

偏心椭圆-同心圆双低折射率区辅助的环芯少模光纤*

孙世纪³⁾ 王健健^{1)2)3)†}

1) (华北电力大学燕赵电力实验室, 保定 071003)

2) (华北电力大学电力物联网技术重点实验室, 保定 071003)

3) (华北电力大学电子与通信工程系, 保定 071003)

摘 要

少模光纤因其能够传输有限数量的模式, 已成功应用于光纤通信系统中的空分复用技术。少模光纤中模式分离程度通常可通过模式有效折射率差来衡量。为实现少模光纤内传输模式有效分离, 本文提出一种偏心椭圆-同心圆双低折射率区辅助的环芯少模光纤, 通过采用偏心椭圆以及同心圆辅助纤芯折射率剖面结构, 可以有效消除模式组 LP_{mn} 的空间简并性。有限元建模仿真结果表明, 所提少模光纤结构在 1550nm 处相邻空间模式间的有效折射率差可达 3.28×10^{-4} , 在 1530-1610nm 范围内支持 9 个空间模式, 且最大空间模式有效折射率差达 7.84×10^{-4} , 各空间模式偏振分离水平均处于 10^{-7} - 10^{-6} 量级, 实现了空间模式简并分离、偏振简并不分离的设计目标。除最高阶模式, 其余 8 个空间模式的限制损耗均低于 0.503dB/km。该结构有效减小了模间串扰, 增加了各模式的利用率, 为提升光纤通信系统的传输容量提供了新的选择。

关键词: 少模光纤, 空分复用, 模式有效折射率差, 简并模式

PACS: 42.81.-i, 42.81.Cn, 42.79.Sz

基金: 国家自然科学基金(批准号: 62205105)和河北省省级科技计划(批准号: SZX2020034)资助的课题。

† 王健健.E-mail: ncepuwangjj@163.com

孙世纪.E-mail: gdxnncpu@163.com

1 引 言

随着大数据、人工智能、物联网等新兴技术的迅猛发展, 全球网络流量以数

百倍的速度迅速增长，这种趋势对光纤通信系统的传输容量提出了更高要求^[1-4]。目前，单模光纤通信系统的传输容量已接近香农极限，在系统容量方面面临着巨大挑战^[5-7]。空分复用（Space Division Multiplexing, SDM）技术作为突破容量瓶颈的关键通信技术，有望将通信系统容量提升一个数量级，目前已受到领域内广泛的关注^[8-10]。

空分复用技术主要通过少模光纤^[11-13]、多芯光纤^[14-16]及少模多芯光纤^[17-19]实现。基于少模光纤的空分复用系统利用光纤内不同的模式作为独立传输的信道，已能够实现 Pbit/s 量级的传输，为突破单模光纤通信系统的容量限制提供了重要技术途径^[20,21]。然而，实际应用中的光纤弯曲、结构尺寸偏差、折射率分布不均匀以及器件连接误差等因素会破坏模式的稳定传输，引起不同空间模式之间的耦合，进而产生模间串扰和模式损耗，影响系统的信号传输质量。接收端往往需要采用多输入多输出数字信号处理技术来补偿模间串扰，但其规模和复杂度也伴随着模式数量增加而提高^[22]。研究表明，通过设计新型少模光纤结构，相邻模式间的有效折射率差（ Δn_{eff} ）可以超过 10^{-4} ^[23,24]。通过这种方式能够显著降低模间串扰，从而简化甚至消除多输入多输出数字信号处理技术环节。

当模式之间的 Δn_{eff} 大于 1×10^{-4} ，模式耦合可以忽略不计^[25-27]。少模光纤中传输的线偏振（Linear Polarization, LP）模式包含 $LP_{mn,a}$ 和 $LP_{mn,b}$ 两种空间简并模式。通过设计非圆对称分布的光纤结构，可以打破光纤结构的对称性，使同一标量模式内不同空间简并模式的传播常数产生差异，进而让 Δn_{eff} 大于 10^{-4} 而实现不同空间简并模式的有效分离，同时提升光纤中传输的模式数量^[23,24]。除光纤本身的模式特性外，目标空间模式的激发和接收也是模分复用系统中的重要环节^[30]。然而，在实际应用中光纤弯曲及熔接误差等仍可能引起附加模式耦合和损耗。因此，面向模分复用系统的少模光纤设计不能仅以 Δn_{eff} 作为评价指标，还需要综合

考虑偏振特性、限制损耗、宽带稳定性等因素。

目前，国外研究团队已针对非圆对称少模光纤的结构设计与应用开展了相关研究。2019 年，Corsi^[31]提出一种弱耦合高椭圆纤芯光纤，包层中引入了沟槽，在 C 波段支持 5 个空间模式的传输，空间模式 Δn_{eff} 达到 10^{-3} 。但该光纤模式无法利用偏振模式有效传输。2020 年，该课题组^[32]提出了带有沟槽辅助的高椭圆芯光纤结构，所设计结构可支持 5 个空间模式，空间模式 Δn_{eff} 大于 1.3×10^{-4} 。2023 年，Chen 等^[33]利用椭圆芯结构使 LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式形成不同的传播常数，并采用级联模式选择耦合器在 500m 椭圆芯少模光纤上实现了模分复用传输。该研究表明椭圆芯少模光纤可与模式复用和解复用器件相结合，实现空间非简并模式的选择性激发与传输。2025 年，Gougeon 等^[34]提出了一种低双折射椭圆芯少模光纤结构，该结构支持 5 个空间模式，同时空间模式内偏振模式间 Δn_{eff} 低于 1.05×10^{-5} 。

国内研究人员通过提出新型少模光纤结构，进一步提升了传输模式的数量。2019 年，Xiao 等^[35]提出了一种支持 10 个偏振模式的中心孔辅助保偏少模光纤，其纤芯折射率为 1.478，在 1550nm 处相邻模式 Δn_{eff} 大于 1.93×10^{-4} 。虽然保偏少模光纤能够实现多模式传输，但是光纤中偏振模式分离比较困难，面临比较严重的模间串扰问题，而且纤芯折射率越高，在实际制作过程中掺杂要求越高，制作成本也越高。为此，2022 年，郑等^[36]基于空间简并分离、偏振模式不分离的目标，提出了一种支持 8 个空间模式的矩形辅助环芯少模光纤（Rectangular Ring-assisted Few-mode Fiber, RRF），纤芯折射率为 1.449，在 1530-1560nm 范围内空间模式 Δn_{eff} 大于 2.2×10^{-4} 。同年，Song 等^[37]提出一种支持 9 个空间模式的菱形辅助环芯少模光纤（Diamond-assisted Ring-core Few-mode Fiber, DRF），纤芯折射率为 1.449，该结构在 1530-1565nm 范围内空间模式间 Δn_{eff} 大于 2.11×10^{-4} ，同一空间模式内偏振模式之间的 Δn_{eff} 比不同空间模式之间的 Δn_{eff} 低约 2-3 个数

量级。该课题组还提出一种椭圆辅助环芯少模光纤（Ellipse-assisted Ring-core Few-mode Fiber, ERF）^[38]，该结构纤芯折射率为 1.449，支持 9 个空间模式，在 1530-1565nm 范围内空间模式 Δn_{eff} 大于 3.1×10^{-4} 。2025 年，Ye 等^[39]提出了一种非对称圆环辅助环芯少模光纤结构（Eccentric-circle-assisted Ring-core Few-mode Fiber, ECRF），通过采用偏心圆可以有效分离空间简并模式，同时保持偏振模式不分离。该结构纤芯折射率为 1.449，可以支持 8 个空间模式的传输，在 1530-1565nm 范围内空间模式 Δn_{eff} 大于 2.44×10^{-4} 。从实际应用的角度看，目前设计的少模光纤结构进一步增加了模式之间的分离水平。然而，它们在模式数量、模式分离水平以及传输波段方面，仍有提升的空间。因此，有必要继续开展少模光纤结构设计方面的研究。

本文提出了一种偏心椭圆-同心圆双低折射率区辅助的环芯少模光纤结构（Eccentric Ellipsoid and Concentric Circle-assisted Ring-core Few-mode Fiber, EECCRF），通过在同心圆纤芯内部引入同心圆和偏心椭圆两个低折射率区域，使 LP_{mn} 明显分化为 $LP_{mn,a}$ 和 $LP_{mn,b}$ 两种模式。新型光纤结构在 1530-1610nm 范围内支持 9 个模式传输，其模式有效折射率差和偏振分离水平均优于已有的环芯少模光纤。

2 偏心椭圆-同心圆双低折射率区辅助的环芯少模光纤

2.1 光纤结构设计

本文所提出的偏心椭圆-同心圆双低折射率区辅助的环芯少模光纤（EECCRF）横截面如图 1 所示，其纤芯和包层折射率分别为 n_3 和 n_1 ，所对应的区域半径分别为 r_1 和 R ，光纤的包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$ ，折射率 n_1 为 1.444。该结构在纤芯内部引入了一个同心圆低折射率区域和一个偏心椭圆低折射率区域。其中，同心圆低折射率区域半径为 r_4 ，对应折射率为 n_2 ，其折射率 n_2 满足 $n_1 < n_2 < n_3$ 。偏心

椭圆区域的半长轴为 a ，半短轴为 b ，偏心椭圆圆心距离光纤中心的垂直距离为 ls ，且该区域折射率同包层折射率相同。两个区域的各项结构参数是影响光纤空间简并分离的关键性因素。这种新型光纤结构的截面呈现出轴对称特性，其引入的偏心椭圆和同心圆低折射率区域在优化的结构参数下能够实现 LP_{mn} 模式组的有效分离。光纤沿轴心关于 x 方向和 y 方向的折射率分布如图 2所示。

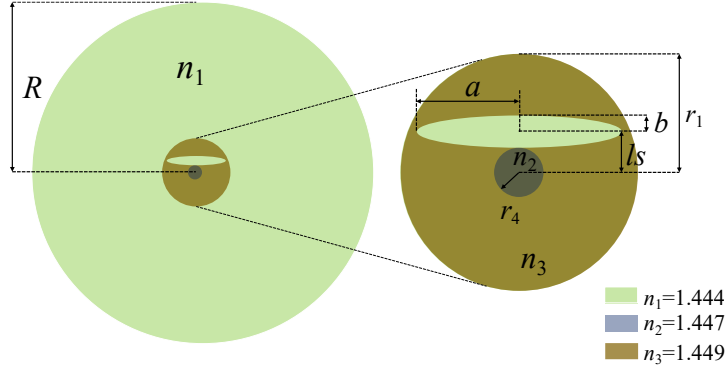


图 1 新型光纤截面图和参数定义

Fig.1. Cross-sectional view and parameter definitions of the new optical fiber.

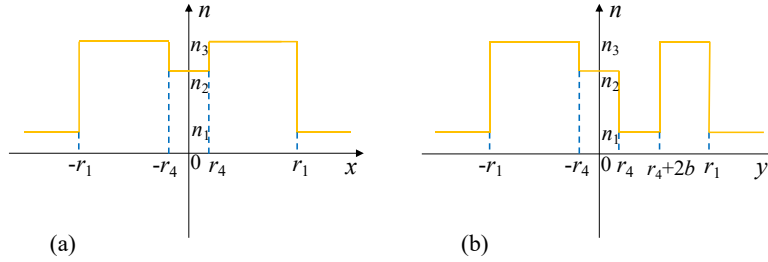


图 2 EECCRF 的折射率分布 (a) x 方向的折射率分布; (b) y 方向的折射率分布

Fig.2. Refractive index distribution of EECCRF (a) refractive index distribution in the x -direction; (b) refractive index distribution in the y -direction.

2.2 EECCRF特性分析

本文采用COMSOL仿真软件对EECCRF的模式特性进行了分析。详细的结构参数列于补充材料的表S1中。仿真结果表明，EECCRF光纤在1530-1610nm范围内支持9种模式： LP_{01} 、 LP_{11b} 、 LP_{11a} 、 LP_{21b} 、 LP_{21a} 、 LP_{02} 、 LP_{31b} 、 LP_{31a} 和 LP_{12b} 。图 3比较了这9个不同模式在1530-1610nm 波长范围内与传统阶跃少模光纤有效折射率 (n_{eff})。

由于传统阶跃少模光纤结构具有圆对称性， $LP_{mn,a}$ 和 $LP_{mn,b}$ 对应的传播常数和

折射率相同，使得 LP_{mn} 模式组处于简并状态。其仅能传输 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 、 LP_{02} 、 LP_{31} 、 LP_{12} 共6个标量模式，如图 3(b)所示。相邻标量模式在1550nm波长处的 Δn_{eff} 分别为 8.65×10^{-4} 、 1.12×10^{-3} 、 3.60×10^{-4} 、 9.67×10^{-4} 、 6.16×10^{-4} 。

EECCRF结构引入同心圆低折射率区域和偏心椭圆低折射率区域后，在一定程度上打破了圆对称性，这导致 $LP_{mn,a}$ 和 $LP_{mn,b}$ 的折射率产生差异， LP_{11} 、 LP_{21} 、 LP_{31} 、 LP_{12} 的空间模式发生简并分离，光纤共支持9个模式： LP_{01} 、 LP_{11b} 、 LP_{11a} 、 LP_{21b} 、 LP_{21a} 、 LP_{02} 、 LP_{31b} 、 LP_{31a} 、 LP_{12b} 。相比于传统阶跃少模光纤，该结构能够容纳更多的传输模式。

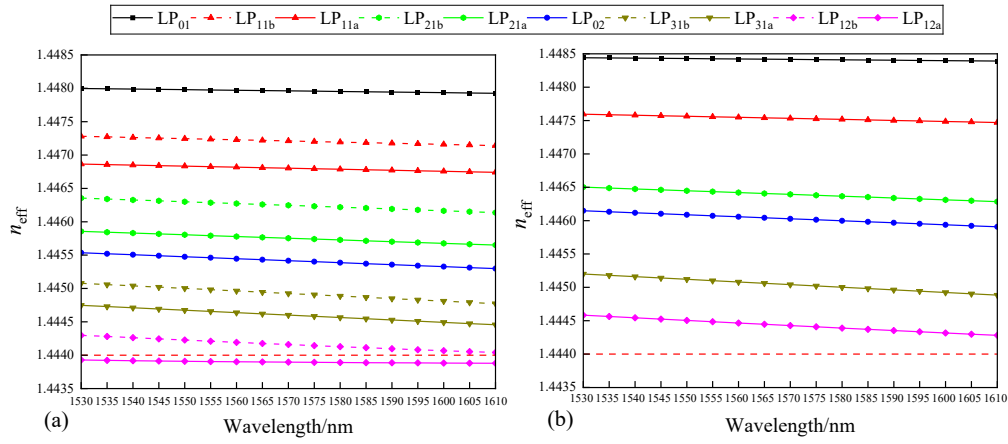


图 3 光纤模式 n_{eff} 对比 (a) EECCRF 的 n_{eff} 随波长的变化; (b) 传统阶跃少模光纤的 n_{eff} 随波长的变化

Fig. 3. Comparison of n_{eff} . (a) n_{eff} versus wavelength for EECCRF; (b) n_{eff} versus wavelength for conventional step-index few-mode fiber.

在1530-1610nm范围内，EECCRF中相邻模式的 Δn_{eff} 如图 4所示。在1550nm处相邻模式的 Δn_{eff} 按照 LP_{01} - LP_{11b} 、 LP_{11b} - LP_{11a} 、 LP_{11a} - LP_{21b} 、 LP_{21b} - LP_{21a} 、 LP_{21a} - LP_{02} 、 LP_{02} - LP_{31b} 、 LP_{31b} - LP_{31a} 、 LP_{31a} - LP_{12b} 的顺序分别为 7.34×10^{-4} 、 4.10×10^{-4} 、 5.35×10^{-4} 、 4.95×10^{-4} 、 3.31×10^{-4} 、 4.72×10^{-4} 、 3.28×10^{-4} 、 4.48×10^{-4} 。在1530-1610nm整个波段范围内， LP_{12a} 折射率低于1.444，该模式泄露至包层中，故未考虑 LP_{12a} 模式在光纤中的传输。 LP_{31b} 与 LP_{31a} 模式间的 Δn_{eff} 和 LP_{21a} 与 LP_{02} 模式间的 Δn_{eff} 共同决定了1530-1610nm范围内该结构的最小空间模式有效折射率差，前者大于

3.16×10^{-4} ，后者大于 3.21×10^{-4} 。在数值上证明了在1530-1610nm范围内，即使是该结构最小的 Δn_{eff} ，依然比现有结构的 Δn_{eff} 效果要好，这反映出EECCRF的空间模式相较于其它结构在1530-1610nm范围内整体分离效果较好。此范围内 LP_{01} 和 LP_{11b} 之间的 Δn_{eff} 最大，最大可以达到 7.84×10^{-4} 。

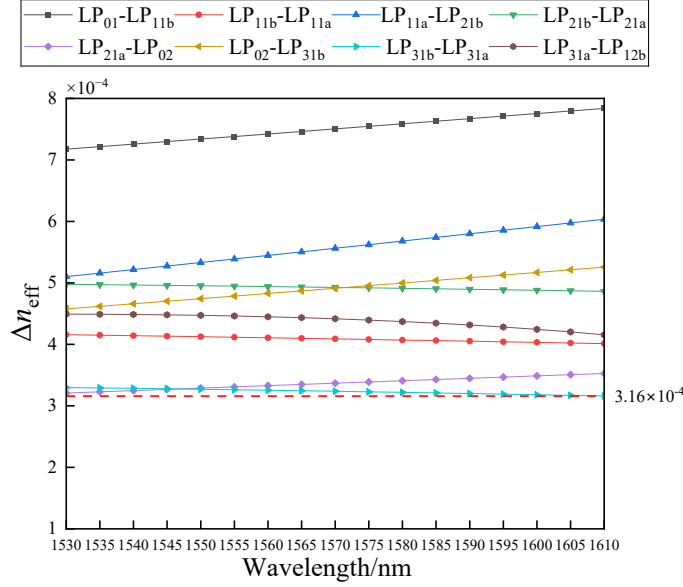


图 4 EECCRF 中相邻模式 Δn_{eff} 随波长的变化

Fig.4. Δn_{eff} versus wavelength for EECCRF.

2.3 EECCRF结构参数对模式特性的影响

本文所提EECCRF中的偏心椭圆低折射率区域改变了光纤的圆对称性，同心圆低折射率区域选择性调控高阶模式的 n_{eff} ，进一步增大了模式之间简并分离的程度。因此，偏心椭圆低折射率区域的尺寸、偏心距离以及同心圆低折射率区域的半径都是决定光纤空间模式简并分离程度的关键参数。针对结构参数对模式特性的影响，将纤芯内的偏心椭圆低折射率区域半长轴设为 a ，半短轴设为 b ，光纤的工作波长、区域折射率以及纤芯半径等采用固定参数，其中 a 固定为 $10.5 \mu\text{m}$ 。接下来讨论偏心椭圆的偏心距离 ls 、椭圆半短轴 b 以及同心圆低折射率区域半径 r_4 对模式特性的影响。

2.3.1 偏心椭圆区域的偏心距离 ls

在1550nm波长处，初步设置参数 $a=10.5\mu\text{m}$ ， $b=1.7\mu\text{m}$ ， $r_4=2.6\mu\text{m}$ ，计算偏心距离 ls 的变化对于模式 n_{eff} 及相邻空间模式 Δn_{eff} 的影响，结果如图5所示。其中，图5(a)展示了9个空间模式在1550nm波长处的 n_{eff} 分布情况。由于偏心椭圆区域完全分布于纤芯内部，所以将 ls 上限取较大的 $6.3\mu\text{m}$ 以确保椭圆的合理尺寸。 $4.3\text{-}6.3\mu\text{m}$ 范围内 ls 的变化严重影响 LP_{21} 和 LP_{31} 的模场分布，导致空间模式出现顺序交换的现象， LP_{31b} 和 LP_{31a} 首先出现模式顺序的交换，其次是 LP_{21a} 和 LP_{21b} ，随着 ls 增加出现的模式顺序交换的现象在一定程度上会增加相邻模式的耦合程度，造成严重的模式串扰。因此考虑 ls 的较小取值可以得到较好的模式分离效果。

图5(b)中展示了光纤相邻模式 Δn_{eff} 随 ls 的变化情况。在 $5.23\text{-}5.8\mu\text{m}$ 范围内， LP_{31b} 和 LP_{31a} 之间的 Δn_{eff} 小于 1×10^{-4} ，此时空间模式 LP_{31b} 和 LP_{31a} 无法实现有效分离；在 $6.18\text{-}6.3\mu\text{m}$ 范围内， LP_{21b} 和 LP_{21a} 的 Δn_{eff} 小于 1×10^{-4} ，两模式也无法实现简并分离。上述波段范围内，光纤空间简并模式的分离都受到抑制。初步考虑在 $4.3\text{-}5.23\mu\text{m}$ 范围和 $5.8\text{-}6.18\mu\text{m}$ 范围内选择 ls 的最佳参数。但是 $5.8\text{-}6.18\mu\text{m}$ 范围内最小的 Δn_{eff} 远低于 ls 为 $4.3\mu\text{m}$ 处最小的 Δn_{eff} (3.28×10^{-4})。因此，为进一步增加 Δn_{eff} ，均衡考虑后，采用 $ls=4.3\mu\text{m}$ 作为光纤偏心椭圆的偏心距离。

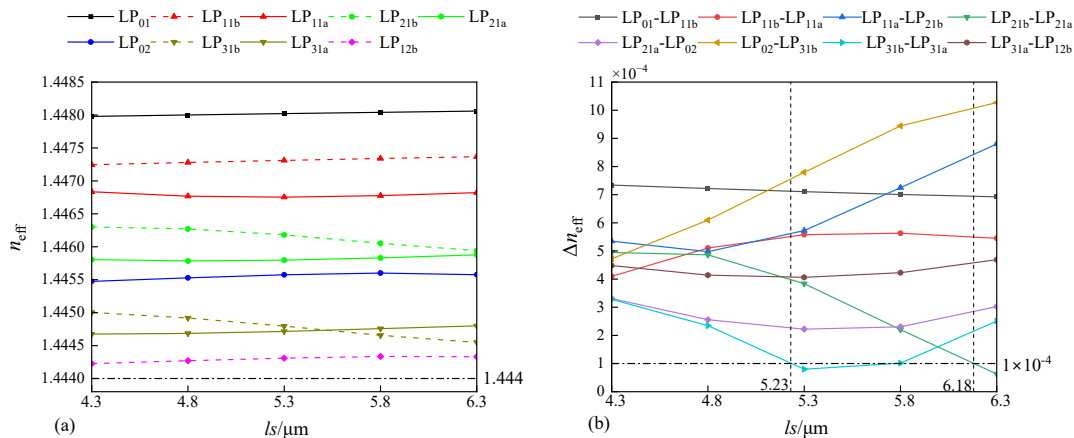


图 5 1550nm 波长处 ls 的变化对 n_{eff} 和相邻模式 Δn_{eff} 的影响 (a) ls 的变化对 n_{eff} 的影响; (b) ls 的变化对 Δn_{eff} 的影响

Fig.5. Influence of ls variation on n_{eff} and Δn_{eff} between adjacent modes at a wavelength of 1550 nm. (a) influence of ls variation on n_{eff} ; (b) influence of ls variation on Δn_{eff} .

2.3.2 偏心椭圆区域半短轴 b

基于所得到的偏心距离 ls 的最佳参数，在 1550nm 波长处，初步设置参数 $a=10.5\mu\text{m}$, $ls=4.3\mu\text{m}$, $r_4=2.6\mu\text{m}$ ，对 b 进行参数化扫描，讨论半短轴 b 的变化对于 n_{eff} 以及相邻模式 Δn_{eff} 的影响，结果如图 6 所示。

图 6(a)展示了 9 个空间模式的 n_{eff} 随 b 的变化情况，随着 b 的增大，9 个模式的 n_{eff} 都呈现出下降趋势，这可能是由于 b 的增大，偏心椭圆低折射率区域的面积增大，导致纤芯区域对于模场的束缚能力变弱。由于 LP_{01} 和 LP_{02} 的模场主要集中分布在中心区域，受到偏心椭圆区域变化带来的影响较小， n_{eff} 变化较小。

图 6(b)展示了 9 个模式中相邻空间模式 Δn_{eff} 随 b 的变化情况， b 的增大可以有效增加 Δn_{eff} ，提升空间模式的分离水平。图中 b 的增大通过降低 $\text{LP}_{mn,a}$ 的 n_{eff} ，显著增加 LP_{11b} 和 LP_{11a} 、 LP_{21b} 和 LP_{21a} 、 LP_{31b} 和 LP_{31a} 之间的 Δn_{eff} 。9 个不同空间模式间 Δn_{eff} 的最小值决定了模式整体分离水平，该值的取值越大，空间模式分离的整体效果越好。在 0.7-1.7 μm 范围内， b 为 1.7 μm 处模式的整体分离效果最好， LP_{31b} 和 LP_{31a} 间的 Δn_{eff} 曲线代表最小模式有效折射率差，其值为 3.28×10^{-4} 。因此，综合考虑下选择 $b=1.7\mu\text{m}$ 作为最佳参数。

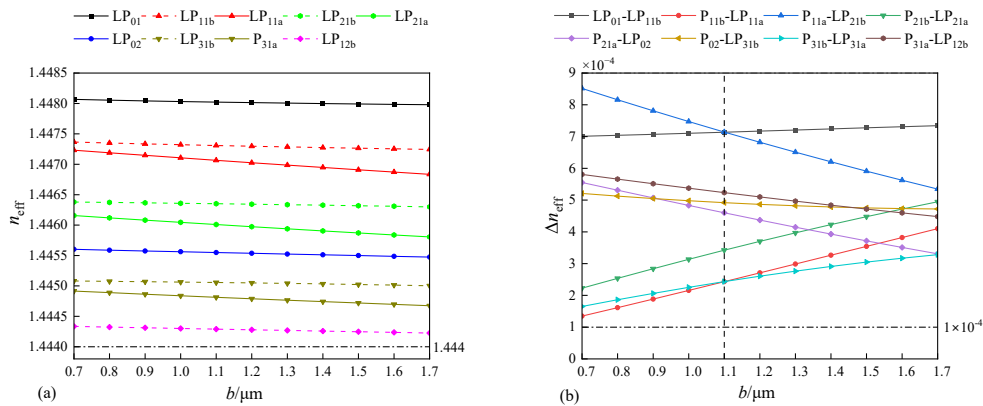


图 6 1550nm 波长处 b 的变化 n_{eff} 和相邻模式 Δn_{eff} 的影响 (a) b 的变化对 n_{eff} 的影响; (b) b 的变化对 Δn_{eff} 的影响

Fig.6. Influence of b variation on n_{eff} and Δn_{eff} between adjacent modes at a wavelength of 1550 nm. (a) influence of b variation on n_{eff} ; (b) influence of b variation on Δn_{eff} .

2.3.3 同心圆低折射率区域半径 r_4

在仅引入偏心椭圆区域的情况下，会导致 LP_{02} 和 LP_{21a} 之间的模式串扰。而同心圆低折射率区域的引入，可以进一步选择性调控 LP_{02} 的 n_{eff} ，通过降低 LP_{02} 的模式 n_{eff} ，增加 LP_{21a} 和 LP_{02} 之间的 Δn_{eff} 。在 1550nm 波长处，设置参数 $a=10.5\mu\text{m}$ ， $ls=4.3\mu\text{m}$ ， $b=1.7\mu\text{m}$ ，对 r_4 进行参数化扫描，讨论 r_4 的变化对 n_{eff} 以及空间模式间 Δn_{eff} 的影响，结果如图 7 所示。

图 7(a)中展示了 9 个空间模式的 n_{eff} 随 r_4 的变化情况，按照折射率从高到低的顺序依次是： LP_{01} 、 LP_{11b} 、 LP_{11a} 、 LP_{21b} 、 LP_{21a} 、 LP_{02} 、 LP_{31b} 、 LP_{31a} 、 LP_{12b} 。随着 r_4 的增加， LP_{02} 的折射率明显下降，这可能是由于 LP_{02} 模式模场分布呈现出“中心亮斑+环形亮区”特性，而同心圆低折射率区域的增大严重影响 LP_{02} 模式的模场分布，使得纤芯对于该模式的束缚能力变小，从而导致该模式 n_{eff} 下降。相比之下， r_4 对 LP_{01} 的 n_{eff} 的影响较小，折射率变化并不明显。同时，其他模式的 n_{eff} 基本不受 r_4 的影响。

图 7(b)图中，在 r_4 处于 0.8-2.6 μm 范围内，最小相邻空间模式的 Δn_{eff} 由 LP_{21a} 和 LP_{02} 的 Δn_{eff} 曲线决定，其始终处于最低水平。随着 r_4 的增加，由于 LP_{02} 的 n_{eff} 显著下降，导致 LP_{21a} 和 LP_{02} 的 Δn_{eff} 不断增大，意味着最小相邻空间模式的 Δn_{eff} 不断增大。在 $r_4=2.6\mu\text{m}$ 时， LP_{21a} 和 LP_{02} 的 Δn_{eff} 与 LP_{31b} 和 LP_{31a} 的 Δn_{eff} 相等，此时最小相邻模式 Δn_{eff} 达到的最大值为 3.28×10^{-4} 。因此同心圆区域的引入，可以通过调控 LP_{02} 的 n_{eff} 显著提高相邻空间模式的分离程度。

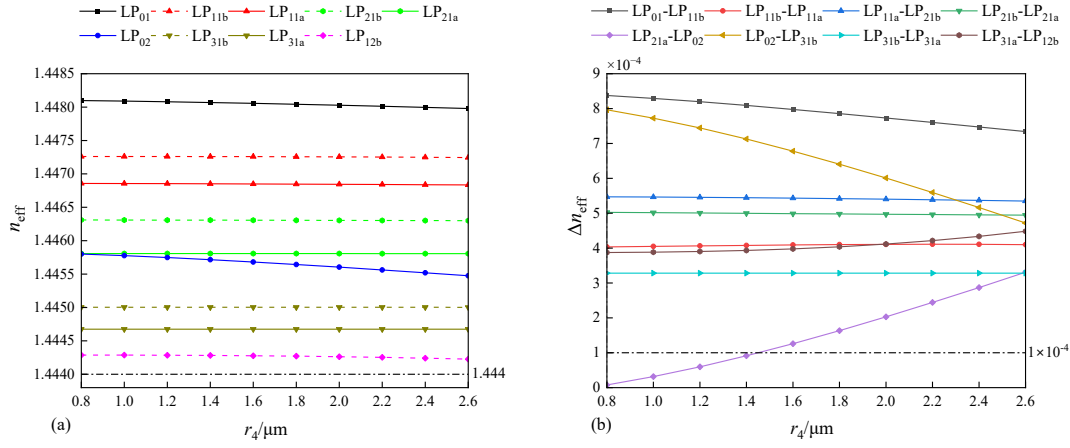


图 7 1550nm 波长处 r_4 的变化对 n_{eff} 和相邻模式 Δn_{eff} 的影响 (a) r_4 的变化对 n_{eff} 的影响; (b) r_4 的变化对 Δn_{eff} 的影响

Fig.7. Influence of r_4 variation on n_{eff} and Δn_{eff} between adjacent modes at a wavelength of 1550 nm. (a) influence of r_4 variation on n_{eff} ; (b) influence of r_4 variation on Δn_{eff} .

2.4 偏振模式的模场分布以及偏振分离特性的分析

表 1 展示了偏振模式在 1550nm 波长处的模场分布，并标明了各偏振模式的

n_{eff}

表 1 EECCRF 的模场分布

Table 1. Mode field distribution of the EECCRF.

空间模式	x 偏振模式模场分布	n_{eff}	y 偏振模式模场分布	n_{eff}
LP ₀₁		1.44797965		1.44797886
LP _{11b}		1.44724523		1.44724568
LP _{11a}		1.44683321		1.44682901
LP _{21b}		1.44630009		1.44629788
LP _{21a}		1.44580472		1.44580304
LP ₀₂		1.44547582		1.44547499
LP _{31b}		1.44500147		1.44499871
LP _{31a}		1.44467444		1.44467418
LP _{12b}		1.44422658		1.44422725

表 S2 展示了空间模式内 x 和 y 偏振模式之间的 Δn_{eff} 数据。在 1550nm 波长处，偏

振模式之间的 Δn_{eff} 始终维持在 10^{-7} - 10^{-6} 量级，相比于空间模式间的 Δn_{eff} 低2-3个量级，所以该结构很好的实现了空间模式简并分离、偏振模式不分离的设计目标。

为观察不同波长下偏振模式之间的简并状态，基于COMSOL得到同一空间模式内偏振模式之间的 Δn_{eff} ，如表S3所示。各空间模式内偏振分离水平均低于 4.37×10^{-6} ，比空间模式之间的 Δn_{eff} 低2-3个量级，反映出同一空间模式偏振模式分离水平较低，而空间模式分离水平较高。新型光纤结构实现了空间简并模式分离而偏振模式不分离，相较于利用偏振模式传输的空分复用系统，这种光纤结构进一步提升了 Δn_{eff} ，减小了光纤传输时的模间串扰，提升了空分复用系统的传输容量，提高了传输效率。

2.5 限制损耗特性分析

限制损耗（Confinement loss, CL）是评估少模光纤对光场束缚能力和传输距离的重要参数。各传输模式的CL可通过模式 n_{eff} 的虚部 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 计算得到^[40]，其表达式为

$$\text{CL} = \frac{40\pi}{\ln(10)\lambda} |\text{Im}(n_{\text{eff}})| \times 10^3 \quad (\text{dB/km}) \quad (1)$$

其中， λ 表示以m为单位的波长。

基于所设计的光纤结构，图 8展示了1530-1610nm范围内空间模式的CL随波长的变化。由于空间模式的模场分布以及束缚程度不同，各模式的CL呈现明显差异。低阶模式（如 LP_{01} ）的模场能量主要集中在纤芯区域，模场向包层扩散程度较小，因此CL较低。伴随着模式阶数升高，模场逐渐向纤芯外围和包层区域扩散，模式的束缚能力相应减弱，因此CL总体上升。由图 8可知，除 LP_{12b} 外的其余8个空间模式在1530-1610nm范围内的CL低于0.503dB/km，说明本文所设计结构对这些空间模式有较好的束缚能力。相比之下，高阶模式 LP_{12b} 的CL明显高于其它模式。这主要是由于该空间模式的模场向纤芯外围及包层区域的扩散程度较大，其

n_{eff} 更接近包层折射率，呈现出较明显的弱束缚特征。

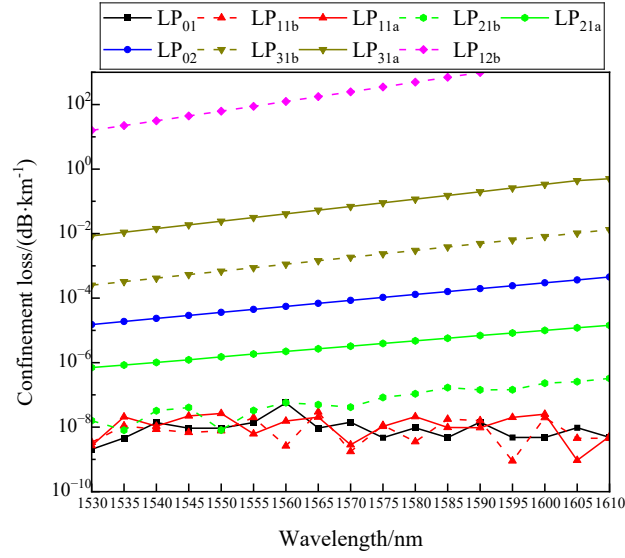


图 8 空间模式的 CL 随波长的变化

Fig.8. CL variation of spatial modes with wavelength.

2.6 模式调控机理分析

综合空间模式的 Δn_{eff} 、偏振分离特性和CL分析结果可知，偏心椭圆低折射率区与同心圆低折射率区通过改变不同模式的 n_{eff} ，共同实现对空间模式分离及偏振模式不分离特性的调控。

偏心椭圆低折射率区改变了光纤横截面的圆对称性， LP_{mn} 模式组中的 $LP_{mn,a}$ 和 $LP_{mn,b}$ 两个空间模式的模场分布方向不同，其与偏心椭圆低折射率区域的重叠程度也不同。因此，两个模式的 n_{eff} 产生不同的变化，使两个空间模式有效分离。相比之下，同心圆低折射率区保持了轴对称性，通过改变空间模式在光纤中心区域的模场分布调节 n_{eff} ，对中心场强较高的模式影响更为显著。因此，调节其半径 r_4 可选择性改变不同空间模式的 n_{eff} ，从而提高最小相邻模式 Δn_{eff} 。

偏心距离 ls 和半短轴 b 决定偏心椭圆低折射率区域的位置、尺寸及其与模场的重叠程度，而半径 r_4 决定同心圆低折射率区的作用范围。 ls 、 b 和 r_4 的优化，可以调控空间模式 n_{eff} 的变化，提高模式间的整体分离水平。而同一空间模式内两个偏振模式具有近似相同的模场分布及区域重叠程度，其差异主要来自非圆对称边界

所产生的较弱几何双折射，因此偏振模式间的 Δn_{eff} 远小于空间模式间的 Δn_{eff} 。该结构由此实现了空间模式简并分离，同时保持偏振模式简并基本不分离。

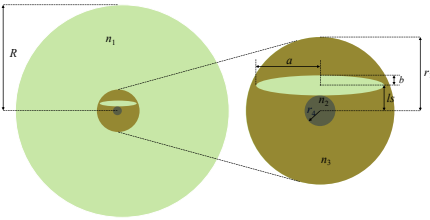
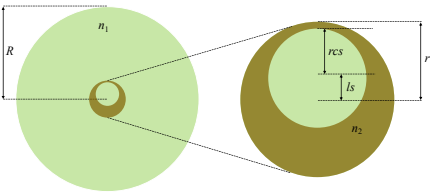
后续的设计优化可在本文所得参数基础上开展多参数优化，以目标工作波段内的最小相邻空间模式间的 Δn_{eff} 为主要评价指标，同时设置约束条件（如最高阶模式的CL），进一步改善高阶模式的束缚能力及宽带模式分离性能。

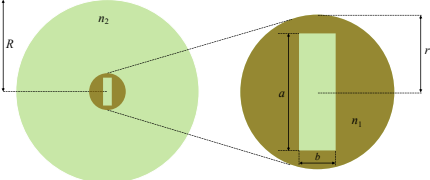
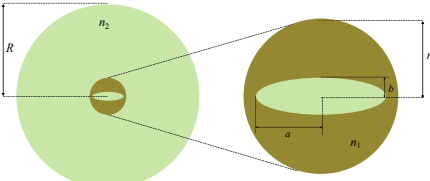
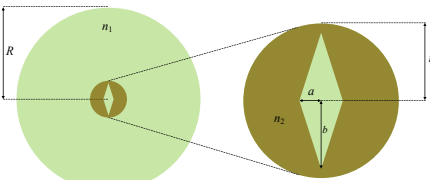
3 不同结构的性能对比

将EECCRF同其他相似类型光纤结构的相关参数进行对比，结果如表 2所示。EECCRF在1530-1610nm范围内支持9个模式的有效传输，其它几种光纤结构普遍在1530-1565nm波长范围内传输，且传输模式的数量也受到一定限制。这几种光纤结构均以实现空间模式简并分离而偏振简并不分离为目标，最小空间模式 Δn_{eff} 从大到小的顺序依次为EECCRF、ERF、ECRF、DRF、RRF。相比之下，所提出的EECCRF结构综合性能最好。

表 2 不同类型光纤结构的性能对比

Table 2. Performance comparison of different fiber structures.

光纤类型/ 纤芯半径 (r)/包层半 径(R)	横截面结构示意图	辅助区域 参数	空间模式间/ 偏振模式间 的 Δn_{eff}	工作波长和支持 的模式
EECCRF/ 12.5/125		$r_4=2.6\mu\text{m}$ $n_2=1.447$ $a=10.5\mu\text{m}$ $b=1.7\mu\text{m}$ $l_s=4.3\mu\text{m}$	$> 3.28 \times 10^{-4}$ $< 4.37 \times 10^{-6}$	(1530-1610nm) LP ₀₁ 、LP _{11b} 、 LP _{11a} 、LP _{21b} 、 LP _{21a} 、LP ₀₂ 、 LP _{31b} 、LP _{31a} 、 LP _{12b}
ECRF ^[39] / 13/125		$r_{cs}=7\mu\text{m}$ $l_s=4.6\mu\text{m}$	$> 2.44 \times 10^{-4}$ $< 2.75 \times 10^{-5}$	(1530-1565nm) LP ₀₁ 、LP _{11b} 、 LP _{11a} 、LP _{21b} 、 LP _{21a} 、LP ₀₂ 、 LP _{31b} 、LP _{31a}

光纤类型/ 纤芯半径 (r)/包层半 径(R)	横截面结构示意图	辅助区域 参数	空间模式间/ 偏振模式间 的 Δn_{eff}	工作波长和支持 的模式
RRF ^[36] / 12.5/125		$a=19\mu\text{m}$ $b=2\mu\text{m}$	$> 2.2 \times 10^{-4}$ $< 2.1 \times 10^{-6}$	(1530-1560nm) LP ₀₁ 、LP _{11b} 、 LP _{11a} 、LP _{21b} 、 LP _{21a} 、LP ₀₂ 、 LP _{31b} 、LP _{31a}
ERF ^[38] / 12.5/125		$a=10.8\mu\text{m}$ $b=1\mu\text{m}$	$> 3.16 \times 10^{-4}$ $< 3.23 \times 10^{-6}$	(1530-1565nm) LP ₀₁ 、LP _{11b} 、 LP _{11a} 、LP _{21b} 、 LP _{21a} 、LP ₀₂ 、 LP _{31b} 、LP _{31a} 、 LP _{12a}
DRF ^[37] / 12.5/125		$a=3.5\mu\text{m}$ $b=11\mu\text{m}$	$> 2.25 \times 10^{-4}$ $< 3.68 \times 10^{-6}$	(1530-1565nm) LP ₀₁ 、LP _{11b} 、 LP _{11a} 、LP _{21b} 、 LP _{21a} 、LP ₀₂ 、 LP _{31b} 、LP _{31a} 、 LP _{12b}

4 制造公差

考虑到光纤的具体应用场景，光纤实际制作的可行性也是评估光纤性能的重要指标。本文提出的EECCRF的包层和纤芯半径尺寸与传统少模光纤相当，纤芯和包层折射率差为0.005，这也是当前商用光纤常用的值。EECCRF结构可利用现有的成熟工艺制作而成，首先采用常规改良化学气相沉积工艺制备传统少模光纤预制棒，然后通过纤芯钻孔形成同心圆和偏心椭圆结构，用纯石英材料和掺锗石英材料分别填充椭圆孔洞和圆形孔洞以获得完整预制产品，最后通过拉丝工艺制成目标光纤。本文所提出EECCRF具有良好的制备可行性。

EECCRF能够保持良好模式特性的关键在于引入了同心圆和偏心椭圆结构。偏心椭圆结构打破光纤结构的对称性，将空间模式进行分离；同心圆结构有效调控高阶模式 n_{eff} ，进一步提升空间模式分离水平，但是这些新颖结构的引入给制备

工艺带来了一定的挑战。因此，深入讨论光纤制备造成的误差影响至关重要。

根据EECCRF的结构特性，在光纤制备过程中需要使同心圆结构与纤芯和包层的中心重合。由于制造误差，同心圆中心点可能会偏离纤芯和包层的中心。本文计算了同心圆和偏心椭圆在 x 轴和 y 轴方向上偏离中心时对各模式的 n_{eff} 造成的影响，结果如图9所示。当前市场上光纤制造商对纤芯-包层同心度要求比较高，因此考虑在 $0.4\mu\text{m}$ 范围内探讨偏移量对光纤模式特性的影响。当偏移量 dx 和 dy 处于 $0.4\mu\text{m}$ 范围内时，EECCRF传输的空间模式基本不受影响。 $\text{LP}_{mn,a}$ 和 $\text{LP}_{mn,b}$ 仍然保持简并分离状态，相邻模式之间的 Δn_{eff} 仍然大于 10^{-4} ，保持较好的分离水平。偏心椭圆和同心圆结构在 x 轴和 y 轴方向上发生偏移使 n_{eff} 的变化率不超过 0.0005% 和 0.005% 。上述结果表明，当同心圆和偏心椭圆偏离中心时，EECCRF具有较好的工艺容差，可降低加工难度。

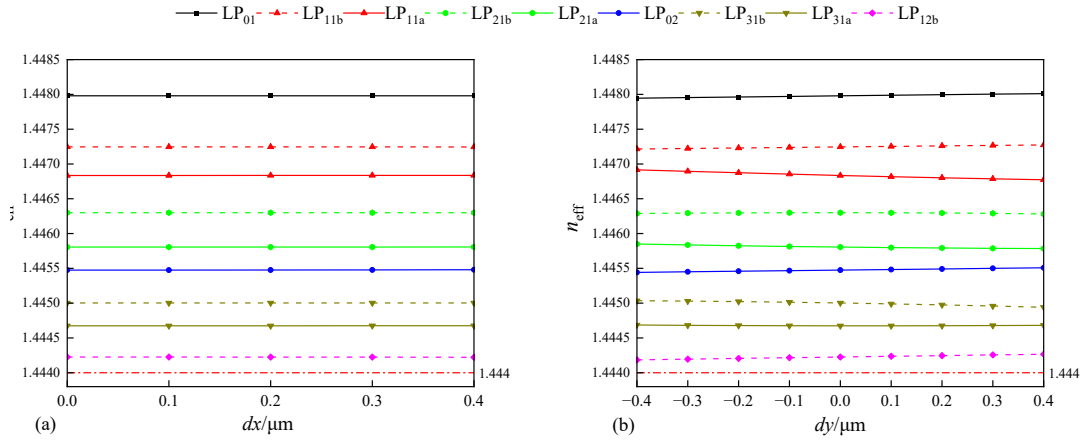


图 9 不同偏移量对 n_{eff} 的影响 (a) x 方向; (b) y 方向

Fig.9. Effect of different displacements on n_{eff} (a) x -direction; (b) y -direction.

5 结论

本文提出了一种用于空分复用技术的偏心椭圆-同心圆双低折射率区辅助的环芯少模光纤结构 (EECCRF)。该结构在纤芯内部引入低折射率偏心椭圆区域实现了空间简并模式的有效分离，而低折射率同心圆区域的引入能够有效调控高阶模式折射率，进一步提高了空间模式的分离水平。EECCRF 在 1530-1610nm 范围

内支持 9 个模式的有效传输，相邻空间模式之间的 Δn_{eff} 始终位于 $(3.16-7.84)\times 10^{-4}$ 范围内。除最高阶模式外，其余 8 个空间模式的限制损耗均低于 0.503dB/km。该结构在 1550nm 处相邻空间模式之间的 Δn_{eff} 均大于 3.28×10^{-4} ，模式的偏振分离水平低于 4.20×10^{-6} ，相比于空间模式分离水平低 2-3 个数量级。这种光纤结构实现了空间模式简并分离同时偏振模式不分离的目标，其综合性能优于已有的环芯少模光纤，很大程度降低了模式之间的串扰，为通信系统的容量提升提供了新的选择。同时，无需为每个空间模式配置偏振分集接收，可以沿用传统的单模光纤相干接收方案，能够在一定程度上降低系统复杂度和成本。因此，本文设计的 EECCRF 在芯片间/板间的光互连、非互易器件和高灵敏度光纤传感等短距离大容量光互连场景中具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] [Anitha P, Vimala H S, Shreyas J 2024 *J. Netw. Comput. Appl.* **221** 103749](#)
- [2] Liu X M, Lun H Z, Fu M F, Fan Y Y, Yi L L, Hu W S, Zhuge Q B 2020 *Appl. Sci.* **10** 363
- [3] Sharma S, Popli R, Singh S, Chhabra G, Saini G S, Singh M, Sandhu A, Sharma A, Kumar R 2024 *Sustainability* **16** 7039
- [4] [Yue W C, Cai Y, Yu M B 2023 *Photonics* **10** 564](#)
- [5] van Uden R G H, Amezcua-Correa R, Antonio-Lopez E, Huijskens F M, Xia C, Li G, Schulzgen A, de Waardt H, Koonen A M J, Okonkwo C M 2014 *Nat. Photon.* **8** 865
- [6] Savović S, Aidinis K, Chen C, Min R 2024 *Optik* **311** 171945
- [7] Kingsta R M, Selvakumari R S 2019 *Optik* **199** 163341
- [8] [Li Z H, Li S G, Li J S, Wang L Y, Wang X K, Wang Y, Gong L, Cheng T L 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 104208 \(in Chinese\) \[李增辉, 李曙光, 李建设, 王璐瑶, 王](#)

- [9] Xavier G B, Lima G 2020 *Commun. Phys.* **3** 9
- [10] Tu J J, Li Z H 2021 *Acta Opt. Sin.* **41** 0106003 (in Chinese) [涂佳静, 李朝晖 2021 光学学报 **41** 0106003]
- [11] Gu H, Wang J, Chang Z Y, Li K, Han X C, Liu B 2025 *Photonics* **12** 1063
- [12] Ye H Q, Tu J J, Gao S C, Shen L, Luo J, Pan J S, Li Z H 2025 *Opt. Laser Technol.* **192** 114018
- [13] Du Z Y, Wang C C, Li P X, Pei L, Zheng J J, Ning T G 2022 *Optik* **255** 168710
- [14] Ma L L, Li S G, Li J S, Meng X J, Li Z H, Wang L Y, Shao P S 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 104206 (in Chinese) [马丽伶, 李曙光, 李建设, 孟潇剑, 李增辉, 王璐瑶, 邵朋帅 2022 物理学报 **71** 104206]
- [15] Khalil Y, Jauregui C, Klenke A, Bahri M, Nold J, Haarlammert N, Schreiber T, Limpert J 2026 *Opt. Express* **34** 2478
- [16] Zhang M, Li N Z, Jia J S, Xiao F, Jiao K, Wang X G, Bai S C, Zhao Z M, Zhang P Q, Dai S X, Nie Q H, Shen X, Wang R P, Wang X S 2023 *Opt. Express* **31** 43342
- [17] Zhang Y, Jiang W F, Chen M Y 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 094205 (in Chinese) [张媛, 姜文帆, 陈明阳 2022 物理学报 **71** 094205]
- [18] Wang Y, Han Y, Li Z H, Gong L, Wang L Y, Li S G 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 024205 (in Chinese) [王彦, 韩颖, 李增辉, 龚琳, 王璐瑶, 李曙光 2022 物理学报 **71** 024205]
- [19] Jin S C, Shen X 2024 *Optik* **297** 171560
- [20] Rademacher G, Puttnam B J, Luís R S, Eriksson T A, Fontaine N K, Mazur M, Chen H, Ryf R, Neilson D T, Sillard P, Achten F, Awaji Y, Furukawa H 2021 *Nat. Commun.* **12** 4238
- [21] Gatto A, Parolari P, Luís R S, Rademacher G, Puttnam B J, Emmerich R, Schubert

- C, Ferri G, Achten F, Sillard P, Martelli P, Di Sciullo G, Marotta A, Mecozzi A, Antonelli C, Boffi P 2024 *J. Lightwave Technol.* **42** 4720
- [22] Inan B, Spinnler B, Ferreira F, van den Borne D, Lobato A, Adhikari S, Sleiffer V A J M, Kushnerov M, Hanik N, Jansen S L 2012 *Opt. Express* **20** 10859
- [23] Yang T X, Zhang H, Xi L X, Li Q K, Zhang X G, Wang X Q, Zhang W B, Tang X F 2022 *Opt. Commun.* **507** 127647
- [24] Ci Y, Ren F, Lei X, Li Y, Zhou D, Wang J 2023 *Appl. Sci.* **13** 5855
- [25] Wang S B, Zhang X, Ma G L, Zhu D Y 2023 *Chin. Phys. B* **32** 030506
- [26] Xiao H, Li H S, Jian S S 2018 *Opt. Laser Technol.* **107** 162
- [27] Zhang J, Chen Y K, Wu Z C, Feng S J, Shum P, Huang T Y 2022 *Opt. Fiber Technol.* **73** 103067
- [28] [Napiórkowski M, Kasztelanic R, Buczyński R 2024 *Eng. Appl. Artif. Intell.* **133** 107955](#)
- [29] [Guo C, Shamshooli A, Parmigiani F, Li X, Vasilyev M 2025 *Photonics* **12** 233](#)
- [30] [Dana Y, Garcia Y, Kukin A, Marom D M 2025 *Photon. Res.* **13** 2088](#)
- [31] [Corsi A, Chang J H, Rusch L A, LaRochelle S 2019 *IEEE Photonics J.* **11** 7202010](#)
- [32] [Corsi A, Chang J H, Wang R H, Wang L X, Rusch L A, LaRochelle S 2020 *Opt. Lett.* **45** 2822](#)
- [33] [Chen X, Ko J, Hurley J E, Stone J S, Lee J H, Kim B Y, Li M J 2023 *2023 Opto-Electronics and Communications Conference \(OECC\)* Shanghai, China, July 2–6, 2023 p26](#)
- [34] [Gougeon S, Ung B, LaRochelle S 2025 *J. Lightwave Technol.* **43** 10302](#)
- [35] Xiao H, Li H S, Wu B L, Dong Y, Xiao S Y, Jian S S 2019 *Opt. Fiber Technol.* **48**
- [36] Zheng J J, Song Y J, Pei L, Tian Z C, Xu W X, Ning T G, Li J, Wang J S, Bai B

- 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 1606006 (in Chinese) [郑晶晶, 宋豫婧, 裴丽, 田梓辰, 徐文轩, 宁提纲, 李晶, 王建帅, 白冰 2022 光学学报 **42** 1606006]
- [37] Song Y J, Zheng J J, Pei L, Huang J, Ning T G, Li J, Wang J S, Bai B 2022 *Photonics* **9** 766
- [38] Song Y J, Zheng J J, Pei L, Huang J, Wang J S, Ning T G, Li J, Bai B 2022 *Opt. Fiber Technol.* **72** 102984
- [39] Ye X, Ning T G, Pei L, Shen L, Zheng J J, Li J, Bai B, Wu G, Zhang S Y 2025 *J. Opt. Soc. Am. B* **42** 60
- [40] [Zong L X, Cheng J Y, Xiao Y Y 2025 *Photonics* **12** 1018](#)

Eccentric elliptical and concentric circle dual low-refractive index region assisted ring-core few-mode fiber*

Shiji Sun ³⁾ Jianjian Wang ^{1) 2) 3)†}

1) (Yanzhao Electric Power Laboratory, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

2) (Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

3) (Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract

Few-mode fibers, capable of transmitting a limited number of modes, have been successfully applied in spatial division multiplexing in optical fiber communication systems. The effective separation of modes in few-mode fibers can usually be measured by the mode effective refractive index difference. To achieve effective mode separation, an eccentric elliptical and concentric circle dual low-refractive index region assisted ring-core few-mode fiber structure is proposed in this paper. The proposed fiber effectively eliminates the spatial degeneracy of the LP_{mn} mode group. The effects of the dimensions and position of the eccentric elliptical low-refractive index region, as well as the size of the concentric circular low-refractive index region, on the effective refractive index differences between adjacent spatial modes were systematically investigated. The underlying mode-control mechanism was elucidated, and the wavelength-dependent characteristics, confinement losses, and fabrication

tolerances of the supported spatial modes were analyzed.

The results show that the fiber exhibits the best overall performance when $l_s=4.3\mu\text{m}$, $b=1.7\mu\text{m}$, and $r_4=2.6\mu\text{m}$. Over the wavelength range of 1530-1610 nm, the proposed fiber supports nine guided spatial modes. The effective refractive index differences between adjacent spatial modes remain above 3.16×10^{-4} , reaching a maximum of 7.84×10^{-4} . Except for the highest-order mode, the confinement losses of the other eight modes remain below 0.503 dB/km. At a wavelength of 1550 nm, the effective refractive index differences between adjacent spatial modes exceed 3.28×10^{-4} , with a maximum value of 7.33×10^{-4} . Except for the highest-order mode, the confinement losses of the other eight spatial modes are all lower than 0.0242 dB/km. Throughout the target wavelength band, the effective refractive index differences between the orthogonal polarization states of each spatial mode remain on the order of 10^{-7} - 10^{-6} , indicating negligible polarization mode splitting. The proposed fiber therefore lifts the degeneracy among spatial modes while largely preserving polarization degeneracy. This fiber structure broadens the available transmission bandwidth, effectively suppresses intermodal crosstalk, and improves the utilization efficiency of the supported modes, thereby providing a promising alternative for increasing the transmission capacity of space-division-multiplexed communication systems. Especially in short distance and high-capacity optical interconnect scenarios, it can better leverage its advantage of effectively separating spatial modes without separating polarization modes.

Keywords: few-mode fiber, space division multiplexing, mode effective refractive index difference, degenerate mode

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62205105), and the Science and Technology (S&T) Program of Hebei (Grant No. SZX2020034).

† Jianjian Wang. E-mail: ncepuwangjj@163.com
Shiji Sun. E-mail: gdxxncepu@163.com

摘要图如下:

