

引用格式: YUAN Yuan, KONG De-peng, HE Zheng-quan, *et al.* OAM Mode Transmission Characterization of Hollow Ring-core POF Related to Geometric Tolerance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(6):0606002

袁苑,孔德鹏,贺正权,等.聚合物中空环芯光纤中 OAM 模式传输的几何容差特性研究[J].光子学报,2020,**49**(6):0606002

聚合物中空环芯光纤中 OAM 模式传输的 几何容差特性研究

袁苑^{1,2},孔德鹏¹,贺正权¹,王丽莉¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,西安 710119)

(2 中国科学院大学,北京 100039)

摘 要:基于全矢量有限元法,研究了聚合物中空环芯光纤结构的椭圆、偏芯、直径不均匀等几何形变对光纤中轨道角动量模式性能的影响;此外,还研究了在保持轨道角动量模式稳定传输的条件下,光纤结构所能承受的最大形变.结果表明椭圆和偏芯会引起轨道角动量模式在传输过程中发生奇偶模间的模式走离,导致轨道角动量模式纯度降低,进而导致模式串扰增大;数值计算结果表明,当椭圆度或偏心率小于 1% 时,模式纯度大于 99.02%,串扰小于 -20.08 dB.光纤的直径不均匀仅对光纤中所能支持的轨道角动量模式数量造成影响,纤芯半径越大,光纤中所能传输的轨道角动量模式越多;直径不均匀度在 -3%~10% 内的光纤均可支持原有的 26 个轨道角动量模式.

关键词:轨道角动量模式;聚合物光纤;模式走离;模式纯度;模式串扰

中图分类号:O436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204906.0606002

OAM Mode Transmission Characterization of Hollow Ring-core POF Related to Geometric Tolerance

YUAN Yuan^{1,2}, KONG De-peng¹, HE Zheng-quan¹, WANG Li-li¹

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The influences of the geometric deformation of the fiber such as ellipse, misalignment and diametrical nonuniformity on the performance of Orbital Angular Momentum (OAM) modes propagated in the Hollow Ring-core Polymer Optical Fiber (HRC-POF) are studied by full vector finite element method. In addition, the maximum deformation that the fiber can withstand under the condition that maintains the stable transmission of the OAM mode is also studied. The results show that the ellipse and misalignment will cause the mode walk-off upon propagation, leading to the decrease of the purity of synthesized OAM modes and the increase of the crosstalk. Numerical results show that the purity of synthesized OAM modes is more than 99.02% and the crosstalk is less than -20.08 dB when the ellipticity or misalignment is within 1.0%. The diametrical nonuniformity of the fiber will only affect the number of OAM modes supported in the HRC-POF. The larger the core radius is, the more OAM modes can be transmitted in the fiber. Besides, the original 26 OAM modes can be supported in HRC-POF when

基金项目:国家自然科学基金(Nos.11504416, 11474351, 61275106, 61535015)

第一作者:袁苑(1993-),女,博士研究生,主要研究方向为聚合物涡旋光纤. Email:yuanyuan2015@opt.cn

通讯作者:孔德鹏(1982-),男,副研究员,博士,主要研究方向为特种塑料光纤及器件. Email:kongdp@opt.ac.cn

收稿日期:2019-12-16;录用日期:2020-03-30

<http://www.photon.ac.cn>

the diametrical nonuniformity is -3% to 10% .

Key words: Orbital angular momentum; Polymer optical fiber; Modes walk-off; Mode purity; Inter-mode crosstalk

OCIS Codes: 060.2280; 060.2330; 060.2400; 080.4865; 160.5470

0 引言

近年来大数据、人工智能终端、云计算等新兴业务的迅速发展对通信容量提出了更高的要求.而光通信做为现代通信产业的支柱,主要利用光波的频率、幅度、偏振、相位等维度的复用技术和调制格式来提升光通信容量和光谱效率^[1],如现如今推广的 5G 技术,引入了具有更高带宽的毫米波频段以实现更高的数据速率^[2].然而这些物理维度的利用已经逐渐趋于饱和,光通信系统开始出现新的容量危机^[3].开发光波的新维度来提升信道容量和频谱利用率是解决这一问题的有效方法,而空间维度是唯一尚未被充分开发利用的维度^[4].空分复用(Space Division Multiplexing, SDM)这一新兴复用技术可以解决通信压力,实现光通信容量的可持续增长.而轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)模式的复用是实现 SDM 的重要途径^[5].

具有不同拓扑荷的 OAM 模式是相互正交的,从理论上讲涡旋光束的拓扑荷取值是无穷的,可以构成无限维 Hilbert 空间,携带无穷大的信息容量.因此可以使用不同拓扑荷的涡旋光束进行 SDM,使得通信容量得到最大限度的提升^[6-7].实现涡旋光束的有效传输是基于 OAM 复用的通信系统中极其重要的一环,传输媒介为自由空间和光纤两种^[8].当涡旋光在自由空间中传输时,大气湍流会造成不同信道之间的串扰^[5];而光纤则可以有效隔离外界扰动因素,实现 OAM 的长距离传输.迄今为止,很多玻璃光纤被提出用来传输 OAM 模,如环芯光纤^[9-11]、空气芯光纤^[12, 13]、多轨道角动量多环光纤^[14-16]、扭转空气芯光纤^[17]、光子晶体光纤^[18-20]和负曲率光纤^[21].其中环芯光纤有着结构简单、折射率分布均匀、制造相对简单的特点,是未来用于 OAM 复用的光纤通信系统中较为理想的载体.基于此本课题组设计出一种基于聚苯乙烯(Polystyrene, PS)的中空环芯聚合物光纤(Hollow Ring-core Polymer Optical Fiber, HRC-POF)用于传输 OAM 模式^[22],该光纤在完美结构下可以稳定传输 26 个 OAM 模(中心波长为 670 nm),且模式纯度大于 99.73%.

但是,在光纤的制造和使用过程中,由于制作工艺误差、弯曲、挤压等原因,光纤结构难以始终保持完美圆对称.如对于 HRC-POF 来说,实际制得的光纤会出现椭圆、偏芯、光纤直径不均匀的问题,而前两个问题可能会造成 OAM 模式在传输过程中发生奇偶模的模式走离、模式串扰增加、模式纯度降低等^[23-24];光纤直径不均匀则会导致其传输模式的数量发生变化.因此,本文在文献^[22]的基础上,进一步分析和研究光纤结构的椭圆度、不同心度以及直径不均匀度与光纤中 OAM 模式数量及质量间的关系,并指出了 OAM 模式保持稳定传输所需的光纤结构几何容差.对实际应用来说,研究光纤的几何结构容差特性对其 OAM 模式传输性能具有十分重要的意义,可为环芯光纤的制造提供理论依据和指导.

1 理想光纤结构及其形变

理想状态下,HRC-POF 为圆对称结构且直径均匀,但现实中的光纤往往会存在着不圆、不同心、直径不均匀等状况.

1.1 理想光纤结构

图 1 为所提出的用来传输 OAM 模的 HRC-POF 的剖面结构,中心为中空部分,半径为 r_1 ;中间一层为环芯,半径为 r_2 ;最外层为包层,半径为 r_3 . n_1 、 n_2 和 n_3 分别代表空气、环芯材料和包层材料的折射率.这里选择 PS($n_2 = 1.59$)作为环芯材料,氟乙炔丙烯聚合物(Fluorinated Ethylene Propylene, FEP),($n_3 = 1.34$)作为包层材料.高折射率环芯导致模式在内部中空中容易倏逝^[25],于是模式被很好地限制在环芯中传导,而环芯 PS 低损耗窗口在 670 nm 左右,故针对该新型 HRC-POF 的研究均在中心波长为 670 nm 处进行.

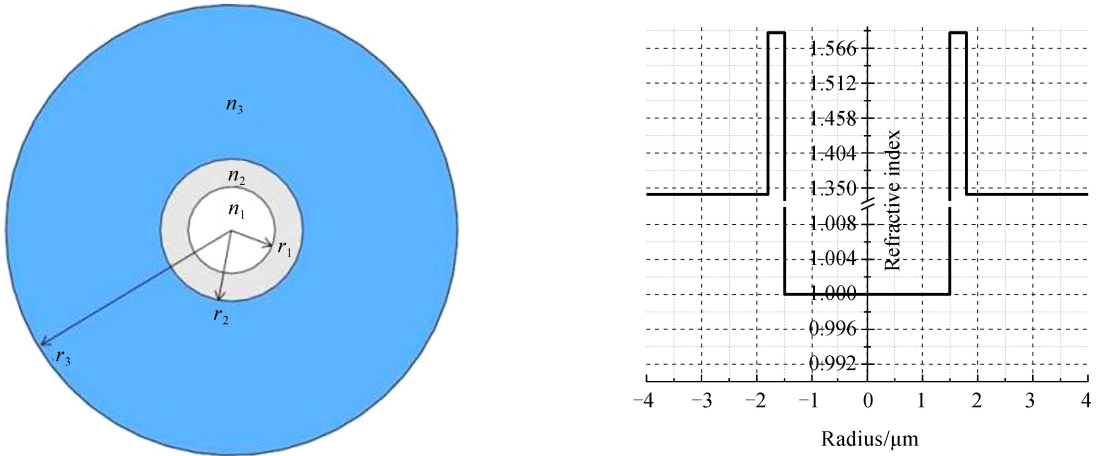


图1 理想 HRC-POF 的剖面结构及折射率分布

Fig.1 Cross section and refractive index profile of ideal HRC-POF

1.2 光纤结构几何偏差

对于实际制得的光纤来说:1)制作过程中产生形变、工艺误差;2)使用过程中外界存在扰动,例如挤压.这些因素均会导致光纤结构的不理想,出现椭圆、偏芯、直径不均匀的现象.

1.2.1 椭圆

环芯光纤的椭圆是指光纤剖面呈现椭圆分布,不再是标准的圆对称状.椭圆剖面的光纤如图 2(a)所示,这里用椭圆度来衡量光纤形变程度.定义光纤的椭圆度 e 为^[26]

$$e = \frac{a_j - b_j}{a_j} \times 100\% \quad (j=1,2,3) \quad (1)$$

式中, a_j 与 b_j 分别为椭圆的长轴与短轴.当 $e=0\%$ 时,光纤为理想圆对称环状光纤.

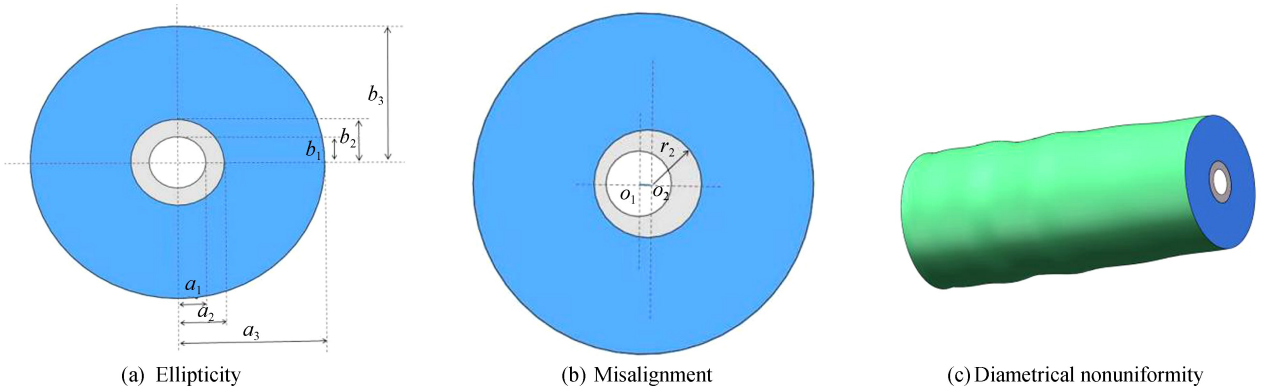


图2 形变的 HRC-POF 剖面结构

Fig.2 Cross section of HRC-POF with geometric deformation

1.2.2 偏芯

环芯光纤的偏芯是指光纤环状纤芯的内外圆圆心出现了一定量的偏移,不再是理想状态下的同心环分布.偏芯的环状光纤如图 2(b),这里用偏心率来衡量环芯内外圆圆心的偏移量.定义光纤的偏心度为环芯偏移量 $|O_1O_2|$ 与环芯半径 r_2 的比值为

$$\Delta = \frac{|O_1O_2|}{r_2} \times 100\% \quad (2)$$

当 $\Delta=0\%$ 时,光纤为同心环状.

1.2.3 直径不均匀

环芯光纤的直径不均匀是指沿着传播轴方向 z ,光纤剖面的几何尺寸随着 z 的变化而变化,而不是完美状态下粗细程度一直保持恒定不变.直径分布不均匀的环状光纤如图 2(c).定义光纤的直径不均匀度 ϵ 为粗

细改变后的光纤直径变化量与理想光纤直径的比值

$$\epsilon = \frac{D_z - D}{D} \times 100\% \quad (3)$$

式中, D 为理想光纤直径, D_z 为尺寸变化后的光纤直径. 当 $\epsilon = 0\%$ 时, 表明光纤直径均匀.

2 几何偏差对光纤性能的影响

要实现 OAM 模式在光纤中的有效传输, 需要设计特殊结构的光纤, 使光纤中近简并的矢量本征模间的有效折射率差 $\Delta n_{\text{eff}} > 10^{-4}$, 从而避免矢量模式简并形成线偏振 (Linear Polarization, LP) 模式, 实现 OAM 模式的稳定传输^[5-24]; 且对于光纤中传输的 OAM 模式, Δn_{eff} 越大, 模式间的简并和串扰越弱, 传输越稳定. 此外, 由于不同径向阶数的 OAM 模间会发生偶然简并, 复用/解复用复杂, 故设计的光纤需要在有效分离近简并模的同时抑制径向高阶模^[5]. 对已设计的理想 HRC-POF 来说: 1) 与已报道的玻璃环芯光纤^[9-11] 相比, 这种新型的中空环芯 POF 可以拥有更大的折射率对比, 因此 Δn_{eff} 将得到大幅提高 (约为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 量级), OAM 模传输更稳定; 2) 环芯尺寸比例的巧妙设定有效地抑制了径向高阶模, 从而在光纤中只有径向一阶 OAM 模式的存在. 除此之外, POF 的材料选择也较多, 同时 HRC-POF 有着加工温度低、制造工艺简单、易切割、成本低的优点. 理想状态下的 HRC-POF 是圆对称且径向均匀的, 但是在实际制造过程中的工艺误差和光纤本征结构会使得在预制棒拉丝过程中, 光纤出现轻微的形变, 如椭圆、偏芯、直径不均匀, 前两个问题可能会造成 OAM 模式在传输过程中发生奇偶模的模式走离, 从而会影响 OAM 模的模式纯度, 导致模式耦合和串扰; 光纤直径不均匀则会导致其传输模式的数量发生变化.

2.1 OAM 模式数量

光纤中的 OAM 模式由矢量本征模组成, 是相位差为 $\pm\pi/2$ 的 HE 或 EH 奇偶模的组合. 又由于用于光通信的 OAM 模仅为径向一阶模, 因此 HRC-POF 中的 OAM 模可表示为

$$\begin{cases} \text{OAM}_{\pm l, 1}^{\pm} = \text{HE}_{l+1, 1}^{\text{even}} \pm i\text{HE}_{l+1, 1}^{\text{odd}} \\ \text{OAM}_{\pm l, 1}^{\mp} = \text{EH}_{l-1, 1}^{\text{even}} \pm i\text{EH}_{l-1, 1}^{\text{odd}} \end{cases} \quad (4)$$

式中, l 为拓扑荷, 代表着 OAM 阶数; 上标“ \pm ”代表着圆偏振方向, l 的正负号代表着场旋转方向. 不同的 OAM 模彼此正交且有着不同的传播常数 ($\Delta n_{\text{eff}} > 10^{-4}$), 模间串扰微弱, 故基于 OAM 模的光纤通信系统不需要多入多出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 过程来进行数据恢复, 通信复杂度大幅降低.

通过全矢量有限元法得到光纤所支持的矢量本征模之后, 即可通过式 (4) 得到光纤所能传输的 OAM 模式. 对理想状态下的 HRC-POF, 可稳定传输 26 个 OAM 模^[22]. 但是光纤的形变可能会导致其所能支持的 OAM 模数量发生变化, 这里研究了 2.0% 以内的椭圆度和偏心率、10% 以内的直径不均匀度对光纤中 OAM 模式数量的影响, 如图 3 所示.

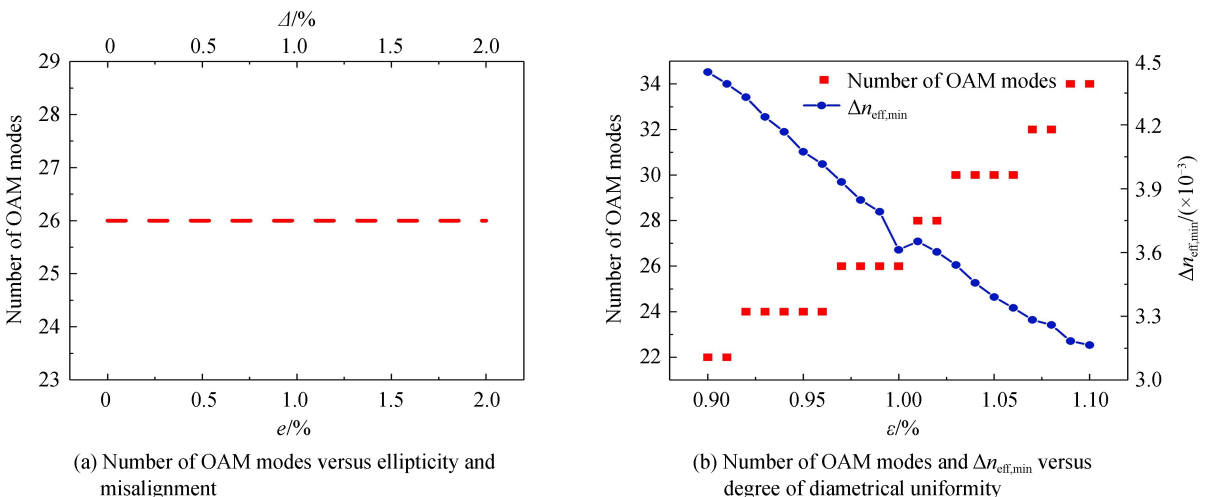


图 3 HRC-POF 中不同形变程度下的模式数量和 $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$

Fig.3 Number of OAM modes and $\Delta n_{\text{eff}, \text{min}}$ versus degree of geometric deformation in the HRC-POF

图 3(a)为光纤椭圆度和偏心率对光纤所能支持的 OAM 模式数量的影响,可以看出 2.0% 以内的椭圆度和偏心率并不会影响光纤中传输的 OAM 模式数量.此外,表 1 为不同椭圆度和偏心率下不同模式组间的最小有效模式折射差 $\Delta n_{\text{eff},\text{min}}$,可以看出始终大于 10^{-4} .图 3(b)中方点为光纤的直径不均匀度对其支持的 OAM 模式数量的影响,可以看出纤芯半径越大,支持的 OAM 模式数量越多^[1].这是由于随着光纤尺寸增加,光纤中传输的本征模式增加,而 OAM 模式又是由矢量本征模组成的,这就造成了 OAM 模式数量的增加;反之亦然.此外还可看出直径不均匀度在 $-3\% \sim 10\%$ 内均可支持原有的 26 个 OAM 模;且图 3(b)中的曲线表明随着直径不均匀度的变化,不同模式组间的 $\Delta n_{\text{eff},\text{min}}$ 始终大于 10^{-4} .这说明该新型 HRC-POF 有着良好的制造容差.

表 1 HRC-POF 中不同椭圆度和偏心率下的 $\Delta n_{\text{eff},\text{min}}$
Table 1 $\Delta n_{\text{eff},\text{min}}$ versus ellipticity and misalignment in the HRC-POF

$e/\%$	0	0.5	1.5	2.0
$\Delta n_{\text{eff},\text{min}}$	3.6128×10^{-3}	3.5677×10^{-3}	3.8211×10^{-3}	3.6937×10^{-3}
$\Delta/\%$	0	0.5	1.5	2.0
$\Delta n_{\text{eff},\text{min}}$	3.6128×10^{-3}	3.1015×10^{-3}	5.2754×10^{-3}	8.2114×10^{-3}

2.2 模式走离

对于完美圆对称光纤,从式(4)中可以看出组成同个 OAM 模的奇偶模完全简并,有着相同的传播常数(即奇偶模的有效折射率差 $\Delta n_{\text{eff}}^{\text{eo}}$ 为 0),因此 OAM 模不会发生由于奇偶模传播速度不同而导致的模式走离,比 LP 模更稳定.但是光纤的椭圆度和偏芯会导致双折射的出现,此时组成同一 OAM 模的两个奇偶模不再简并,而是有着不同的传播常数($\Delta n_{\text{eff}}^{\text{eo}}$ 不再为 0),导致奇偶模沿着光纤的传播速度不同,组成同一 OAM 模式的奇偶模在传输过程中随着时间变化而逐渐分离,OAM 模式不再稳定传输,这种现象称为奇偶模间的模式走离.

首先研究椭圆度和偏心率对组成 OAM 模的奇偶模间有效折射率差 $\Delta n_{\text{eff}}^{\text{eo}}$ 的影响,如图 4.可以看出随着椭圆度和偏心率的增大, $\Delta n_{\text{eff}}^{\text{eo}}$ 逐渐增加,且高阶模对光纤形变有着更高的容忍度.此外,对于同样数值大小的椭圆度和偏心率,偏心率会造成更大的 $\Delta n_{\text{eff}}^{\text{eo}}$,即偏心率对 OAM 模式传输稳定性的影响高于椭圆度.为了更加直观地说明该问题,图 5 给出了不同椭圆度和偏心率下 HRC-POF 中组成 OAM 模的本征模式的强度图,以 HE_{21} 和 HE_{61} 为例进行说明.比较 1、2 行,可以看出随着椭圆度或偏心率的增加,高阶模式 HE_{61} 的畸变相对轻微;比较 1、2 列,可以看出与椭圆度相比,偏心率会造成更大的畸变.

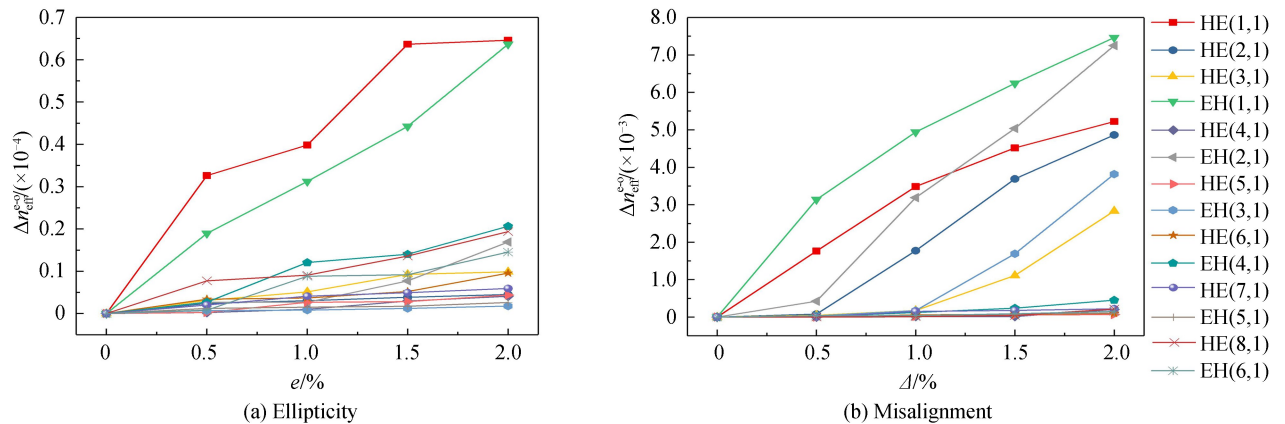


图 4 HRC-POF 中不同椭圆度下与不同偏心率下的 $\Delta n_{\text{eff}}^{\text{eo}}$

Fig.4 The effective refractive index difference between even and odd modes versus ellipticity and misalignment in HRC-POF

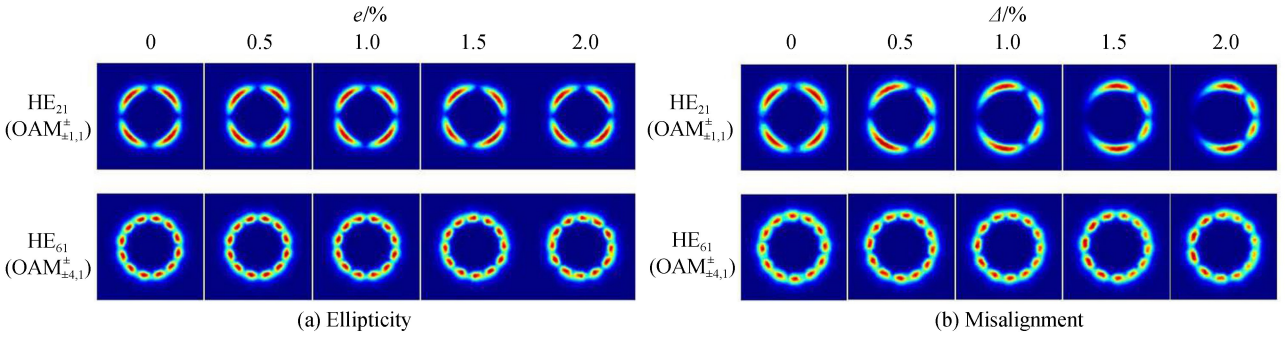


图 5 HRC-POF 中不同椭圆度和偏心率下矢量本征模的强度分布
Fig.5 Mode intensity distribution versus ellipticity and misalignment in HRC-POF

在此基础上,采用 2π 走离长度($L_{2\pi}$)和 10 ps 走离长度(L_{10ps})来表征光纤椭圆度和偏心率对 OAM 模传输的影响, $L_{2\pi}$ 代表着当奇偶模产生模式走离且相对相移为 2π 时,光在光纤中的传输距离; L_{10ps} 代表当奇偶模在时间上分开 10 ps 时,光在光纤中的传输距离. $L_{2\pi}$ 和 L_{10ps} 分别表示为^[23-24]

$$\begin{cases} L_{2\pi} = \frac{\lambda}{n_{\text{eff}}^{\text{even}} - n_{\text{eff}}^{\text{odd}}} \\ L_{10ps} = \frac{c \times \Delta t}{n_{\text{eff}}^{\text{even}} - n_{\text{eff}}^{\text{odd}}} \end{cases} \quad (5)$$

式中, λ 、 c 和 Δt (此处取 10 ps) 分别表示波长、真空光速和走离时间, $n_{\text{eff}}^{\text{even}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{odd}}$ 分别代表组成同一 OAM 模式的光纤本正解的偶模和奇模的有效折射率.图 6 为走离长度随着椭圆度和偏心度的变化,可以看出在波长 670 nm 下,当光纤的椭圆度和偏心率固定时, L_{10ps} 约为 $L_{2\pi}$ 的 4 000 倍;且所有模式的走离长度均随着椭圆度和偏心度的增加而减小.此外,高阶模的走离长度比低阶模更长,这与图 4 中高阶模的 $\Delta n_{\text{eff}}^{\text{eff}}$ 较小相对应;拥有同样数值大小偏心度的光纤走离长度小于拥有同样数值大小椭圆度的光纤,这与此前提到的偏心率对

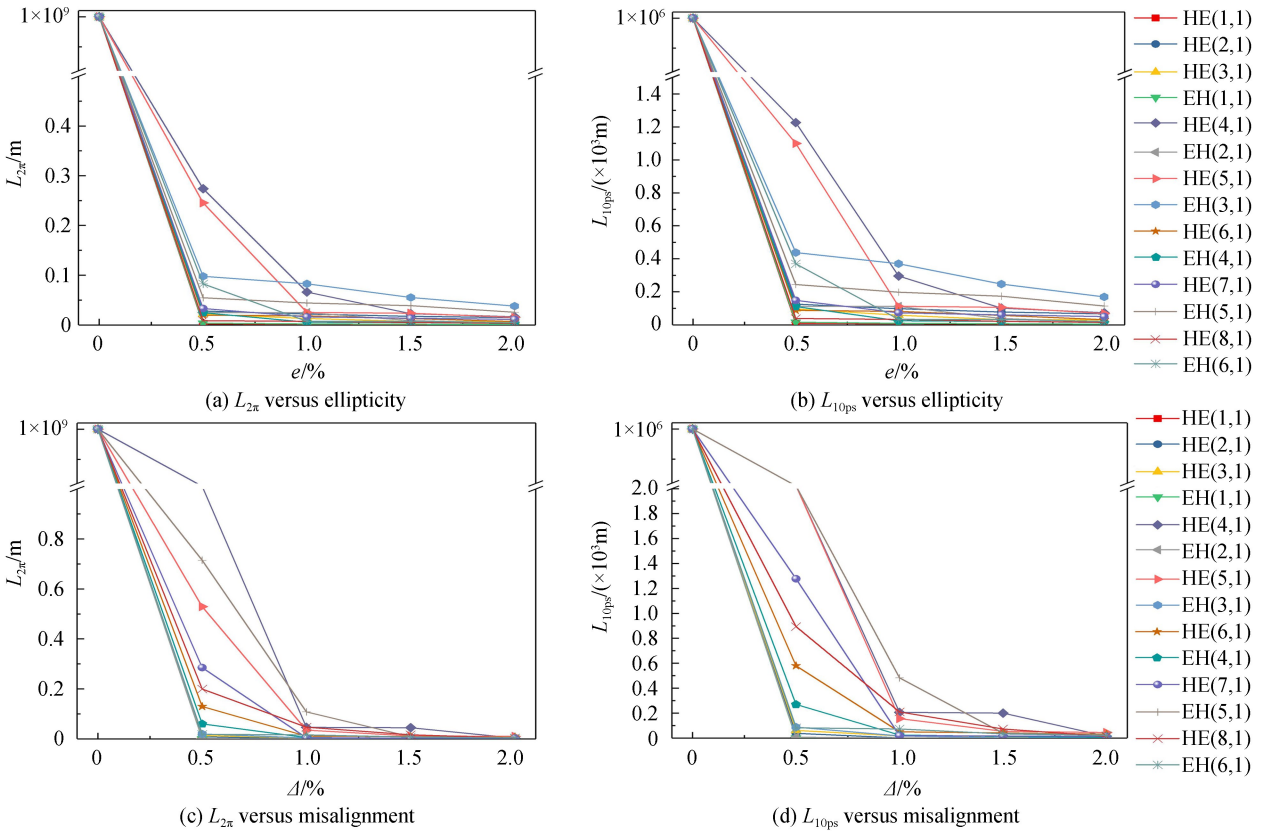


图 6 HRC-POF 中不同椭圆度和偏心率下的走离长度
Fig.6 Walk-off length versus ellipticity and misalignment in HRC-POF

OAM 模式有着更大的影响相对应.

2.3 模式纯度

OAM 模式纯度 W 可以被定义为合成的 OAM 模式中主要 OAM 模所占的能量权重^[16, 27-28]

$$W = \frac{\max(P_{\text{OAM}_1}, P_{\text{OAM}_2})}{P_{\text{OAM}_1} + P_{\text{OAM}_2}} \quad (6)$$

式中, P_{OAM_1} 和 P_{OAM_2} 分别表示 OAM₁ 和 OAM₂ 的功率, OAM₁ 和 OAM₂ 分别表示由光纤矢量本征模构成的 OAM 模的左旋和右旋部分.

对于理想的 HRC-POF, 已经算得其 OAM 模式纯度 >99.73%. 但是光纤的椭圆和偏芯会影响 OAM 模式的分布和纯度, 进而导致 OAM 模式的耦合和串扰. 本节主要对形变对模式纯度的影响进行分析, 串扰将在 2.4 节进一步分析. 图 7 分别为不同椭圆度和偏心率下所对应的光纤中 OAM 模式的最低纯度, 可以看出随着椭圆度和偏心度的增加, 最低模式纯度在逐渐减小. 图 7(a) 表明当光纤椭圆度当椭圆度 <1.5% 时, 模式纯度 >99.099%; 当椭圆度达到 2.0% 时, 最低模式纯度降到 97.373%. 图 7(b) 表明当光纤偏心率 <1.0% 时, 模式纯度 >99.018%; 当偏心率达到 2.0% 时, 最低模式纯度降到 90.056%. 此外, 拥有相同数值椭圆度的光纤比拥有相同数值偏心度的光纤的模式纯度高, 这表明光纤对椭圆度更耐受, 即偏心率对光纤中 OAM 模式的稳定性造成的影响更大.

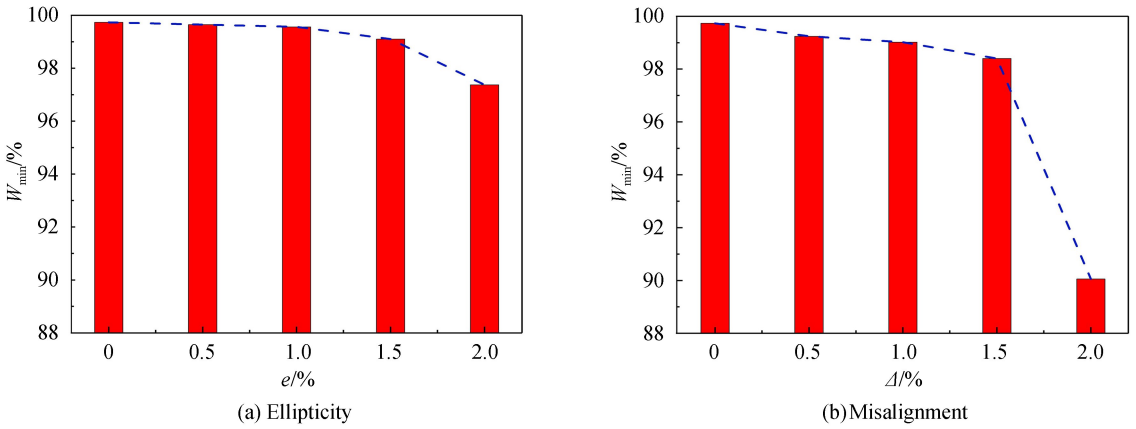


图 7 HRC-POF 中不同椭圆度和不同偏心率下的最低模式纯度

Fig.7 The minimum purity of synthesized OAM modes versus ellipticity and misalignment in HRC-POF

2.4 模式串扰

光纤的椭圆和偏芯除了会影响 OAM 模式纯度外, 还会导致模式串扰. 对于 OAM 模, 其模式耦合和串扰只发生在同个模式组中, 不同模式组间的串扰可忽略^[24], 这是因为随着椭圆率增加, 虽然不同模式组间的模式有效折射率差会减小, 但是始终大于 10^{-4} , 这意味着不同组间的串扰很低. 同个模式组中的串扰被定义为模式本征串扰, 在 2.3 节得到 OAM 模式纯度后, 本征串扰 C 可由式(7)进一步算得

$$C = 10 \cdot \lg(1 - W) \quad (7)$$

已经得到完美圆对称 HRC-POF 的模式串扰 < -26 dB. 当光纤存在椭圆、偏芯时, 会使得模式本征串扰增加. 图 8 为不同椭圆度和偏心率下最大的模式本征串扰(即串扰水平), 可以看出串扰水平与椭圆度和偏心率成正比关系, 即光纤形变越大, 模式质量越低, 从而造成串扰值更大. 当椭圆度和偏心率为 1.0% 时, 串扰水平分别为 -23.582 dB 与 -20.08 dB; 当椭圆度和偏心率达到 2.0% 时, 串扰水平增加至 -15.807 dB 与 -10.024 dB. 这进一步印证了光纤对椭圆的容忍度比对偏芯的容忍度更大.

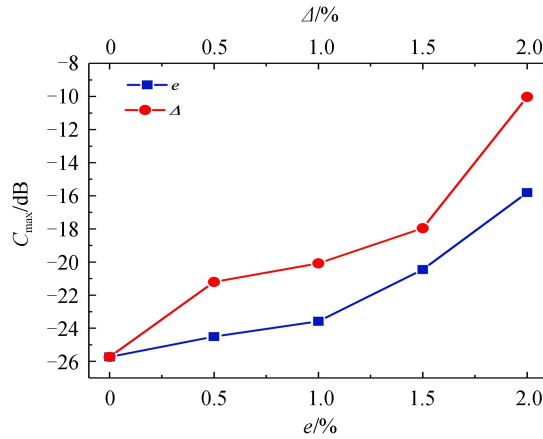


图8 HRC-POF中不同椭圆度和不同偏心率下的串扰水平

Fig.8 The crosstalk level versus ellipticity and misalignment in HRC-POF

以上研究了 HRC-POF 中几何偏差对光纤中 OAM 模式质量的影响,包括椭圆、偏芯和直径不均匀对光纤中 OAM 模式数量、奇偶模模式走离、模式纯度和模式串扰的影响.但实际情况中,这三种形变可能会同时存在或存在其中两种,可以肯定的是这种情况下对光纤性能的影响大于单一形变.除这三种形变外,光纤弯曲、环芯厚度与包层厚度的变化也会对光纤中 OAM 模的传输造成影响,这部分在文献[22]中有详细讨论.

3 结论

本文在用于传输 OAM 模式的聚合物中空环芯光纤的基础上,研究了光纤的椭圆、偏芯与直径不均匀对对光纤中 OAM 模式性能的影响;此外,还研究了能保持 OAM 模式稳定传输的条件下,光纤结构所能承受的最大形变.结果表明,2%以内的椭圆和偏芯不会造成光纤中 OAM 模式数量的变化,且不同模式组间的最小有效模式折射差始终 $>10^{-4}$;但椭圆和偏芯会引起 OAM 模式在传输过程中发生奇偶模间的模式走离,导致 OAM 模式纯度降低,进而导致模式串扰增大;数值计算结果表明当椭圆度或偏心率 $<1\%$ 时,OAM 模式纯度 $>99.02\%$,串扰 <-20.08 dB.此外,光纤的直径不均匀仅会对光纤中所能支持的 OAM 模式数量造成影响,纤芯半径越大,光纤中所能传输的 OAM 模式越多,因此可以通过等比例增大 HRC-POF 的尺寸来进一步增加光纤中所能传输的 OAM 模式数量,从而增加信道数量;数值计算结果表明直径不均匀度在 $-3\% \sim 10\%$ 内均可支持原有的 26 个 OAM 模.本文研究对环芯光纤的制造有重要的理论指导意义,HRC-POF 可被用于基于 OAM 的空分复用技术中,实现高出传统 SI-POF 好几倍的带宽,解决现有 POF 带宽被限制在千兆比特的难题,在超高数据容量、短距离 POF 通信系统中具有潜在的应用前景.

参考文献

- [1] BRUNET C, RUSCH L A. Optical fibers for the transmission of orbital angular momentum modes[J]. *Optical Fiber Technology*, 2016, **31**: 172-177.
- [2] SOFANA R S, TOMISLAV D, SIANO P, *et al.* Future generation 5G wireless networks for smart grid: a comprehensive review[J]. *Energies*, 2019, **12**(11): 1-17.
- [3] PRASHANT M. Trends in optical fibre communication[J]. *Academic Journal of Physical Sciences*, 2019, **1**(1): 7-12.
- [4] ZHU Long. Special light beam generation and its applications in communications[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
朱龙. 特种光束的产生及其在光通信中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [5] WILLNER A E, HUANG Hao, YAN Y, *et al.* Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, **7**: 66-106.
- [6] WANG An-dong, DU Cheng, ZHU Guo-xuan, *et al.* 18 km low-crosstalk OAM + WDM transmission with 224 individual channels enabled by a ring-core fiber with large high-order mode group separation[J]. *Optics Letters*, 2018, **43** (8): 1890-1893.
- [7] DENG Yi-fan, ZHANG Hu, LI Hui, *et al.* Erbium-doped amplification in circular photonic crystal fiber supporting orbital angular momentum modes[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(6): 1748-1752.
- [8] WANG Jian, PADGETT M J, RAMACHANDRAN S, *et al.* Multimode communications using orbital angular momentum[J]. *Optical Fiber Telecommunications*, 2013, **12**: 569-615.

- [9] BOZINOVIC N, YUE Yang, REN Yong-xiong, *et al.* Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, **340**(6140): 1545-1548.
- [10] BRUNET C, VAITY P, MESSADDEQ, YOUNÈS, *et al.* Design, fabrication and validation of an OAM fiber supporting 36 states[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(21): 26117-26127.
- [11] BRUNET C, UNG B, WANG Li-xian, *et al.* Design of a family of ring-core fibers for OAM transmission studies[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(8): 10553-10563.
- [12] SUN Xi-bo, GENG Yuan-chao, ZHU Qi-hua, *et al.* Edge-dip air core fiber for improvement of the transmission of higher-order OAM modes[C]. SPIE, 2018, **10710**: 107103E.
- [13] LI Hai-su, REN Guo-bin, LIAN Yu-dong, *et al.* Broadband orbital angular momentum transmission using a hollow-core photonic bandgap fiber[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(15): 3591-3594.
- [14] LI Shu-hui, WANG Jian. A compact trench-assisted multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for ultrahigh-density space-division multiplexing(19rings \times 22modes)[J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 3853.
- [15] SHAO Guang-hao, YAN Shao-cheng, LUO Wei, *et al.* Orbital angular momentum (OAM) conversion and multicasting using N-core supermode fiber[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 1062.
- [16] WANG Wei, XU Hai-dong, YANG Qi-hao, *et al.* Large mode area microstructured fiber supporting 56 super-OAM modes[J]. *Optics Express*, 2019, **27**: 27991-28008.
- [17] ALESSIO S, SIMON C F, BORIS T K. Terahertz orbital angular momentum modes with flexible twisted hollow core antiresonant fiber[J]. *Applied Photonics*, 2018, **3**: 051708.
- [18] ZHANG Hu, ZHANG Xiao-guang, LI Hui, *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.
- [19] ZHANG Hu, ZHANG Xiao-guang, LI Hui, *et al.* The orbital angular momentum modes supporting fibers based on the photonic crystal fiber structure[J]. *Crystals*, 2017, **7**(10): 286.
- [20] ARSÈNE T, JEAN Y, MICHEL D, *et al.* Ring-core photonic crystal fiber for propagation of OAM modes[J]. *Optics Letters*, 2019, **44**: 1611-1614.
- [21] TU Jia-jing, LIU Zheng-yong, GAO She-cheng, *et al.* Ring-core fiber with negative curvature structure supporting orbital angular momentum modes[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(15): 20358-20372.
- [22] YUAN Yuan, KONG De-peng, WANG Li-li. A hollow ring-core polymer optical fiber for supra-high bandwidth data communication[J]. *Optics Communications*, 2019, **441**: 176-184.
- [23] YANG Yue, YAN Yan, AHMED N, *et al.* Mode properties and propagation effects of optical orbital angular momentum (OAM) modes in a ring fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, **4**(2): 535-543.
- [24] CHEN Si, WANG Jian. Theoretical analyses on orbital angular momentum modes in conventional graded-index multimode fibre[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 3990.
- [25] KARADENIZ, EROL. Optical fibers with high-index-contrast dielectric thin films[J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(10): 105006.
- [26] ZHANG Li-li, ZHANG Xia, BAI Cheng-lin. Study on the effect of ellipticity and misalignment on OAM modes in a ring fiber[J]. *Optoelectronics Letters*, 2018, **14**(78) :50-54.
- [27] ZHANG Zhi-shen, GAN Jiu-lin, HENG Xiao-bo, *et al.* Optical fiber design with orbital angular momentum light purity higher than 99.9%[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(23): 29331-29341.
- [28] WANG Li-xian, CORSI A, RUSH L, *et al.* Investigation of orbital angular momentum mode purity in air-core optical fibers[C]. IEEE, 2016: 203-204.