

面向空分复用的矩形辅助环芯光纤设计及特性

郑晶晶^{**}, 宋豫婧, 裴丽^{*}, 田梓辰, 徐文轩, 宁提纲, 李晶, 王建帅, 白冰

北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 提出了一种用于空分复用的少模光纤, 通过采用类似古币图案的矩形辅助环纤芯折射率剖面结构, 该光纤能够消除常规少模光纤中模式组 $LP_{mn,a}$ ($m=0, 1, 2, \dots; n=1, 2, 3, \dots$) 和 $LP_{mn,b}$ 之间的空间简并性, 同时仍保持低水平的双折射特性, 进而显著降低该类模式组在空分复用中的应用难度。在所提出的优化结构中, 1550 nm 处分离后 $LP_{mn,a}$ 和 $LP_{mn,b}$ 的有效折射率差处于 $(2.2 \sim 6.5) \times 10^{-4}$ 范围, 与相邻模式有效折射率差相当, 且各模式偏振分离水平均处于 10^{-6} 量级及以下, 较好实现了空间简并显著分离、偏振简并不分离的设计目标。仿真分析结果表明, 该结构对加工过程具有较大的形变容限。

关键词 光纤光学; 少模光纤; 空分复用; 简并模

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1606006

Design and Characteristics of Rectangular-Assistant Ring-Core Fiber for Space Division Multiplexing

Zheng Jingjing^{**}, Song Yujing, Pei Li^{*}, Tian Zichen, Xu Wenxuan, Ning Tigang, Li Jing, Wang Jianshuai, Bai Bing

Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract A few-mode fiber for space division multiplexing is proposed. By adopting a rectangular-assistant ring-core refractive index profile structure, which is similar to an ancient coin pattern, the fiber can eliminate the spatial degeneracy between the mode groups $LP_{mn,a}$ ($m=0, 1, 2, \dots; n=1, 2, 3, \dots$) and $LP_{mn,b}$ in the conventional few-mode fiber, maintaining a low level birefringence characteristics. These characteristics can significantly reduce the application difficulty of this type of mode group in space division multiplexing. In the optimized structure proposed in this paper, the refractive index difference of $LP_{mn,a}$ and $LP_{mn,b}$ is in the range of $(2.2 \sim 6.5) \times 10^{-4}$ at 1550 nm, which is at the same level as the refractive index difference of adjacent modes. In addition, the polarization separation level of each mode is 10^{-6} or below. The design goals of significant separation of spatial degeneracy and unseparated polarization degeneracy are well achieved. The simulation analysis shows that the structure has good deformation tolerance for the machining process.

Key words fiber optics; few mode fiber; space division multiplexing; degenerate mode

1 引言

信息产业的快速发展导致实际应用对光通信系统容量的需求迅速提升。目前单模光纤传输系统的传输容量可以达到 100 Tbit/s, 已经接近香农极限^[1-3]。空分复用(SDM)技术的引入有望将系统容量提升一个数量级^[4-6], 是目前广受关注的研究和应用方向。少模光纤^[7-9]通过增加传输模式数量提供新的复用维度以提高传输容量, 其与通过纤芯数提供复用维度的多芯

光纤^[10-12]成为空分复用光纤通信系统中最重要的构成基础。

基于少模光纤的空分复用光纤通信系统, 将每个模式作为一个独立的信道用于传输, 通过提供更多的空间复用维度, 突破了单模光纤日趋瓶颈的容量限制^[13-14]。为了满足空分复用的应用要求, 少模光纤既需要在一定程度上增加光纤支持的模式数量, 同时还需要保持模式间较大的有效折射率差(Δn_{eff}), 以降低传输过程中可能产生的串扰。研究者们针对这一场景

收稿日期: 2022-01-24; 修回日期: 2022-02-23; 录用日期: 2022-03-29

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801003)、国家自然科学基金(62005012, 61827817, 61805010)

通信作者: *lipei@bjtu.edu.cn; **jjzheng@bjtu.edu.cn;

对少模光纤进行了结构设计,提出了多种不同类型的少模光纤结构,以满足 SDM 系统的不同要求^[15-20]。

目前基于少模光纤的空分复用系统主要有三类复用形式:第一类为全标量模复用,即 $LP_{0n}+LP_{mn}$ ($m=0,1,2,\dots;n=1,2,3,\dots$) 的复用形式^[21-22];第二类加入部分空间简并模^[23],以降低全标量模复用时 $LP_{mn,a}$ 与 $LP_{mn,b}$ 之间干扰的影响,即采用 $LP_{0n}+LP_{mn,a}$ 的形式;第三类纳入全部空间简并模^[24-25],即采用 $LP_{0n}+LP_{mn,a}+LP_{mn,b}$ 的形式实施复用。以常规的圆对称阶跃折射率光纤为例:如果光纤能够支持 2 个标量模 (LP_{01}, LP_{11}), 第一类与第二类分别对应 2 个复用信道,而第三类能够提供 3 个,信道数量提升 50%;如果光纤能够支持 6 个标量模 ($LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}, LP_{31}, LP_{12}$), 对应的信道数量则分别为 6 个和 10 个,信道数量提升 66.7%。从这个关系可以明显看出,第一类与第二类复用形式提供的复用信道数量相同,而纳入全部 $LP_{mn,a}$ 和 $LP_{mn,b}$ 的第三类复用形式能够在此基础上进一步明显提高复用信道数量,更充分地挖掘光纤的复用潜力。

在圆对称光纤中,标量模 LP_{mn} 的两个空间简并模 $LP_{mn,a}$ 和 $LP_{mn,b}$ 理论上具有完全相同的有效折射率 n_{eff} , 因此这两个模态的同时使用对通信系统的复用器件和传输条件都提出了非常严苛的要求。人们希望通过光纤结构的特殊设计,使 $LP_{mn,a}$ 和 $LP_{mn,b}$ 之间的有效折射率差增大到 10^{-4} 量级,实现 LP_{mn} 模式的空间简并分离,以使用更简单的结构、更低的成本充分利用 SDM 系统中的空间简并模^[26-32]。2016 年, Liang 等^[28] 提出了一种可以支持三个空间模式 ($LP_{01}, LP_{11,a}, LP_{11,b}$) 的椭圆芯少模光纤,在 C 波段上 $LP_{11,a}$ 和 $LP_{11,b}$ 之间的有效

折射率差达到 9×10^{-4} 。2017 年 Cao 等^[29] 提出的环芯偏振保持光纤通过两个对称空气孔的辅助,实现了包括偏振和空间在内所有简并模组之间均大于 1.02×10^{-4} 的有效折射率差,该光纤可支持 14 个简并分离的空间模式和偏振模;2019 年, Xiao 等^[30] 利用中心带有空气孔的椭圆芯偏振保持光纤,实现了大于 1.93×10^{-4} 的有效折射率差,该光纤可以引导 10 个不同的空间模和偏振模;同年 Corsi 等^[31] 提出高椭圆率光纤,其支持具有 2 个偏振态的 5 种空间模式,相邻空间模的有效折射率差大于 1.2×10^{-3} , 模式双折射高于 1×10^{-4} 。

本文提出一种矩形辅助环芯光纤 (RRF), 光纤圆形纤芯的内部存在一个折射率与包层相同的矩形区域。在这种结构下,所有 LP_{mn} 模式均明显分离为 $LP_{mn,a}$ 和 $LP_{mn,b}$ 两组,且有效折射率差与相邻模式有效折射率差处于同一水平,同时所有模式的偏振模均维持在较好的简并状态。

2 矩形辅助环芯光纤设计

2.1 矩形辅助环芯光纤结构

本文提出的 RRF 结构旨在实现 LP_{mn} 模的空间简并分离,以利于其在 SDM 中的应用。这种光纤的结构如图 1 所示,它具有与常规光纤类似的、同心圆结构的纤芯和包层,半径分别为 r 和 R , 对应的折射率分别为 n_1 和 n_2 , 光纤中心位置有一个折射率与包层相同的矩形区域,长宽分别为 a, b 。这种新型结构光纤截面的纤芯区域呈现出类似中国古代铜币“外圆内方”的形状,这类特殊结构在优化的结构参数下能够提供良好的 LP_{mn} 模式空间简并分离特性。

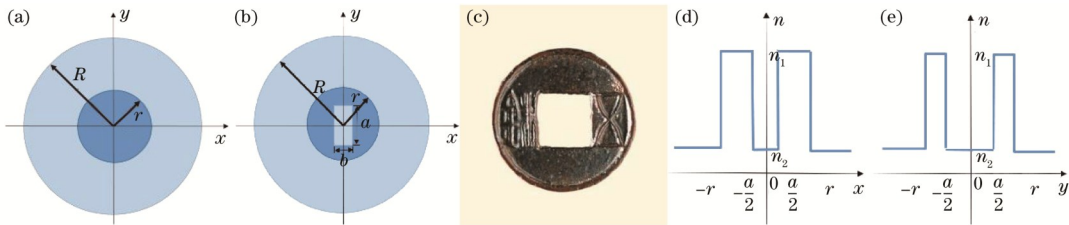


图 1 光纤结构及折射率分布。(a)常规光纤和(b)RRF 的横截面结构;(c)五铢钱图片^[33];RRF 在(d) x 轴和(e) y 轴方向上的折射率分布

Fig. 1 Fiber structures and refractive index distributions of five baht money and RRF. Cross sections of (a) ordinary fibers and (b) RRF; (c) picture of five baht money^[33]; refractive index distributions of RRF in (d) x-axis and (e) y-axis directions

2.2 RRF 的特性分析

本文提出的 RRF 结构最明显的特点在于能够导致 LP_{mn} 模式的空间简并分离,通过设置适宜的结构参数,使空间简并模式 $LP_{mn,a}$ 和 $LP_{mn,b}$ 的折射率差达到相邻模式折射率差的水平,且同时保持较低的偏振分离水平。

本文采用 COMSOL 软件对 RRF 的模式特性进行详细分析。图 2 给出了一个 RRF 优化结构在 1530~1560 nm 波长范围内不同模式的有效折射率,该图还给出了常规阶跃光纤相应模式的有效折射率以供比较。除了常规阶跃光纤没有中心矩形区域外,两类光纤的其他结构参数均相同。

表 1 常规阶跃光纤及 RRF 仿真参数

Table 1 Simulation parameters of ordinary step-index fiber and

Simulation parameter	RRF					
	$R/\mu\text{m}$	$r/\mu\text{m}$	$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	n_1	n_2
Ordinary step-index fiber	62.5	12.5	—	—	1.449	1.444
RRF	62.5	12.5	19	2	1.449	1.444

从图 2 可以看到,具有中心矩形区域的 RRF 导致所有 LP_{mn} 模式组显著的空间简并分离。在圆对称光纤中, $LP_{mn,a}$ 和 $LP_{mn,b}$ 理论上具有相同的 n_{eff} , 两条曲线

应相互重叠。在 RRF 中,由于中心矩形的存在,LP_{mn,a} 和 LP_{mn,b} 发生显著分离。从图 2(b)可以明显看到,发生空间简并分离的模式组 LP_{mn,a} 和 LP_{mn,b} 之间的折射率差 Δn_{eff} 与相邻标量模之间的折射率差处于同一水平。以图 2 所用仿真参数为例,普通阶跃光纤的相邻标量模折射率差分别为 8.6 × 10⁻⁴, 1.1 × 10⁻³,

3.5 × 10⁻⁴, 9.6 × 10⁻⁴, RRF 中包含空间简并模的各相邻模式折射率差分别为 4.2 × 10⁻⁴, 4.7 × 10⁻⁴, 6.5 × 10⁻⁴, 3.6 × 10⁻⁴, 6.2 × 10⁻⁴, 3.6 × 10⁻⁴, 2.2 × 10⁻⁴。分离后的空间简并模具有与相邻标量模同水平的 Δn_{eff}, 这意味着在传输中,原来的空间简并模复用难度可以降低到与标量模复用类似的程度。

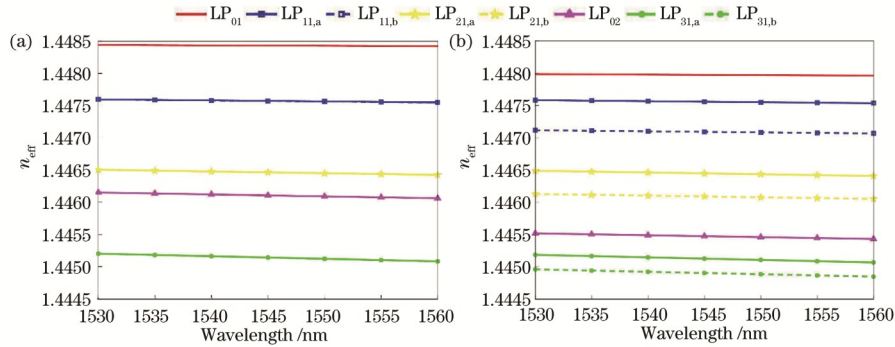


图 2 普通阶跃光纤和矩形辅助环芯光纤不同模式的 n_{eff}。(a)普通阶跃光纤;(b)矩形辅助环芯光纤

Fig. 2 Calculated n_{eff} of ordinary step-index fiber and rectangular-assistant ring-core fiber for different modes. (a) Ordinary step-index fiber; (b) rectangular-assistant ring-core fiber

2.3 RRF 结构参数对性能的影响

从 RRF 的结构定义可以看出,该类光纤的模式特性由纤芯半径 r、芯包折射率差 Δn = n₁ - n₂ (包层折射率为 n₁,纤芯折射率为 n₂)、中心矩形区域的边长 a 和 b 共同决定。其中 r、Δn 主要影响标量模数量和对应的有效折射率,矩形边长 a、b 是影响 LP_{mn} 模式空间简并分离的关键参数。本文关注在圆对称光纤中加入中心矩形区域对空间简并分离的影响,因此以下仅在前述 r 和 Δn 的设定下,讨论 a、b 取值对模式特性的影响。

在 1550 nm 波长下计算得到矩形边长 a、b 对模式有效折射率 n_{eff} 的影响,如图 3 所示。从图中可以看到,无论在给定 a 还是 b 的情况下,增大另一参量的过程都会导致 LP_{mn} 模式空间简并分离现象的逐步出现

及加剧。从图 3 中可以看到,中心矩形的形状结构对于模式的分离起到重要的作用。当固定 b,随着 a 的逐渐增大,从低阶模向高阶模,空间简并模逐渐表现出分离趋势。LP_{11,a} 和 LP_{11,b} 模之间的 Δn_{eff} 在 a = 8.89 μm 时首先达到 1 × 10⁻⁴, LP_{21,a} 和 LP_{21,b} 模、LP_{31,a} 和 LP_{31,b} 模分别在 a 为 13.22 μm 和 16.13 μm 时达到该水平;要达到 Δn_{eff} = 2 × 10⁻⁴, 三组模式对应的 a 分别为 11.85 μm、15.75 μm 和 18.53 μm。当固定 a 的长度, b 在 1.73 ~ 2.65 μm 范围内变化时,包含空间简并模在内的所有相邻模式 Δn_{eff} 均大于 2 × 10⁻⁴。在本设计中, a 和 b 的长度分别设置为 19 μm 和 2 μm,此时该光纤支持的所有 LP_{mn} 模式组的简并分离水平都达到 10⁻⁴ 量级,且相邻模式 Δn_{eff} 间隔较为均匀。

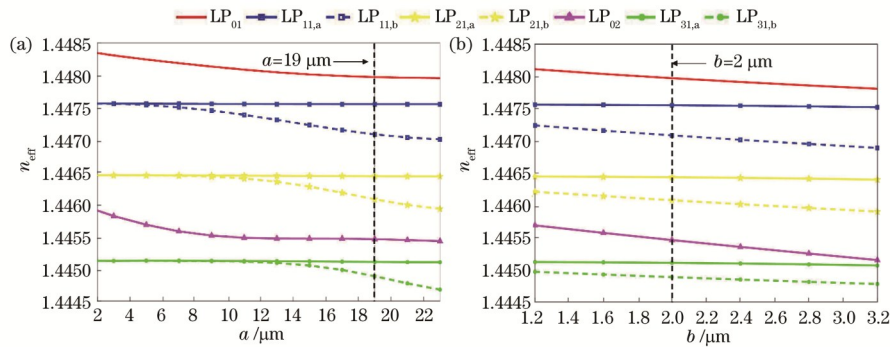


图 3 1550 nm 处 n_{eff} 与矩形长 a 和矩形宽 b 的关系。(a) n_{eff} 与矩形长 a (固定 b = 2 μm) 的关系;(b) n_{eff} 与矩形宽 b (a = 19 μm) 的关系
Fig. 3 Relationship among n_{eff}, rectangle length a, and rectangle width b. (a) Relationship between n_{eff} and rectangle length a for b = 2 μm; (b) relationship between n_{eff} and rectangle width b for a = 19 μm

为了进一步研究中心矩形的形状对光纤模式组分离的影响,分别计算了 1.53 ~ 1.56 μm 范围内不同波长下,中心辅助矩形的形状对 LP₀₁ 与 LP_{11,a} 以及 LP_{11,a} 与 LP_{11,b} 有效模式折射率差 Δn_{eff} 的影响,结果分别如图

4 和图 5 所示。整体来看,当固定辅助矩形的长和宽时,Δn_{eff} 的值随波长的变化并不明显,图 4 中 Δn_{eff} 的变化率小于 7%,图 5 中 Δn_{eff} 的变化率小于 8%,说明光纤特性对于波长具有较好的稳定性。

对于 LP_{01} 与 $LP_{11,a}$ 模(图 4),在同一波长下,随着矩形长或宽的增加, Δn_{eff} 均表现出逐渐减小的趋势,但大小均大于 2.74×10^{-4} ,两个模式始终处于分离状态。结合前述图 3 对于各模式 n_{eff} 的分析结果可知, LP_{01} 与 $LP_{11,a}$ 模的有效折射率差 Δn_{eff} 的减小主要来源于 LP_{01} 模式有效折射率 n_{eff} 的减小,这是由于 LP_{01} 模式分布更向光纤中心处集中,因此中心低折射率区域的增大对于 LP_{01} 模式 n_{eff} 的降低作用更加明显。

$LP_{11,a}$ 与 $LP_{11,b}$ 模(图 5)的 Δn_{eff} 变化趋势则与上述

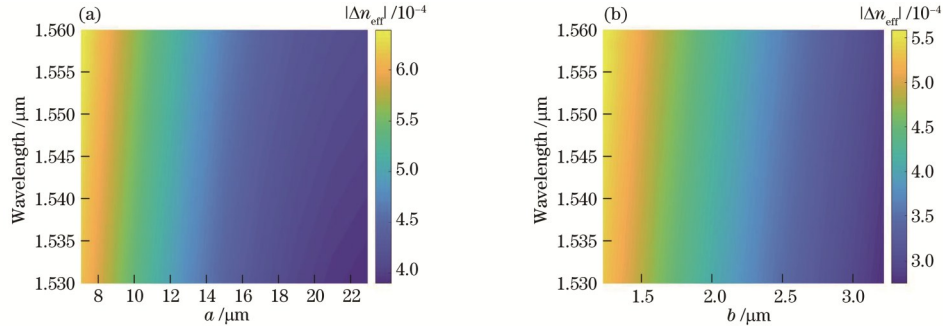


图 4 不同波长下 LP_{01} 和 $LP_{11,a}$ 的 Δn_{eff} 与矩形长 a 和矩形宽 b 的关系。(a) Δn_{eff} 与矩形长 a ($b=2 \mu\text{m}$) 的关系;(b) Δn_{eff} 与矩形宽 b ($a=19 \mu\text{m}$) 的关系

Fig. 4 Relationship among Δn_{eff} between LP_{01} and $LP_{11,a}$, rectangle length a , and rectangle length b at different wavelength. (a) Relationship between Δn_{eff} and rectangle length a for $b=2 \mu\text{m}$; (b) relationship between Δn_{eff} and rectangle width b for $a=19 \mu\text{m}$

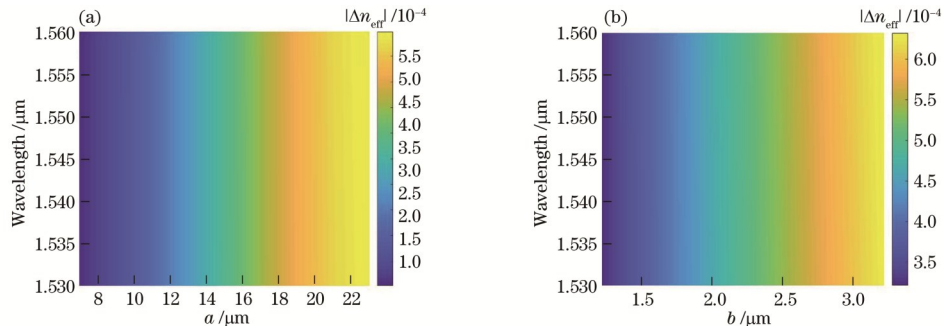


图 5 不同波长下 $LP_{11,a}$ 和 $LP_{11,b}$ 的 Δn_{eff} 与矩形长 a 和矩形宽 b 的关系。(a) Δn_{eff} 与矩形长 a ($b=2 \mu\text{m}$) 的关系;(b) Δn_{eff} 与矩形宽 b ($a=19 \mu\text{m}$) 的关系

Fig. 5 Relationship among Δn_{eff} between $LP_{11,a}$ and $LP_{11,b}$, rectangle length a , and rectangle length b at different wavelength. (a) Relationship between Δn_{eff} and rectangle length a for $b=2 \mu\text{m}$; (b) relationship between Δn_{eff} and rectangle width b for $a=19 \mu\text{m}$

3 空间简并分离与偏振简并分离的特性比较

将光纤折射率剖面由圆对称改为轴对称,是改变光纤双折射特性、分离光纤偏振模简并的常见手段,曾经被大量应用于单模偏振保持光纤的结构设计。熊猫型光纤^[34-35]、领结型光纤^[36-37]、椭圆芯光纤^[38-39]等都是符合上述设计思路的典型偏振保持光纤结构。

从已有文献提供的光纤结构和特性来看,在少模光纤中,打破圆对称而引入轴对称结构的设计通常也会导致偏振模的简并分离,并同时产生空间简并分离的现象^[16,23,27-28,30]。也就是说,不仅所有的 LP_{mn} 模式分离为 $LP_{mn,a}$ 和 $LP_{mn,b}$,包含 LP_{0n} 、 $LP_{mn,a}$ 、 $LP_{mn,b}$ 在内的所有模式均表现出偏振分离的现象。空间简并与偏振简

趋势相反。在同一波长下,随着矩形长或宽的增加, Δn_{eff} 表现出逐渐增大的趋势,两模式逐渐分离。这种相反趋势源于两组变化的不同成因,对于 $LP_{11,a}$ 与 $LP_{11,b}$ 模,中心矩形区域是导致简并分离的原因,因此该区域的增大也就伴随着 $LP_{11,a}$ 与 $LP_{11,b}$ 之间 Δn_{eff} 的增加。这两种变化趋势的同时作用有利于选择出合适的结构参数,使空间简并模式分离对应的 Δn_{eff} 与标量模之间的 Δn_{eff} 处于大致相当的水平,从而有利于光纤中空分复用中的应用。

并分离的量级大致相当,与相邻标量模折射率差相比则通常有 1~2 个数量级的下降。这类光纤在空分复用的实践中:一方面,由于分离的空间简并模式间 Δn_{eff} 与相邻标量模式间 Δn_{eff} 相差较大,良好复用仍然存在一定难度;另一方面,偏振模的简并分离程度与空间模相当,仅采用模分复用而不叠加偏振复用的系统反而会对信道的区分和传输带来不利影响。

在本文提出的优化结构中,偏振模仅表现出极小的简并分离趋势,而空间简并分离的程度与之相比有 2 个数量级的提升,达到与相邻模式折射率差相当的水平,所提结构既方便使用,又不给复用带来额外的困难。

图 6 给出了本文优化参数结构下光纤的模式分析结果,图中包含了所有的偏振和空间简并模,每张图片

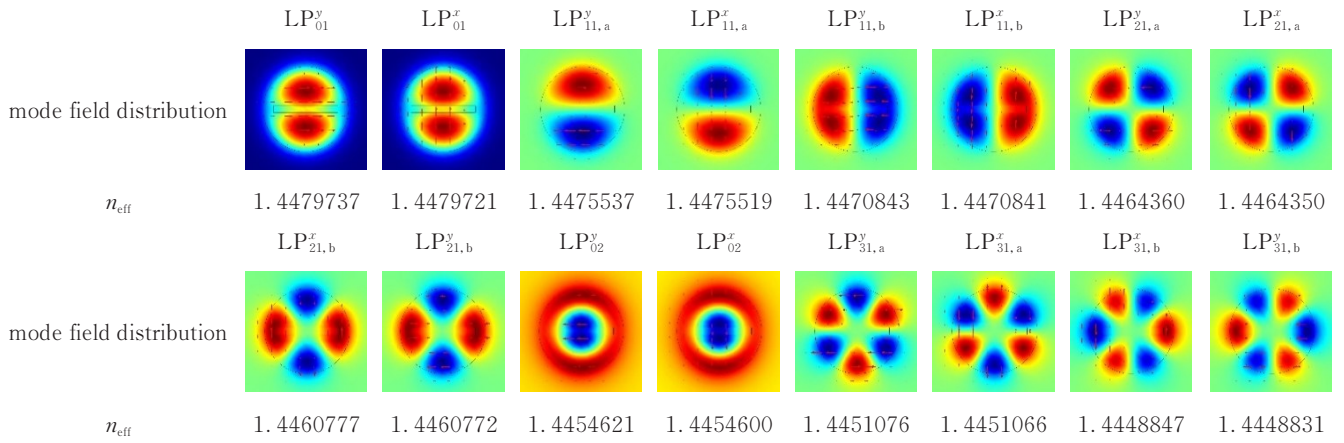


图 6 RRF 的模式分布图

Fig. 6 Modal profiles of RRF

上方给出了对应的有效折射率。可以直观地看到, 相邻模式以及空间筒并分离模组的有效折射率差均在 10^{-4} 量级, 而 LP_{01} 、 $LP_{11,a}$ 、 $LP_{11,b}$ 、 $LP_{21,a}$ 、 $LP_{21,b}$ 、 LP_{02} 、 $LP_{31,a}$ 、 $LP_{31,b}$ 模式的 x 、 y 偏振模之间的有效折射率差分别为 1.6×10^{-6} 、 1.8×10^{-6} 、 0.2×10^{-6} 、 1.0×10^{-6} 、 0.5×10^{-6} 、 2.1×10^{-6} 、 1.0×10^{-6} 、 1.6×10^{-6} , 偏振筒并分离的折射率差水平均在 10^{-6} 量级及以下。该结构较好地实现了空间筒并显著分离、偏振筒并基本不分离的设计目标。

4 矩形辅助环芯光纤的制备方法和工艺误差容限分析

空分复用光纤具有很大的应用前景, 而其是否具有制备上的可操作性也是光纤结构设计的重要评价标

准。本文提出的 RRF 光纤考虑了制备所需的工艺要求, 能够通过现有成熟的光纤制备工艺实现制备, 具有较好的可行性。

图 7 给出了 RRF 制备的主要步骤。RRF 具有圆对称的包层和纤芯, 本文给出的 RRF 优化参数中, 纤芯及包层的边界仍保持同心圆结构, 二者尺寸均与常规少模光纤相当, 芯包折射率差也是商用光纤的常见大小, 因此可以采用目前常规的阶跃光纤制备方法制备预制棒母体, 然后采用中心开孔的方式在预制棒中心制备矩形孔。接下来可以采用填充法, 通过相同尺寸的纯石英矩形棒直接填充, 或采用纯石英毛细棒进行堆棒填充, 完成 RRF 预制棒制备。采用常规光纤或光子晶体光纤的拉丝方法可将制备完成的预制棒拉制成所需的 RRF。

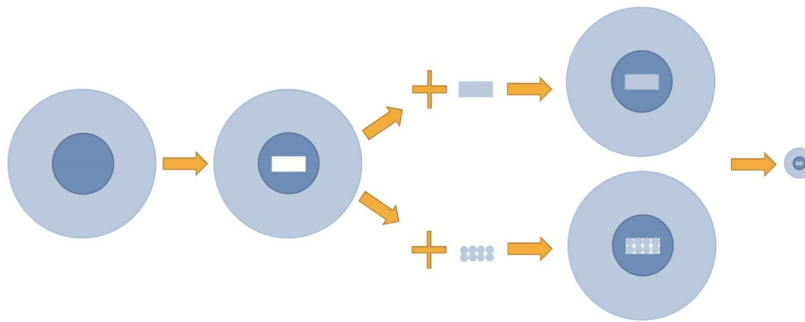


图 7 RRF 的制备方案

Fig. 7 Scheme of preparation of RRF

上述涉及的制备工艺均为成熟的光纤制备工艺, 可控性较好。制备过程中的一个难点在于矩形区域顶点处的结构控制。根据带有矩形内包层的双包层光纤制备经验, 综合考虑熔融石英的材料特性, 顶点处直角在拉丝过程中趋向于较为平滑的弧线。因此 RRF 结构特性对矩形区域顶点处形变的耐受程度就成为制备可行性的关键。

为了分析顶点形变对光纤特性的影响, 在本文提出的 RRF 结构模型基础上, 引入了如图 8 所示的顶点形状变化。矩形的 4 个直角缓变为半径为 r_a 的圆角,

光纤结构的其他参数保持不变。

通过该模型能够计算光纤特性随圆角半径 r_a 的变化关系。图 9 给出了 1550 nm 处各模式有效折射率随圆角半径变化的关系曲线。在圆角半径从 0 变化到 $1 \mu\text{m}$ 的过程中, 该结构各模式的 n_{eff} 变化均小于 0.015% 。这一结果表明 RRF 结构对制备过程导致的顶点形变具有良好的耐受性, 保持成品光纤的设计特性对制备工艺没有严苛要求。

本文所提出的 RRF 结构呈轴对称, 在光纤制备过程中采用中心打孔的方式制备矩形孔时, 要求矩形两

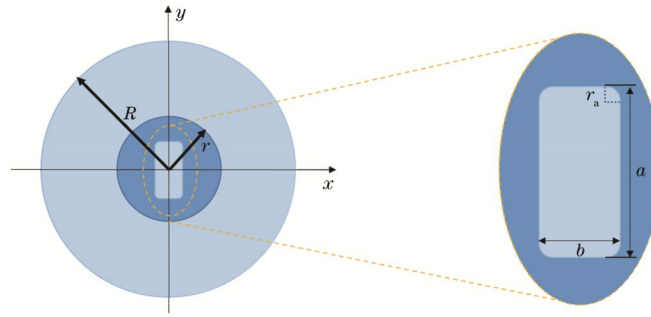
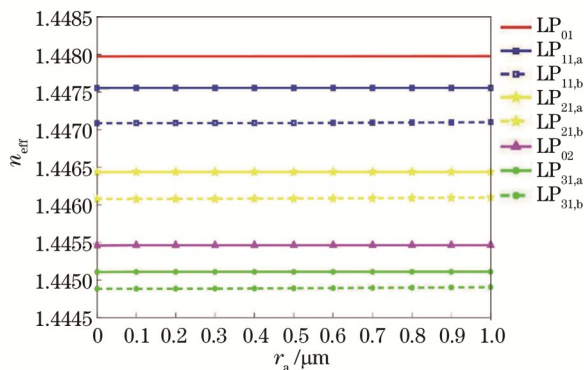


图 8 圆角 RRF 的横截面示意图

Fig. 8 Cross section of rounded RRF

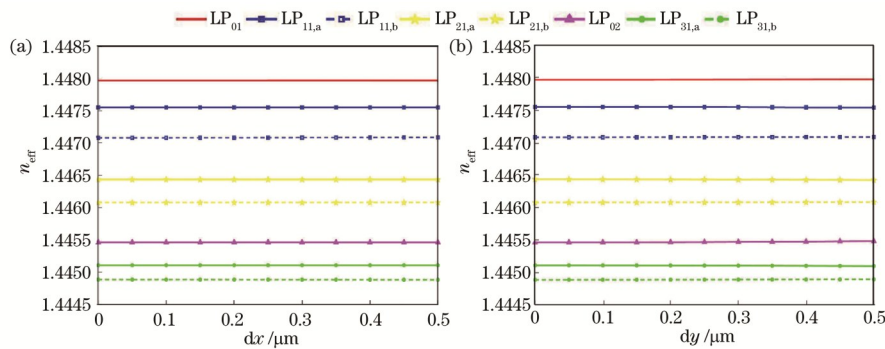
图 9 圆角半径 r_a 对各模式 n_{eff} 的影响关系Fig. 9 n_{eff} of each mode varies with r_a

对角线的交点与纤芯的圆心重合。为了进一步讨论 RRF 的工艺误差容限,在 RRF 结构模型的基础上计算分析了矩形中心点与纤芯圆心不重合,即矩形偏离圆心的情况。图 10 所示为在 1550 nm 处矩形中心点在光

纤结构 x 和 y 方向上的偏移量(dx, dy)对光纤模式特性的影响。在偏移量从 0 变化到 $0.5 \mu\text{m}$ 的过程中,矩形区域在 x, y 方向的偏移导致 n_{eff} 变化率分别小于 0.003% 和 0.013% 。这一结果表明 RRF 在制备过程中对中心矩形偏离圆心的情况具备良好的工艺误差容限。

5 结 论

提出了一种矩形辅助环芯光纤结构,以消除 LP_{mn} 模式的空间简并性。在折射率与包层相同的中心矩形区域辅助下,任意两个空间简并模式 $\text{LP}_{mn,a}$ 、 $\text{LP}_{mn,b}$ 之间的有效折射率差与不同模式间的有效折射率差处于同一水平,且均较偏振简并模折射率差高出 2 个数量级。这种光纤将使 LP_{mn} 模组在 SDM 系统中的应用变得更为简单。该结构采用常规光纤材料及商用光纤折射率差,对矩形直角顶点变形及矩形区域中心偏移都具有良好的耐受性,现有的工艺条件完全能够满足该光纤的加工需求。

图 10 矩形中心点在 x 方向和 y 方向上的偏移量对光纤模式特性的影响。(a) x 方向;(b) y 方向Fig. 10 Effect of offset of rectangle center point in x and y directions on fiber mode properties. (a) x direction; (b) y direction

参 考 文 献

- [1] Saitoh K, Matsuo S. Multicore fiber technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1): 55-66.
- [2] 迟荣华, 周燕萍, 李立亚. 多芯光纤放大器研究现状及发展分析[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 190005.
Chi R H, Zhou Y P, Li L Y. Research status and development analysis of multicore fiber amplifier[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 190005.
- [3] 裴丽, 李祉祺, 王建帅, 等. 空分复用光纤放大器增益均衡技术研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106001.
Pei L, Li Z Q, Wang J S, et al. Review on gain equalization technology of fiber amplifier using space division multiplexing[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106001.
- [4] Mizuno T, Miyamoto Y. High-capacity dense space

- division multiplexing transmission[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 35: 108-117.
- [5] Awaji Y. Review of space-division multiplexing technologies in optical communications[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2019, E102.B(1): 1-16.
- [6] 涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0106003.
- Tu J J, Li Z H. Review of space division multiplexing fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0106003.
- [7] Mori T, Sakamoto T, Wada M, et al. Few-mode fibers supporting more than two LP modes for mode-division-multiplexed transmission with MIMO DSP[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(14): 2468-2479.
- [8] Jiang S L, Ma L, Zhang Z P, et al. Design and characterization of ring-assisted few-mode fibers for weakly coupled mode-division multiplexing transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(23): 5547-5555.
- [9] 代勇, 田凤, 王拥军, 等. 低差分模时延 4-LP 少模光纤设计[J]. *光学学报*, 2021, 41(21): 2106003.
- Dai Y, Tian F, Wang Y J, et al. Design of 4-LP few-mode fiber with low-differential mode delay[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(21): 2106003.
- [10] Yuan H, Furdek M, Muhammad A, et al. Space-division multiplexing in data center networks: on multi-core fiber solutions and crosstalk-suppressed resource allocation[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(4): 272-288.
- [11] Hayashi T, Taru T, Shimakawa O, et al. Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16576-16592.
- [12] 张函, 汪国瑞, 张继伟, 等. 低串扰高密度复合型多芯光子晶体的光纤理论研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(7): 0706005.
- Zhang H, Wang G R, Zhang J W, et al. Theoretical study on low crosstalk high-density composite multi-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0706005.
- [13] Winzer P J. Energy-efficient optical transport capacity scaling through spatial multiplexing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(13): 851-853.
- [14] Sillard P, Bigot-Astruc M, Molin D. Few-mode fibers for mode-division-multiplexed systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(16): 2824-2829.
- [15] Sasaki Y, Takenaga K, Matsuo S, et al. Few-mode multicore fibers for long-haul transmission line[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 35: 19-27.
- [16] Zhao J J, Tang M, Oh K, et al. Polarization-maintaining few mode fiber composed of a central circular-hole and an elliptical-ring core[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(3): 261-266.
- [17] Gao J T, Nazemosadat E, Yang C, et al. Design, fabrication, and characterization of a highly nonlinear few-mode fiber[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(11): 1354-1362.
- [18] Ren F, Zhangsun T W, Huang X S, et al. Design of 20-polarization-maintaining-mode "pseudo-rectangle" elliptical-core fiber for MIMO-less MDM networks[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 50: 87-94.
- [19] Li Y L, Wang X, Zheng H J, et al. A novel six-core few-mode fiber with low loss and low crosstalk[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 57: 102211.
- [20] Corsi A, Chang J H, Wang R H, et al. Highly elliptical core fiber with stress-induced birefringence for mode multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(10): 2822-2825.
- [21] Sillard P, Bigot-Astruc M, Boivin D, et al. Few-mode fiber for uncoupled mode-division multiplexing transmissions[C]//2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 18-22, 2011, Geneva, Switzerland. New York: IEEE Press, 2011: 12356407.
- [22] Kasahara M, Saitoh K, Sakamoto T, et al. Design of three-spatial-mode ring-core fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(7): 1337-1343.
- [23] Riesen N, Love J D, Arkwright J W. Few-mode elliptical-core fiber data transmission[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(5): 344-346.
- [24] Feng F, Gordon G S D, Jin X Q, et al. Experimental characterization of a graded-index ring-core fiber supporting 7 LP mode groups[C]//2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 15216458.
- [25] Xiao H, Li H S, Jian S S. Hole-assisted polarization-maintaining few-mode fiber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 107: 162-168.
- [26] Ramachandran S, Fini J M, Mermelstein M, et al. Ultra-large effective-area, higher-order mode fibers: a new strategy for high-power lasers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2008, 2(6): 429-448.
- [27] Yaman F, Bai N, Zhu B Y, et al. Long distance transmission in few-mode fibers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 13250-13257.
- [28] Liang J P, Mo Q, Fu S N, et al. Design and fabrication of elliptical-core few-mode fiber for MIMO-less data transmission[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(13): 3058-3061.
- [29] Cao Y, Yu X S, Zhao Y L, et al. Design of 14-mode polarization-maintaining ring-core fiber for spatial division multiplexing[C]//2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), July 31-August 4, 2017, Singapore. New York: IEEE Press, 2017: 17373599.
- [30] Xiao H, Li H S, Wu B L, et al. Elliptical hollow-core optical fibers for polarization-maintaining few-mode guidance[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 48: 7-11.
- [31] Corsi A, Chang J H, Rusch L A, et al. Design of highly elliptical core ten-mode fiber for space division multiplexing with 2×2 MIMO[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(2): 18501211.
- [32] Yang Y, Mo Q, Fu S N, et al. Panda type elliptical core few-mode fiber[J]. *APL Photonics*, 2018, 4(2): 022901.
- [33] 中国国家博物馆. 专题展览: 中国古代钱币展[EB/OL].

- [2021-02-05]. <http://www.chnmuseum.cn/portals/0/web/zt/202102gdqianbi/>.
National Museum of China. Special exhibition: Chinese ancient money exhibition[EB/OL]. [2021-02-05]. <http://www.chnmuseum.cn/portals/0/web/zt/202102gdqianbi/>.
- [34] Sasaki Y, Tajima K, Seikai S. 26 km-long polarisation-maintaining optical fibre[J]. Electronics Letters, 1987, 23(3): 127-128.
- [35] 高亚明, 冯光, 刘永建, 等. 熊猫型单偏振光纤[J]. 激光与红外, 2011, 41(11): 1244-1247.
Gao Y M, Feng G, Liu Y J, et al. Single-polarization fiber of PANDA type[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(11): 1244-1247.
- [36] Okamoto K. Single-polarization operation in highly birefringent optical fibers[J]. Applied Optics, 1984, 23(15): 2638-2642.
- [37] Rühl F F, Wong D. True single-polarization design for bow-tie optical fibers[J]. Optics Letters, 1989, 14(12): 648-650.
- [38] Rashleigh S, Marrone M. Polarization holding in elliptical-core birefringent fibers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(10): 1515-1523.
- [39] Shibata N, Tateda M, Seikai S, et al. Birefringence and polarization mode dispersion caused by thermal stress in single-mode fibers with various core ellipticities[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1983, 19(8): 1223-1227.