [26] Fu H L, Zhu M J, Liu C, et al. Photonic crystal fiber supporting 394 orbital angular momentum modes with flat dispersion, low nonlinear coefficient, and high mode quality[J]. Optical Engineering, 2022, 61(2): 026111.
- [27] Fu H H, Liu C, Hu C J, et al. Circular photonic crystal fiber supporting 118 orbital angular momentum modes transmission [J]. Optical Engineering, 2021, 60(7): 076102.
- [28] Islam M S, Sultana J, Ahmed K, et al. A novel approach for spectroscopic chemical identification using photonic crystal fiber in the terahertz regime[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(2): 575-582.
- [29] Rjeb A, Fathallah 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.
- [30] Liu Q, Tai S N, Lu W S, et al. Design of pure silica-based photonic crystal fiber for supporting 114 OAM modes transmission[J]. Journal of Optics, 2021, 23(9): 095701.
- [31] 孙可元, 吴江华, 李庆国. 基于 MCVD 设备的 RIT/RIC 套管工艺探索[J]. 现代传输, 2014(2): 54-55.
- Sun K Y, Wu J H, Li Q G. Exploration of RIT/RIC casing technology based on MCVD equipment[J]. Modern Transmission, 2014(2): 54-55.
- [32] 徐士杰, 张慧嘉, 杨鹏, 等. 空芯微结构光纤空气孔内壁粗糙度研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(23): 2300003.
- Xu S J, Zhang H J, Yang P, et al. Progress on the roughness of the inner wall of the air hole of hollow core microstructure optical fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(23): 2300003.
- [33] 张鑫, 董子涵, 姚静远, 等. C+L 波段 0.38 dB/km 超低损耗国产嵌套管式空芯反谐振光纤[J]. 中国激光, 2022, 49(11): 1115002.
- Zhang X, Dong Z H, Yao J Y, et al. C+L band 0.38 dB/km ultra-low loss domestic nested tubular hollow anti-resonant fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(11): 1115002.
- [34] Fitt A D, Furusawa K, Monro T M, et al. The mathematical modelling of capillary drawing for holey fibre manufacture[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2002, 43(2): 201-227.

An Anti-Resonance Fiber Supporting Stable Transmission of 130 Orbital Angular Momentum Modes

Wang Zhen, Wang Jingli*

College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China

Abstract

Objective With the development of fiber communication, traditional multiplexing techniques cannot meet the demands for capacity. The utilization of orbital angular momentum (OAM) modes to carry information is a way to implement space division multiplexing (SDM) technology. This approach can greatly increase the capacity and spectral efficiency of fiber communication and show broad application prospects due to its unique advantages. Currently, transmitting OAM modes

based on photonic crystal fiber (PCF) structures face problems such as difficulty in preparation and high loss. As research deepens, scholars attempt to solve these problems by utilizing anti-resonance fiber (ARF) to transmit OAM modes. The Fresnel reflection of the negative curvature tube in ARF cladding can enhance the confinement of the fiber core to the beam, further reducing the confinement loss (CL). Additionally, the preparation method of ARF is simpler than that of PCF, and fewer structural parameters make ARF easier to optimize for enhancing fiber performance. However, there is still a low number of transmission OAM modes in the current ARF design. Based on this, we propose an ARF composed of two sets of negative curvature anti-resonance tubes with different sizes. By introducing high refractive index materials in the ring core, more OAM modes can be transmitted, thereby improving the capacity of the fiber communication system.

Methods An ARF is designed by introducing high refractive index materials into the ring core to organically combine total internal reflection and anti-resonance guiding mechanisms. In this ARF, the OAM mode is limited by total internal reflection in the ring core and the Fresnel reflection from the negative curvature tube of the cladding, which realizes the stable transmission of OAM modes in the fiber. Its structure includes a central air hole, an inner layer of high refractive index amethyst glass tube, an intermediate layer silica (SiO_2) glass tube, and an outer layer of negative curvature tube. As the OAM mode number determines the capacity of the fiber communication system, and the radius of the central air hole, the thickness of Amethyst and SiO_2 glass tubes are key factors affecting the OAM mode number. First, the control variates are adopted to optimize the three key parameters of ARF at the $1.55 \mu\text{m}$ wavelength. Considering the influence of dispersion on stable OAM mode transmission, the optimal structural parameters of ARF are determined by optimizing the thickness of the SiO_2 glass tube, with the fundamental mode $\text{HE}_{1,1}$ as the observation term. The optimization takes into account both the OAM mode number and dispersion. Based on this, the fiber bending resistance is analyzed. Secondly, considering the practical fiber applications, it is necessary to have a certain operating bandwidth. Therefore, the stable OAM mode transmission and fiber transmission characteristics in $1.5\text{--}1.7 \mu\text{m}$ are analyzed and discussed. Additionally, the effective refractive index, effective refractive index difference, dispersion, CL, mode purity, effective mode-field area, nonlinear coefficient, and numerical aperture (NA) are included. Finally, the effect of preparation errors on the fiber properties is analyzed and discussed.

Results and Discussions First, in ARF, total internal reflection and anti-resonance are organically combined to support stable transmission of 130 OAM modes in $1.5\text{--}1.7 \mu\text{m}$ bands, which can greatly increase the capacity of the fiber communication system. Secondly, the transmission characteristics are analyzed, and the results show that the introduction of high refractive index materials in the core results in a larger effective refractive index difference Δn_{eff} between adjacent hybrid modes, with a maximum value of 6.08×10^{-3} (Fig. 9), which can inhibit the degradation of the OAM modes into linearly polarized (LP) modes. By optimizing the thickness of the intermediate layer SiO_2 glass tube, the dispersion changes of the hybrid modes all exhibit a flat state, with a minimum dispersion change of $0.43 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ (Fig. 10). A flat dispersion is beneficial for dispersion compensation. The negative curvature tubes in the outer layer are all in the anti-resonance state, which further enhances the restriction on photonic energy of the ring core and reduces the CL. The CL of hybrid modes maintains between $10^{-14}\text{--}10^{-8} \text{ dB/m}$ (Fig. 11). It is shown that this design ensures a large OAM mode number and has good fiber transmission characteristics and simplifies fiber preparation.

Conclusions We design an ARF that supports stable OAM mode transmission and features excellent transmission characteristics and relatively simple preparation. Based on the finite element method, the ARF is modeled and simulated. The results show that 130 OAM modes can be stably transmitted within the range of $1.5\text{--}1.7 \mu\text{m}$, a maximum effective refractive index difference is 6.08×10^{-3} , and the minimum dispersion change rate is only $0.43 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. The CL maintains in the range of $10^{-14}\text{--}10^{-8} \text{ dB/m}$ and the highest mode purity reaches 99.26%. The maximum effective mode-field area is $187.38 \mu\text{m}^2$, the minimum nonlinear coefficient is $0.87 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, and NA is concentrated between 0.064–0.086. The proposed ARF applied to SDM has higher communication capacity and spectral efficiency and provides references for the study of transmitting OAM modes by anti-resonant structures.

Key words orbital angular momentum; anti-resonance fiber; confinement loss; chromatic dispersion; fiber communication