

支持可调、高阶轨道角动量模式的涡旋光纤

赵丽娟^{1,2,3}, 姜焕秋¹, 徐志钮^{1*}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 为解决一般涡旋光纤支持传输的轨道角动量模式数量少、阶数低和传输质量差的问题,设计了一种新型结构涡旋光纤。该光纤在制作紫晶掺杂管环和石英管环的基础上,利用管环嵌套的方式提高了空气填充率。利用基于有限元法的 COMSOL Multiphysics 软件对该结构光纤进行建模,并分析计算了其传输特性参数。结果表明,该光纤在不同的入射光波段以跳跃式稳定支持特定阶数的轨道角动量模式,在 1500~1600 nm 波长范围内可支持 44 个高阶轨道角动量模式稳定传输,包括较高阶数第 31 阶。对 44 个高阶模式进行详细分析发现,有效折射率差保持在 10^{-3} 量级,色散平坦且色散变化均小于 $4.2 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$,模式纯度均大于 94.5%,有效模面积最小值为 $122.78 \mu\text{m}^2$,非线性系数最大值为 $0.89 \text{ km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$,限制损耗维持在 $10^{-13}\sim 10^{-8} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 量级之间。当弯曲半径大于 8 mm 时,弯曲对该光纤能够支持的轨道角动量模式数没有影响,而当弯曲半径小于 8 mm 时,支持的模式数随着弯曲半径的减小而减少。

关键词 光纤光学; 轨道角动量; 涡旋光; 涡旋光纤; 空分复用

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2206001

Vortex Fiber Supporting Tunable and Higher-Order Orbital Angular Momentum Modes

Zhao Lijuan^{1,2,3}, Jiang Huanqiu¹, Xu Zhiniu^{1*}

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

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

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

Abstract A vortex fiber with a new structure is designed to solve the problems of small numbers, low orders, and poor transmission quality of the orbital angular momentum modes supported by the general vortex fiber. On the basis of the fabrication of the amethyst-doped tube ring and quartz tube ring, the fiber improves the air filling rate through the nested structure of tube rings. The designed vortex fiber is modeled by the software COMSOL Multiphysics based on the finite element method, and the transmission characteristic parameters are analyzed and calculated. The results reveal that the vortex fiber stably supports certain orders of orbital angular momentum modes in different incident light bands in a "jumping" manner. In the wavelength range of 1500 - 1600 nm, it can support 44 higher-order orbital angular momentum modes for stable transmission, including the 31st-order mode. Moreover, the detailed analysis of the 44 higher-order modes demonstrates that the effective refractive index difference remains in the order of magnitude of 10^{-3} , the dispersion is relatively flat, the dispersion variation is less than $4.2 \text{ ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$, the mode purity is greater than 94.5%, the minimum effective mode field area is $122.78 \mu\text{m}^2$, the maximum nonlinear coefficient is $0.89 \text{ km}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$, and the confinement loss is maintained in the order of magnitude between $10^{-13} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ and $10^{-8} \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$. When the bending radius is greater than 8 mm, the bending has no effect on the number of orbital angular momentum modes that the fiber can

收稿日期: 2022-04-25; 修回日期: 2022-05-16; 录用日期: 2022-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(62171185, 61775057)、河北省自然科学基金(E2019502177, E2020502010)、河北省省级科技计划(SZX2020034)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2021MS072)

通信作者: *wzcnjxx@163.com

support. When the bending radius is less than 8 mm, the number of supported modes decreases as the bending radius decreases.

Key words fiber optics; orbital angular momentum; vortex beam; vortex fiber; space division multiplexing

1 引言

空分复用(SDM)是当前被用于解决通信容量瓶颈的最常用手段,基于光纤技术的空分复用包括并行单模复用、多芯复用、模式复用和轨道角动量复用,其中轨道角动量复用因具有大容量、高可靠性和高安全性的优点成为最有前途的复用方式^[1]。1992年,Allen等^[2]通过实验证明了波前结构为螺旋状分布的拉盖尔-高斯光束中携带轨道角动量(OAM),自此光束的OAM在很多领域中得到了应用,包括光镊^[3]、光通信^[4]和传感^[5]等。携带OAM为 $L=lh$ 的光被称为涡旋光束,该光束具有波前相位因子 $\exp(il\varphi)$,其中 h 为约化普朗克常量, l 为拓扑荷数, φ 为空间角向的方位坐标。由于OAM拓扑荷数的无限性和不同OAM模式的正交性,因此携带不同OAM的涡旋光束可在同一信道中复用。能够稳定传输OAM模式的光纤被称为涡旋光纤,设计特殊的涡旋光纤是稳定、大容量OAM模式传输的关键。

目前,已经有很多不同结构的光纤被用于涡旋光束的传输中,包括基于传统光纤和光子晶体光纤的涡旋光纤,它们都具有类环结构,可用于轨道角动量模式的传输^[6]。涡旋光纤的设计在满足相邻本征模式间有效折射率差大于 1×10^{-4} 的情况下,追求更多OAM模式的稳定传输,同时需实现低平坦色散、低非线性系数、低限制损耗、大模场面积和高模式纯度。2018年,Xu等^[7]设计了一种具有双导模区的涡旋光纤,纤芯区域和环形区域分别支持2个LP模式和30个OAM模式,存在低平坦色散,但部分相邻本征模式间的有效折射率差接近 1×10^{-4} ,故OAM模式传输不够稳定。同年,Nandam和Shin^[8]设计了一种可以支持14个OAM模式的螺旋臂光子晶体光纤,该光纤制作简单,但支持的模式数较少且传输特性表现不是很理想。2019年,Liu等^[9]设计了一种新型光纤,实现了相邻本征模式间有效折射率差大于 1×10^{-2} ,缺点是仅支持6个OAM模式,且限制损耗、色散和有效模面积等参数均不理想。2020年,Wang等^[10]、Zhang等^[11]和Kabir等^[12]各自设计了一种新型涡旋光纤,分别支持56、22、26个OAM模式。在文献[10]中,双导模区涡旋光纤支持的模式数有所增加,但色散范围波动较大,最高值已经大于 $2000 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。文献[11]中将光纤进行螺旋式扭曲和文献[12]中将光纤设计成蜘蛛网结构均为涡旋光纤的创新设计提供了新思路,但支持的OAM模式数仍较少。2021年,靳晓玲等^[13]设计了环形中空的涡旋光纤,该光纤适用于弯曲情况(弯曲半径大于18 mm),但仅支持14个OAM模式。综上,目前的涡旋光纤仅支持少数低阶OAM模式的传输,且无法通过调控入射光波长实现对特定阶数OAM模式的传

输。因此,需要设计新型涡旋光纤,提高支持的OAM模式的数量和阶数,实现模式的可调性传输,并使涡旋光纤的传输特性更加稳定。

本文设计了一种管环嵌套的涡旋光纤,该光纤包含了紫晶掺杂管环和石英管环,并提供了一种工艺制作该光纤的可行性思路。该光纤在常用波段(1500~1600 nm)中可以跳过低阶($l=1, 2, 3, \dots$)模式传输高阶($l=21, 22, \dots, 31$)OAM模式, l 反映了光纤中OAM模式的阶数。在阐述涡旋光纤能够稳定传输OAM模式的原理和条件的基础上,使用仿真软件 and 数据分析软件分析所提光纤的传输特性,包括有效折射率差、色散、限制损耗、有效模面积、非线性系数和模式纯度。结果表明,所提光纤具有较好的传输特性,不仅支持传输的OAM模式数较多,色散等衡量传输特性的参数还表现良好,为涡旋光纤在OAM复用领域中的使用创造了较好的条件。最后,将所提光纤与现存光纤进行对比,分析其优势所在,并进一步讨论了光纤弯曲对支持的模式数、损耗和模式纯度的影响。

2 基本结构、原理和结果

2.1 光纤结构

利用仿真软件建立仿真模型并不断调整结构参数发现,最优结构的涡旋光纤仿真截面图如图1所示,主要由紫晶掺杂管环、石英管壁和分布其中的小石英管环构成。其中,管环厚度为 $h_1=h_2=1 \mu\text{m}$,管壁厚度为 $h_3=h_4=2 \mu\text{m}$ 。图1中最外层是完美匹配层(PML),用作吸收边界条件,与完美匹配层相邻的是石英管壁,其折射率 n_1 由Sellmeier方程得到。中间较大的管环是紫晶掺杂管环,用来支持传输OAM模式,其折射率为 $n_2=1.55$,掺杂管环内外分布着直径分别为 $d_1=8 \mu\text{m}$ 和 $d_2=11 \mu\text{m}$ 的小石英管环,其折射率也为 n_1 。小管环彼此紧密相邻且与掺杂管环在临界处相切,其余部分为空气。这种结构提高了掺杂管环两侧的空气填充率,使掺杂区与两侧形成较大的折射率差,便于OAM模式稳定传输。石英管壁折射率的表达式为

$$n_1 = \sqrt{1 + \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - C_3}}, \quad (1)$$

式中: $B_1=0.6961663$; $B_2=0.4079426$; $B_3=0.8974794$; $C_1=0.0684043$; $C_2=0.1162414$; $C_3=9.896161$; λ 为入射波长。

2.2 传输原理

本文涉及光纤中三种模式,分别为线偏振LP模式、本征模式[横电(TE)模、横磁(TM)模、混合模(EH模和HE模)]和OAM模式^[14],其中LP模式和OAM模式均可以看作是本征模式的叠加,叠加公式为

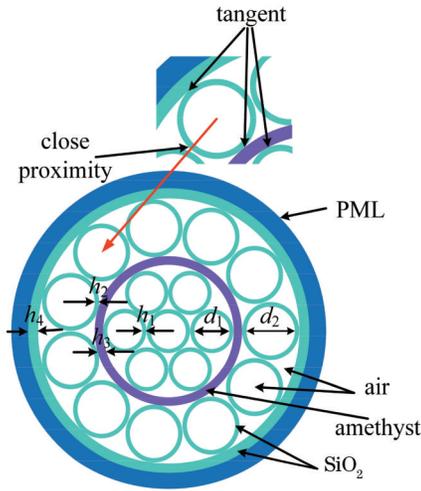


图 1 仿真光纤结构截面图

Fig. 1 Cross-section view of simulated fiber structure

$$\begin{cases} LP_{l,m} = HE_{l+1,m} \pm EH_{l-1,m}, & l \geq 2 \\ LP_{l,m} = HE_{2,m} \pm TM_{0,m}/TE_{0,m}, & l = 1, \\ LP_{l,m} = HE_{1,m}, & l = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} OAM_{\pm l,m}^{\pm} = HE_{l+1,m}^{\text{even}} \pm jHE_{l+1,m}^{\text{odd}}, & l \geq 1 \\ OAM_{\pm l,m}^{\mp} = EH_{l-1,m}^{\text{even}} \pm jEH_{l-1,m}^{\text{odd}}, & l > 1. \\ OAM_{\pm l,m}^{\pm} = TM_{0,m} \pm jTE_{0,m}, & l = 1 \end{cases} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可知,为了使涡旋光纤稳定传输 OAM 模式,相邻本征模式间有效折射率差 $\Delta n_{\text{eff}} = |n_{\text{eff}}(HE_{l+1,1}) - n_{\text{eff}}(EH_{l-1,1})|$ 需大于 1×10^{-4} ,这样可以避免 OAM 模式在传输过程中耦合成 LP 模式。由式(3)可知,OAM 模式是由相位差为 $\pi/2$ 的同阶本征奇偶模叠加而成的。其中, $OAM_{\pm l,m}^{\pm}$ 模式的上标 \pm 代表右左圆偏振,下标 \pm 代表 OAM 波前旋转方向, j 是 $\pi/2$ 相位差, m 是径向指数。为了避免 OAM 模式退化和方便轨道角动量复用, m 一般取值为 1。由式(3)还可以发现:当 $l \geq 2$ 时,每个 $OAM_{l,m}$ 模式组包含 4 个 OAM 模式;当 $l = 1$ 时, $TM_{0,m}$ 与 $TE_{0,m}$ 具有不同的传播常数,简并形成的 OAM 模式不稳定,此时每个 $OAM_{l,m}$ 模式组包含 2 个 OAM 模式; $l = 0$ 时是光纤基模,此处不进行讨论。

2.3 仿真结果

利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件建模的详细步骤:1)在建模向导中选择二维/光学/波动光学/电磁波·频域模块,在研究中选择模式分析;2)创建几何绘制涡旋光纤二维模型,并添加各子区域的材料属性;3)通过添加完美匹配层的方式设置边界条件,并将模型以超细化精细度进行网格划分;4)模式分析和数据的后处理。

通过 COMSOL Multiphysics 软件对 2.1 节所提涡旋光纤结构仿真发现,该结构光纤在不同的入射光波段支持特定的 OAM 模式阶数。现存的涡旋光纤一般支持的 OAM 模式从阶数 $l = 1$ 开始,但本文所设计的涡旋光纤在常用波段可以跳过低阶模式,支持传输高阶轨道角动量模式。短波长范围内稳定支持的 OAM 模式阶数较高,而长波长范围内稳定支持的 OAM 模

式阶数较低,即根据需要,利用涡旋光参量振荡器^[15]将泵浦光束的轨道角动量有选择地转移到不同波长的信号光中进行输出,再结合嵌套结构的涡旋光纤可以实现对特定阶数 OAM 模式的传输调控。光纤通信常用的波长为 1550 nm,在 1500~1600 nm 波段内该光纤能够稳定支持的 OAM 模式阶数 l 的取值范围为 21~31,如表 1 所示。

表 1 涡旋光纤稳定支持的模式

Table 1 Modes supported stably by vortex fiber

HE mode	EH mode	OAM mode
$HE_{22,1}^{\text{even}}, HE_{22,1}^{\text{odd}}$	$EH_{20,1}^{\text{even}}, EH_{20,1}^{\text{odd}}$	$OAM_{21,1} \times 4$
$HE_{23,1}^{\text{even}}, HE_{23,1}^{\text{odd}}$	$EH_{21,1}^{\text{even}}, EH_{21,1}^{\text{odd}}$	$OAM_{22,1} \times 4$
$HE_{24,1}^{\text{even}}, HE_{24,1}^{\text{odd}}$	$EH_{22,1}^{\text{even}}, EH_{22,1}^{\text{odd}}$	$OAM_{23,1} \times 4$
$HE_{25,1}^{\text{even}}, HE_{25,1}^{\text{odd}}$	$EH_{23,1}^{\text{even}}, EH_{23,1}^{\text{odd}}$	$OAM_{24,1} \times 4$
$HE_{26,1}^{\text{even}}, HE_{26,1}^{\text{odd}}$	$EH_{24,1}^{\text{even}}, EH_{24,1}^{\text{odd}}$	$OAM_{25,1} \times 4$
$HE_{27,1}^{\text{even}}, HE_{27,1}^{\text{odd}}$	$EH_{25,1}^{\text{even}}, EH_{25,1}^{\text{odd}}$	$OAM_{26,1} \times 4$
$HE_{28,1}^{\text{even}}, HE_{28,1}^{\text{odd}}$	$EH_{26,1}^{\text{even}}, EH_{26,1}^{\text{odd}}$	$OAM_{27,1} \times 4$
$HE_{29,1}^{\text{even}}, HE_{29,1}^{\text{odd}}$	$EH_{27,1}^{\text{even}}, EH_{27,1}^{\text{odd}}$	$OAM_{28,1} \times 4$
$HE_{30,1}^{\text{even}}, HE_{30,1}^{\text{odd}}$	$EH_{28,1}^{\text{even}}, EH_{28,1}^{\text{odd}}$	$OAM_{29,1} \times 4$
$HE_{31,1}^{\text{even}}, HE_{31,1}^{\text{odd}}$	$EH_{29,1}^{\text{even}}, EH_{29,1}^{\text{odd}}$	$OAM_{30,1} \times 4$
$HE_{32,1}^{\text{even}}, HE_{32,1}^{\text{odd}}$	$EH_{30,1}^{\text{even}}, EH_{30,1}^{\text{odd}}$	$OAM_{31,1} \times 4$

研究还发现,该涡旋光纤稳定支持的最高 OAM 模式阶数为 $l = 40$,出现在波长为 $\lambda = 1200$ nm 处,而稳定支持的最低 OAM 模式阶数为 $l = 4$,出现在波长为 $\lambda = 2000$ nm 处,即可用波长范围为 1200~2000 nm。进一步总结为,该涡旋光纤以 1550 nm 为中心,稳定支持的 OAM 模式数量向两端缓慢减少:随着入射光波长的减小,稳定支持的 OAM 模式阶数在升高;随着入射光波长的增大,稳定支持的 OAM 模式阶数在降低。图 2 和图 3 是该光纤的仿真结果。图 2 为该光纤稳定支持的本征模式在 z 方向上的电场分布,其中:图 2(a)、(b)所示本征模式可以叠加成 $OAM_{4,1}$ 模式;图 2(c)所示本征模式可以叠加成 $OAM_{21,1}$ 模式;图 2(d)所示本征模式可以叠加成 $OAM_{31,1}$ 模式;图 2(e)、(f)所示本征模式可以叠加成 $OAM_{40,1}$ 模式。图 3(a)、(b)通过相位分布分别展示了典型的 $OAM_{22,1}$ 模式和 $OAM_{20,1}$ 模式叠加生成的过程。

3 传输特性

涡旋光纤对 OAM 模式传输质量的好坏可以利用传输特性参数来描述,包括有效折射率差、限制损耗、非线性系数、有效模面积、模式纯度和色散。较理想的传输参数可以提高通信质量,下面针对 1500~1600 nm 波段内的 44 个 OAM 模式进行分析,并分析涡旋光纤对其他波段稳定支持的 OAM 模式的传输质量。

3.1 光纤的有效折射率差

图 4(a)、(b)展示了模式的有效折射率 n_{eff} 随波长 λ 的变化情况,可以通过 COMSOL Multiphysics 软件直

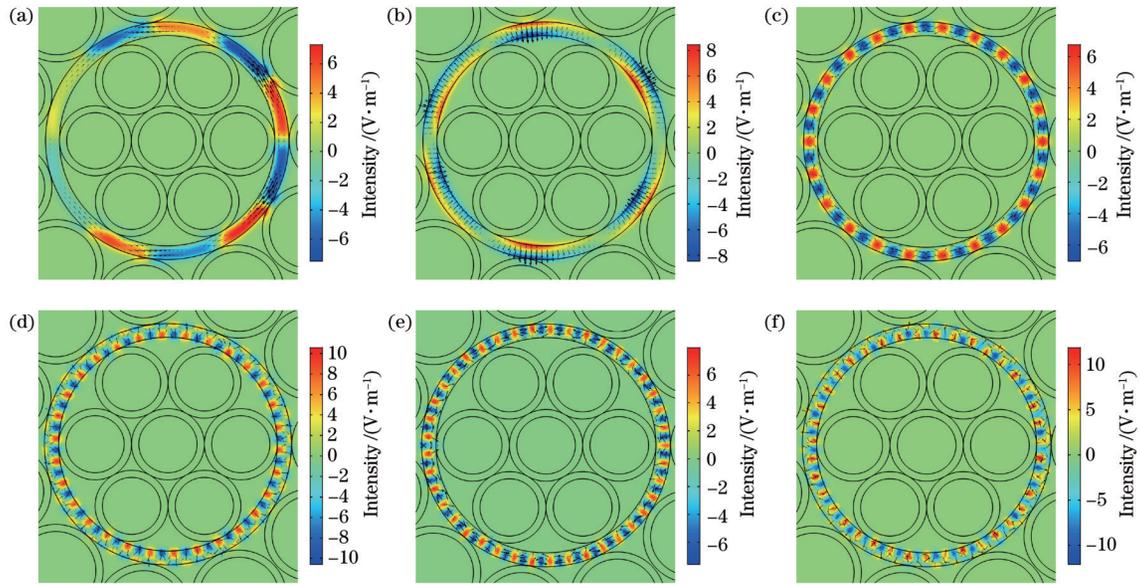


图 2 典型本征模式在 z 方向上的电场分布。(a) $HE_{5,1}$ 奇模; (b) $EH_{3,1}$ 奇模; (c) $HE_{22,1}$ 偶模; (d) $EH_{30,1}$ 奇模; (e) $HE_{41,1}$ 偶模; (f) $EH_{39,1}$ 奇模

Fig. 2 Electric field distribution along z direction for typical eigenmodes. (a) Odd mode of $HE_{5,1}$; (b) odd mode of $EH_{3,1}$; (c) even mode of $HE_{22,1}$; (d) odd mode of $EH_{30,1}$; (e) even mode of $HE_{41,1}$, (f) odd mode of $EH_{39,1}$

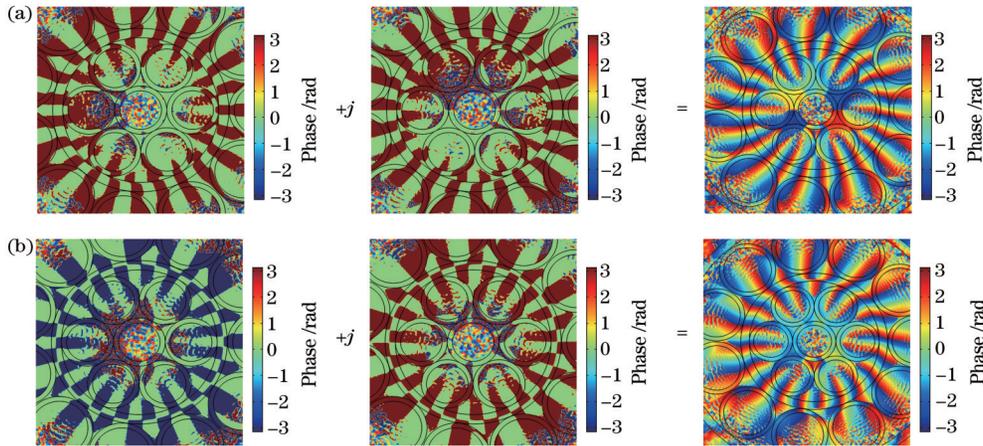


图 3 通过相图表示典型本征模式 (奇模和偶模) 叠加生成 OAM 模式。(a) $HE_{23,1}^{even} + HE_{23,1}^{odd} = OAM_{+22,1}^+$; (b) $HE_{19,1}^{even} + HE_{19,1}^{odd} = OAM_{-20,1}^-$

Fig. 3 OAM modes generated by superposition of typical eigenmodes (odd and even modes) through phase diagrams. (a) $HE_{23,1}^{even} + HE_{23,1}^{odd} = OAM_{+22,1}^+$; (b) $HE_{19,1}^{even} + HE_{19,1}^{odd} = OAM_{-20,1}^-$

接计算出来,进而可以计算模式间的有效折射率差 Δn_{eff} 。有效折射率与波长、模式、光纤的结构和损耗有关,分为实部和虚部^[16]:实部与色散相关;虚部可表征材料对电磁波的吸收,与损耗相关。图 4(c)展示了 Δn_{eff} 随波长的变化关系。可以发现,不同 OAM 模式的有效折射率差均可达到 10^{-3} 量级,大于 1×10^{-4} ,其原因在于掺杂管环与两侧材料形成了较大的折射率差,并且该涡旋光纤的嵌套结构提高了掺杂管环两侧的空气填充率^[17]。较大的 Δn_{eff} 可以加大简并模式间的分离特性,避免简并矢量模式间的耦合,满足 OAM 模式稳定传输的条件。此外,与高阶 OAM 模式相比,较低阶的 OAM 模式的有效折射率差值更大,故传输特性更稳定。

3.2 光纤的限制损耗

光纤的限制损耗即泄漏损耗,取决于光纤结构对光束的约束能力。当涡旋光束入射到光纤中时,必然会有部分光沿着径向泄漏出去,这部分泄漏掉的光能量即为限制损耗。限制损耗的计算公式^[18]为

$$L(\lambda) = -\frac{40\pi}{\ln(10)\lambda} \cdot \text{Im}(n_{eff}) \approx -8.686 \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{eff}), \quad (4)$$

式中: $\text{Im}(n_{eff})$ 为有效折射率虚部。式(4)包含了光能量泄漏损耗和模式耦合损耗。

由图 5 可知: HE 模式和 EH 模式的限制损耗在 $10^{-13} \sim 10^{-8} \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 量级范围内; $EH_{27,1}$ 模式的限制损耗

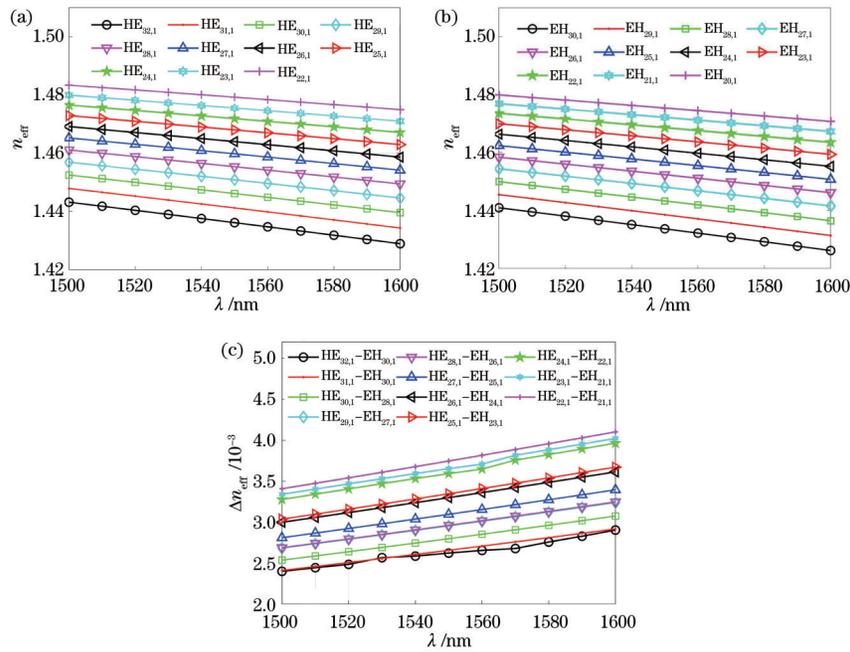


图 4 模式的有效折射率与有效折射率差。(a)(b)不同本征模的有效折射率与波长的关系;(c) OAM 模式的有效折射率差与波长的关系

Fig. 4 Effective refractive index and effective refractive index difference of different modes. (a)(b) Effective refractive index of different eigenmodes varying with wavelength; (c) effective refractive index difference of different OAM modes varying with wavelength

在 1580 nm 处达到最小值($6.45 \times 10^{-13} \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$)。由于该涡旋光纤中掺杂管环与其余的小管环在临界处相切,故相应的接触部分较少,从而降低了材料的吸收损耗。此外,高空气填充率增强了光在掺杂管环与包层

界面上的全反射,从而有效降低了该涡旋光纤模式的限制损耗,而较小的限制损耗有助于 OAM 模式的长距离传输。

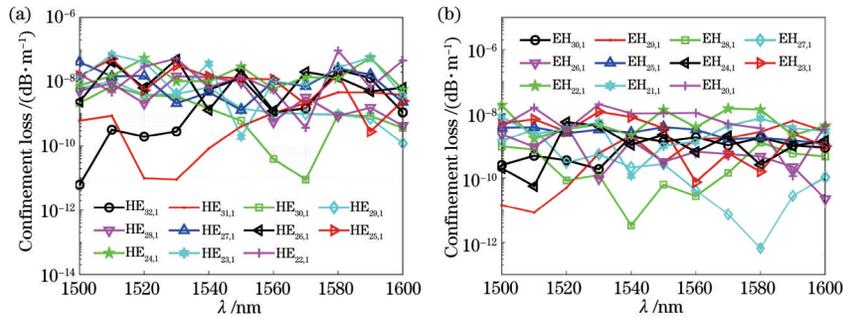


图 5 限制损耗随波长的变化曲线。(a) HE 模式;(b) EH 模式

Fig. 5 Confinement loss varying with wavelength. (a) HE mode; (b) EH mode

3.3 光纤的非线性系数和有效模面积

有效模面积和非线性系数是描述光纤传输特性的重要参数:非线性系数描述的是光纤非线性效应的强弱;有效模面积描述的是光纤内的功率密度^[19],其与非线性系数成反比例关系,且直接影响非线性系数。在衡量光纤传输特性时,有效模面积的值越大越好,非线性系数的值越小越好。有效模面积与非线性系数的计算公式分别为

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

$$\gamma = \frac{2\pi n_0}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (6)$$

式中: A_{eff} 是有效模面积; γ 是非线性系数; $E(x, y)$ 是光传播的横向电场分布; s 是光纤的横截面; n_0 是材料的非线性折射率,紫晶掺杂管环的非线性折射率为 $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$,而背景材料二氧化硅的非线性折射率为 $2.3 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ 。

由图 6 可知:HE 模式和 EH 模式的有效模面积随着波长的增加而线性增加,这是因为随着波长的增加,掺杂管环对模场强度的限制变弱,光束开始泄漏出管环;在 1500~1600 nm 波段内有效模面积均大于 $122.78 \mu\text{m}^2$,且 HE_{31,1} 模式在 1600 nm 波长处有效模面积达到最大值($149.85 \mu\text{m}^2$);HE 模式的有效模面积比

EH 模式的有效模面积大,即掺杂管环对 EH 模式的限制更强。由图 7 可知,HE 模式和 EH 模式的非线性系数随着波长的增加而线性减小,且所有模式的非线性

系数均在 $0.65 \sim 0.89 \text{ km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 范围内。非线性系数较小是该结构光纤提供了较高的空气填充率引起的,这有助于 OAM 信号的稳定传输。

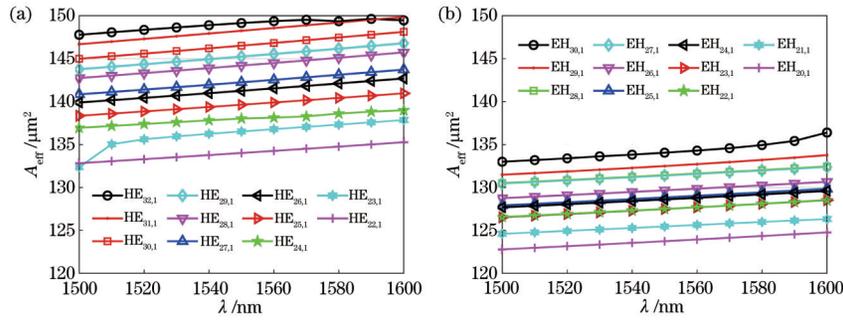


图 6 有效模面积与波长的变化关系。(a) HE 模式;(b) EH 模式

Fig. 6 Effective mode area varying with wavelength. (a) HE mode; (b) EH mode

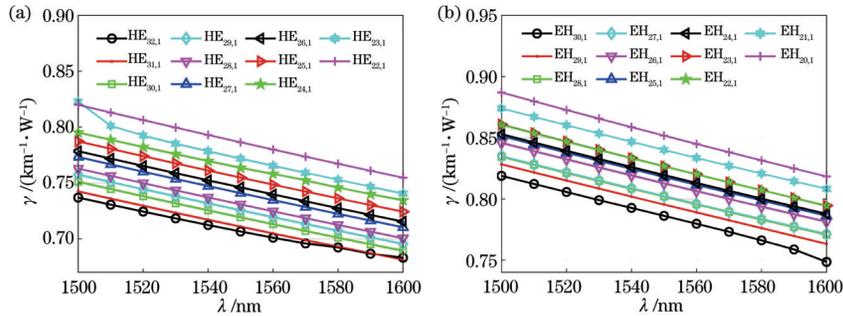


图 7 非线性系数与波长的变化关系。(a) HE 模式;(b) EH 模式

Fig. 7 Nonlinear coefficient varying with wavelength. (a) HE mode; (b) EH mode

3.4 光纤的模式纯度

涡旋光纤的模式纯度一方面表征 OAM 模式质量,纯度越高传输越稳定,OAM 信号越好,则被用于 OAM 复用的效果越好。另一方面,较高的模式纯度可以降低模式间的串扰,保证光纤的传输效率和容量。因此,模式纯度是衡量涡旋光纤传输特性的一个重要参数^[20]。

模式纯度大小取决于光叠加因子的强度,其表达式为

$$\eta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{\iint |E_{\text{rings}}|^2 dx dy}{\iint |E_{\text{cross-section}}|^2 dx dy}, \quad (7)$$

式中: I_r 为约束所有 OAM 模式的掺杂管环区域的平均光强; I_c 为整个光纤横截面区域的平均光强; E_{rings} 为掺杂管环区域中的电场; $E_{\text{cross-section}}$ 为光纤横截面区域中的电场。由图 8 可知,支持的 OAM 模式纯度均大于 94.5%,其中 HE_{22,1} 模在 1500 nm 处的模式纯度达到最大(97.6%)。当涡旋光纤中的 OAM 模式纯度超过 94% 时,它们可以在千米量级距离内稳定传输。所提涡旋光纤支持的模式纯度也在理论上符合要求,这有效解决了普通光纤传输 OAM 模式时存在的模间串扰问题,进而可以被广泛用于基于光纤通信系统的 OAM 编码、复用等领域中。

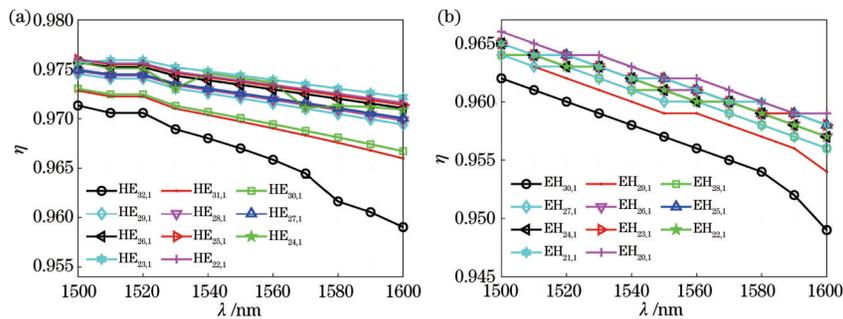


图 8 模式纯度与波长的变化关系。(a) HE 模式;(b) EH 模式

Fig. 8 Mode purity varying with wavelength. (a) HE mode; (b) EH mode

3.5 光纤的色散

在描述光纤传输特性时,色散越小且越平坦代表传输特性越好,色散包括材料色散和波导色散,其中波导色散对光纤起主导作用,进而被讨论得更多。波导色散与光纤的结构、材料有关,表现为入射光经光纤传输后以不同时间到达出射端面而引起的频谱展宽现象。色散的计算公式为

$$D = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 \operatorname{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2}, \quad (8)$$

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

图 9 为 HE 模式和 EH 模式的色散随波长的变化关系。可以发现:在 1500~1600 nm 波段范围内,色散平坦,且由于高阶模式的有效折射率变化大于低阶模式的有效折射率变化,故高阶模式的色散大于低阶模式的色散;EH_{30,1} 模式可实现最大的色散变化(4.2 ps·km⁻¹·nm⁻¹),HE_{22,1} 模式可实现最小的色散变化(1.5 ps·km⁻¹·nm⁻¹);所有模式的色散取值范围为 20~80 ps·km⁻¹·nm⁻¹,明显优于文献[21-22]中涡旋光纤的色散值。

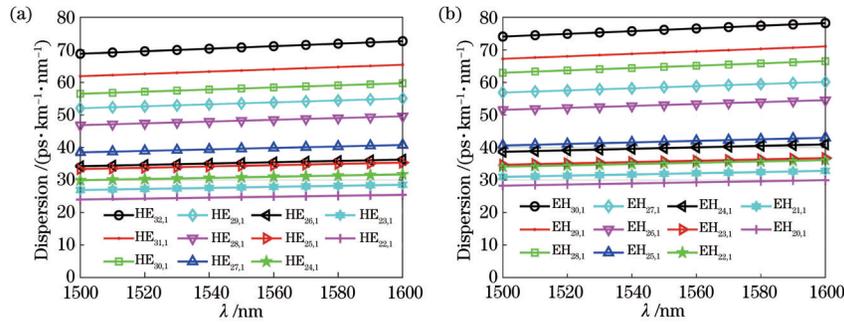


图 9 色散随波长的变化关系。(a) HE 模式;(b) EH 模式

Fig. 9 Dispersion varying with wavelength. (a) HE mode; (b) EH mode

3.6 分析比较

为了更好地了解所提涡旋光纤的优势,表 2 将现存的部分涡旋光纤与所提光纤进行了比较。结果表明:所提涡旋光纤在常用波段中不仅能够支持更多 OAM 模式数,还可以实现最高阶数(31 阶)的传输;该

涡旋光纤的有效折射率差可达到 10⁻³ 量级,限制损耗波动区间上下限的数值均最小,色散维持在较低水平,有效模面积相比其他光纤要大很多(非线性系数小很多)且模式纯度(>94%)较理想。综上,所提涡旋光纤在整体性能上表现突出,具有更好的应用价值。

表 2 现存涡旋光纤与所提涡旋光纤的比较

Table 2 Comparison between current vortex fiber with vortex fiber proposed in this paper

Ref.	Δn_{eff}	l	Confinement loss / (dB·m ⁻¹)	Dispersion / (ps·km ⁻¹ ·nm ⁻¹)	$A_{\text{eff}} / \mu\text{m}^2$	$\gamma / (\text{km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1})$	OAM purity / %
[7]	$>1 \times 10^{-4}$	1-8		-0.26-1.62	<100		
[8]	$>1 \times 10^{-4}$	1-4	$<10^{-3}$	75-375		2.0-3.6	
[9]	$>1 \times 10^{-2}$	1-2	10^{-6} - 10^2	-400-600	5-9	12-21	
[10]	$>1 \times 10^{-4}$	1-5&7-16	10^{-8} - 10^{-7}	100-2300			>80
[11]	$>1 \times 10^{-4}$	1-5			36-71	1.25-2.65	
[12]	$>1 \times 10^{-4}$	1-7	10^{-10} - 10^{-6}	25-300	37-67	1-9	
[13]	$>1 \times 10^{-3}$	1-4	$>10^{-11}$				
Proposed	$>1 \times 10^{-3}$	21-31	10^{-13} - 10^{-8}	20-80	122-149	0.65-0.89	>94.5

在 1550~1600 nm 波段内的 44 个 OAM 模式的限制损耗、有效模面积、非线性系数和色散均在理想范围内小幅度波动,且数值明显优于其他涡旋光纤,观察其曲线的发展变化趋势可知,这 4 个传输特性参数在其他波长域的数值也较理想。由于模式的有效折射率差和模式纯度决定了涡旋光纤能否稳定支持 OAM 模式传输,故需要重点考虑其他波段中支持的 OAM 模式的有效折射率差和模式纯度。由 3.1 节中图 4(c)所示的有效折射率差随着波长的增加而上升、3.4 节中图 8

所示的模式纯度随着波长的增加而下降、在 $\lambda=1200$ nm 波长处 OAM_{40,1} 模式的 Δn_{eff} (6.54×10^{-4}) 大于 1×10^{-4} 和在 $\lambda=2000$ nm 波长处 OAM_{4,1} 模式的纯度为 95.63% 可知,在可行波长域内所有 OAM 模式均可以稳定传输。

由于 OAM 光束携带的 OAM 可以传递给空间中的颗粒,故 OAM 光束可实现对粒子的捕获和操纵,且 OAM 阶数越高,OMA 光束捕获力越大。所提涡旋光纤可以跳跃式传输特定高阶轨道角动量模式,故将该

涡旋光纤与光纤光镊系统相结合很有应用价值。该涡旋光纤可以作为传输部分与渐变折射率多模光纤探针相熔接^[23],熔接后的器件应用在光纤光镊系统中可以实现高阶 OAM 模式的传输。Zhang 等^[24]于 2018 年通过研磨抛光法将中空环形芯光纤制成光纤探针,并成功进行了对酵母菌进行捕获的实验。与其他涡旋光纤相比,所提涡旋光纤与文献[24]中的中空环形芯光纤有相似的环芯和中空结构,也可以通过研磨抛光制成探针应用到光纤光镊系统中。同时,该光纤探针在实现对微粒、细胞进行选择 and 操控的基础上,借助中空结构可以实现微粒的传输。光纤光镊与全光纤轨道角动量发生器^[25-26]相结合能够实现小型化和低成本化,且目前基于涡旋光纤设计的光纤光镊较少,进而这是一个很有前景的研究领域。

该涡旋光纤除了上述优点外,还具有一定的可制

作性。光纤拉制包括预制棒设计、制作和拉丝,可以参考负曲率空心光纤预制棒的制造工艺^[27-28],将套管法和堆积法相结合制作所提涡旋光纤的预制棒,如图 10 所示,该方法具有成本低、效果好和制作简单的优点。目前国内商业化的公司已经掌握了管环的制作工艺,即通过等离子固相外沉积技术形成大尺寸管环。首先,将其中 7 个石英管环按照鲜花的形状捆绑在一起,再将其填充进掺杂管环中进行第一次拉制形成中间体(在氢-氧燃烧器中进行塌缩熔合固定),实际制作时要注意保持清洁,避免造成污染而产生较大的损耗。然后,将中间体等部分填充进大石英管壁中,调整掺杂管环外面的 11 个小石英管环使其等圆分布。最后,对制作好的预制棒进行第二次拉制(两次拉制过程中均将惰性气体施加到图 1 所示的空气区域中,以控制形状),形成能稳定传输 OAM 模式的涡旋光纤^[29]。

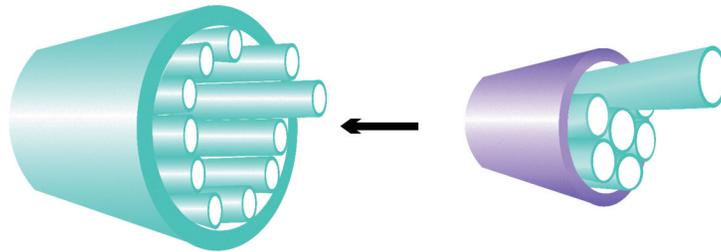


图 10 涡旋光纤预制棒制作方法

Fig. 10 Vortex fiber preform fabrication method

4 弯曲对光纤的影响

光纤在实际应用中会出现状态弯曲的情况而非平直,进而需要详细讨论状态弯曲对涡旋光纤支持的 OAM 模式的影响^[30]。在平直状态下,改变 COMSOL Multiphysics 软件中的材料设置可以研究光纤的弯曲状态。假设光纤沿着 +x 方向发生弯曲,当弯曲光纤转化为具有等效折射率分布的平直光纤时,光纤横截面等效折射率可以表示为

$$n'(x, y) = n(x, y) \sqrt{1 + 2x/R_{\text{eff}}}, \quad (9)$$

式中: n 是平直光纤的折射率大小; $R_{\text{eff}} = 1.28 \times R$ 是引入校正因子后的弯曲半径,其中 R 是弯曲半径。影响 OAM 模式传输质量的两个最重要因素是弯曲损耗和模式纯度,弯曲损耗的计算公式与式(4)相同,光纤为平直状态时计算的结果为限制损耗,而光纤为弯曲状态时计算的结果为弯曲损耗。模式纯度的高低可以最直接地反应模间串扰的大小,其计算公式与式(7)相同。

从图 11 可以发现:在 1500~1600 nm 波段内,当涡旋光纤的弯曲半径大于 8 mm 时,光纤弯曲对支持的 OAM 模式数没有什么影响,此时涡旋光纤具有良好的抗弯曲特性;当弯曲半径小于 8 mm 时,涡旋光纤支持的 OAM 模式数减少。图 12 所示为光纤模式纯度随弯曲半径的变化曲线。可以发现,当弯曲半径大于 8 mm 时,激发的 44 个 OAM 模式纯度均有所上升,且均大于 94%,进一步表明 $R=8$ mm 仍可以作为考虑模

间串扰时的弯曲容忍度,其中模式 $\text{OAM}_{31,1}$ 纯度变化较明显,这是因为此模式阶数最高,相比于其他模式其接近模式的截止条件。

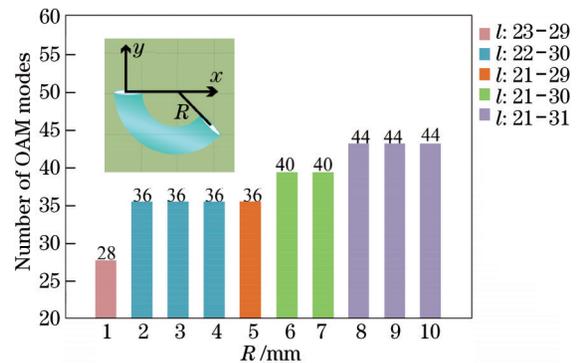


图 11 不同弯曲半径下稳定支持的 OAM 模式(插图为光纤弯曲示意图)

Fig. 11 Stable supported OAM modes at different bending radii (illustration is schematic diagram of fiber bending)

相比于平直状态,光纤弯曲会导致模式能量泄漏到纤芯外,进一步出现弯曲损耗升高的现象,同时弯曲会使 OAM 模式之间按照混合选择规则($\Delta l = \pm 2$)发生耦合^[31],模式耦合会增加模式串扰,从而使模式纯度降低。图 13 和图 14 分别为涡旋光纤在弯曲半径为 $R=5$ mm 处的损耗谱和模式纯度变化曲线。可以发现,此时支持的 OAM 模式数为 36,支持的模式阶数 l

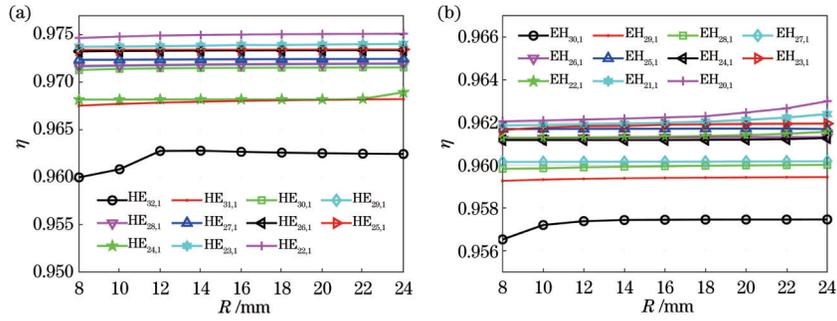
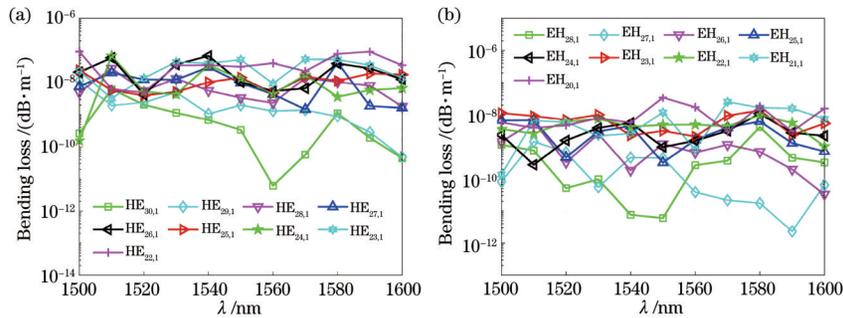
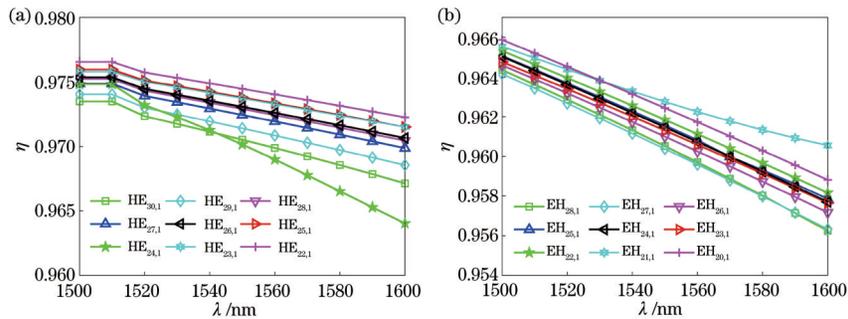


图 12 模式纯度与弯曲半径的变化关系。(a) HE 模式;(b) EH 模式

Fig. 12 Mode purity varying with bending radius. (a) HE mode; (b) EH mode

的范围为 21~29。从图 13 可以发现:所有模式的损耗在 $10^{-12} \sim 10^{-7} \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ 范围内,与平直状态下的模式损耗范围相比,上下限均增大了一个数量级,但仍然比一

般涡旋光纤的限制损耗要低很多^[32];弯曲后支持的 36 个 OAM 模式的模式纯度略微下降,但仍大于 94%,进而仍然可以稳定地传输 OAM 信号。

图 13 $R=5 \text{ mm}$ 时模式的弯曲损耗。(a) HE 模式;(b) EH 模式Fig. 13 Bending loss of mode under $R=5 \text{ mm}$. (a) HE mode; (b) EH mode图 14 $R=5 \text{ mm}$ 时模式的纯度。(a) HE 模式;(b) EH 模式Fig. 14 Mode purity under $R=5 \text{ mm}$. (a) HE mode; (b) EH mode

5 结 论

提出了一种管环嵌套的新型涡旋光纤,并对其性能进行了分析。管环包括紫晶掺杂管环和石英管环,其中掺杂管环的作用是传输 OAM 模式。小管环与掺杂管环在临界处相切的设计不仅能够减小接触面积,还能大大提高空气填充率。调控该光纤的入射光波段可以稳定支持特定的高阶 OAM 模式,这种 OAM 模式的可调性是目前存在的涡旋光纤中较新颖的特点。将该光纤与渐变折射率多模光纤熔接或者研磨抛光制成探针后可应用于基于 OAM 的光纤光镊系统中。该光纤在 1500~1600 nm 常用波段内稳定支持 44 个高阶模

式,有效折射率差维持在 10^{-3} 量级,可避免相邻本征模式在传输过程中耦合成 LP 模式。此外,该光纤的色散、限制损耗、模式纯度、有效模面积和非线性系数等衡量传输特性的参量均很突出,将其应用于基于 OAM 的光纤复用系统中可提高通信容量和频谱利用率。与近些年发表的涡旋光纤相比较发现,所提光纤弥补了现存涡旋光纤仅支持较少的低阶 OAM 模式传输的不足,且可通过结合堆积法和套管法制作预制棒,制作工艺相对简单,易于工业化。

参 考 文 献

- [1] Wang J. Twisted optical communications using orbital

- angular momentum[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2018, 62(3): 034201.
- [2] 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]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [3] 杨伟东, 邱晓东, 陈理想. 光轨道角动量分离、成像、传感及微操控应用研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500013.
- Yang W D, Qiu X D, Chen L X. Research progress in detection, imaging, sensing, and micromanipulation application of orbital angular momentum of beams[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500013.
- [4] 南久航, 韩一平. 双路多进制涡旋光通信[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1206001.
- Nan J H, Han Y P. Dual-channel multiband vortex optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1206001.
- [5] 肖悦娉, 汤莹, 朱朝晖. 轨道角动量模间干涉的少模光纤温度传感研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 0906003.
- Xiao Y Y, Tang Y, Zhu Z H. Few-mode fiber temperature sensors based on modal interference between orbital angular momentum modes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0906003.
- [6] Zhang H, Zhang X G, Li H, et al. The orbital angular momentum modes supporting fibers based on the photonic crystal fiber structure[J]. *Crystals*, 2017, 7(10): 286.
- [7] 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.
- [8] Nandam A, Shin W. Spiral photonic crystal fiber structure for supporting orbital angular momentum modes [J]. *Optik*, 2018, 169: 361-367.
- [9] Liu E X, Tan W, Yan B, et al. Robust transmission of orbital angular momentum mode based on a dual-cladding photonic quasi-crystal fiber[J]. *Journal of Physics D*, 2019, 52(32): 325110.
- [10] Wang W C, Wang N, Li K Y, 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: 102213.
- [11] Zhang Z M, Liu X Y, Wei W, et al. The simulation of vortex modes in twisted few-mode fiber with inverse-parabolic index profile[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 7101908.
- [12] 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.
- [13] 靳晓玲, 王有为, 孙兵, 等. 环形中空光子晶体光纤用于多阶涡旋光传输 [J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1105001.
- Jin X L, Wang Y W, Sun B, et al. Annular and hollow-core photonic crystal fiber for propagation of multi-order vorticity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1105001.
- [14] Bozinovic N, Golowich S, Kristensen P, et al. Control of orbital angular momentum of light with optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2451-2453.
- [15] Araki S, Suzuki K, Nishida S, et al. Ultra-broadband tunable (0.67 - 2.57 μm) optical vortex parametric oscillator[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56(10): 102701.
- [16] Shen P C, Cao Q, Bai L H, et al. Concise relation among the effective index of the TE_{01} mode of the metal rectangular waveguide and those of the TE_1 and TM_0 modes of the metal parallel-plate waveguide for terahertz waves[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(5): 1173.
- [17] Gulistan A, Ghosh S, Chugh S, et al. Air-holes induced multimodal fiber design to increase the effective index difference between higher order guided modes[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 102023.
- [18] Qin Y, Jiang P, Yang H J, et al. Broadband and low confinement loss photonic crystal fibers supporting 48 orbital angular momentum modes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11052: 110520S.
- [19] Al-Zahrani F A, Hassan M M. Enhancement of OAM and LP modes based on double guided ring fiber for high capacity optical communication[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, 60(6): 5065-5076.
- [20] Rjeb A, Fathallah H, Machhout M. Numerical Investigation of orbital angular momentum mode purity in Inverse Parabolic Graded index fiber[C]//17th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), July 20-23, 2020, Monastir, Tunisia. New York: IEEE Press, 2020: 925-928. [LinkOut]
- [21] 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, 24(15): 17285-17291.
- [22] Xu X, Jia H Z, Lei Y, et al. Theoretical proposal of a low-loss wide-bandwidth silicon photonic crystal fiber for supporting 30 orbital angular momentum modes[J]. *PLoS One*, 2017, 12(12): e0189660.
- [23] Ren W X, Gong Y D, Zhang Z, et al. Optical OAM tweezer based on graded-index multimode fibers[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(25): 7634-7639.
- [24] Zhang Y, Li Y, Zhang Y X, et al. HACF-based optical tweezers available for living cells manipulating and sterile transporting[J]. *Optics Communications*, 2018, 427: 563-566.
- [25] Wong G K L, 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): 446-449.
- [26] 李先进, 庞拂飞, 刘兔兔, 等. 3D 打印机械光栅挤压涡旋光纤激发矢量模[J]. *光通信技术*, 2018, 42(9): 1-3.
- Li X J, Pang F F, Liu H H, et al. Excitation vector modes by applying stress on vortex fiber through an external 3D printed mechanical grating[J]. *Optical*

- Communication Technology, 2018, 42(9): 1-3.
- [27] 汪舰, 魏建平, 杨波, 等. 微结构聚合物光纤制备方法的研究进展[J]. 功能材料, 2013, 44(S2): 171-175.
Wang J, Wei J P, Yang B, et al. Research progress of microstructured polymer optical fiber preparation method [J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(S2): 171-175.
- [28] Pryamikov A D. Negative curvature hollow core fibers: design, fabrication, and applications[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8961: 89610I.
- [29] 白凤茹. 等离子固相外沉积大尺寸石英套管研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017: 3-9.
Bai F R. Study on large size cylinder by plasma solid outside deposition[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017: 3-9.
- [30] 郑兴娟, 任国斌, 黄琳, 等. 少模光纤的弯曲损耗研究[J]. 物理学报, 2016, 65(6): 064208.
Zheng X J, Ren G B, Huang L, et al. Study on bending losses of few-mode optical fibers[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(6): 064208.
- [31] Bhandari R. Analytic expressions for orbital angular momentum modal crosstalk in a slightly elliptical fiber[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(6): 7202621.
- [32] 魏薇, 张志明, 唐莉勤, 等. 六重准晶涡旋光光子晶体光纤特性[J]. 物理学报, 2019, 68(11): 114209.
Wei W, Zhang Z M, Tang L Q, et al. Transmission characteristics of vortex beams in a sixfold photonic quasi-crystal fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(11): 114209.