引用本文：王良垒，蒲俊宇，蒋萍，等. 高低折射率双环与空气槽辅助的低串扰少模多芯光纤[J]. 光通信技术，2026，50(5)：80-86.

高低折射率双环与空气槽辅助的低串扰少模多芯光纤

王良垒，蒲俊宇，蒋 萍，钟宇豪，刘 凯，赵 创，李虹潤，余先伦*
（重庆三峡科技大学 电子与信息工程学院，重庆 404020）

摘要：针对未来大容量光通信系统对空分复用的协同需求，设计了一种高低折射率双环与空气槽辅助的低串扰少模多芯光纤，纤芯内部嵌入高折射率环增强模式分离，外部引入低折射率环和空气槽辅助抑制芯间串扰，并采用功率耦合理论与有限元仿真分析传输性能。仿真结果表明：光纤在C+L波段可稳定传输5个线偏振(LP)模式，相邻模式有效折射率差大于1.9×10^{-3}；在1.55 μm波长、100 km传输距离下，最大芯间串扰低至-68.14 dB/100 km；5个LP模式有效模场面积均大于85 μm²，弯曲半径大于40 mm时弯曲损耗仅为3×10^{-6} dB/m。

关键词：空分复用；少模光纤；多芯光纤；低串扰
中图分类号：TN929.11　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-5561(2026)05-0080-07
DOI：10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.05.013

High-low refractive index dual-ring and air-trench assisted low-crosstalk few-mode multicore fiber

WANG Lianglei，PU Junyu，JIANG Ping，ZHONG Yuhao，LIU Kai，ZHAO Chuang，LI Hongrun，YU Xianlun*
（School of Electronics and Information Engineering，Chongqing Sanxia University of Science and Technology，Chongqing 404020，China）

Abstract：To address the synergistic requirements of space-division multiplexing for future high capacity optical communication systems，a high-low refractive index dual-ring and air-trench assisted low-crosstalk few-mode multicore fiber is designed. High-refractive-index rings are embedded within the cores to enhance mode separation，while low-refractive-index rings and air trenches are introduced externally to suppress inter-core crosstalk. The transmission performance is analyzed using power coupling theory and finite element simulations. Simulation results demonstrate that the fiber can stably support five linearly polarized(LP) modes in the C+L band，with an effective refractive index difference between adjacent modes greater than 1.9×10^{-3}. At a wavelength of 1.55 μm and a transmission distance of 100 km，the maximum inter-core crosstalk is as low as -68.14 dB/100 km. The effective mode field areas of the five LP modes are all larger than 85 μm²，and the bending loss is only 3×10^{-6} dB/m when the bending radius exceeds 40 mm.

Key words：space-division multiplexing，few-mode fiber，multi-core fiber，low crosstalk

0 引言

随着大数据、云计算及宽带业务的蓬勃发展，全球数据传输需求呈指数级增长。传统单模光纤的传输容量已逼近香农极限，难以满足未来高速、大容量通信系统的演进需求[1]。为突破这一瓶颈，基于空分复用(SDM)技术的少模光纤(FMF)和多芯光纤(MCF)成为研究热点，旨在通过增加空间维度信道数来提升系统总容量[2-3]。其中，FMF通过在单个纤芯中支持多个模式传输来倍增容量，而MCF则利用包层内集成的多个独立纤芯扩展空间通道。然而，这2种技术均面临由模式耦合或芯间耦合引发的串扰问题，严重限制了传输性能[4-7]。

当前研究主要致力于通过结构设计抑制串扰：在FMF中，通常通过增大相邻模式间的有效折射率差来降低模间串扰；在MCF中，则广泛采用沟槽辅助[8]、空气孔辅助[9]及异质纤芯[10]等结构以抑制芯间串扰。近

收稿日期：2025-06-23。
基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFB3901405)资助；国家自然科学基金项目(U2030116)资助；重庆市重点实验室项目(YB2020C0301)资助。

作者简介：王良垒(2002—)，男，硕士研究生，现就读于重庆三峡科技大学电子与信息工程学院物理电子学专业，主要研究方向为光纤通信、光电子学与传感。
***通信作者：**余先伦(1967—)，男，硕士，教授，主要从事光纤通信、激光技术和光子晶体光纤方向的研究工作。



年来，相关研究取得了显著进展：2012年，日本古河电气公司[11]首次研制出传输距离分别达500 km和10 km的7芯及19芯双模光纤。2015年，Sasaki Y等人[12]结合异质纤芯与沟槽辅助技术，实现了芯间串扰低至−55 dB/100 km的12芯三模光纤。2018年，Kumar D等人[13]提出三角形排列的12芯五模同质光纤，虽将芯间串扰降至−138 dB/100 km，但其200 μm的大包层直径增加了制备难度。2020年，Xie Yuheng等人[14]设计了空气沟槽辅助的12芯四模光纤，利用异质纤芯渐变折射率分布使串扰小于−66 dB/km。2022年，Shao Pengshuai等人[15]采用高折射率环与沟槽辅助结构，制备出芯间串扰低于−50 dB/km的7芯五模光纤。2024年，Li Zenghui等人[16]提出气孔阵列与沟槽辅助的异质6芯双模光纤，串扰低于−38 dB/100 km。2025年，沈骁等人[17]通过引入应力棒、空气孔阵列及沟槽结构，实现了芯间串扰低于−30 dB/100 km的9芯四模异质光纤。尽管上述设计在降低串扰方面取得了一定成果，但仍难以在保持高模式数的同时，兼顾长波段内的低串扰特性与优异的抗弯性能，传统技术方案在应对高阶模式低串扰需求时存在局限。

为此，本文提出一种高低折射率双环与空气槽辅助的低串扰少模多芯光纤，并采用全矢量有限元法对其传输特性进行数值模拟与分析，旨在为下一代超大容量光通信系统提供新型光纤设计方案。

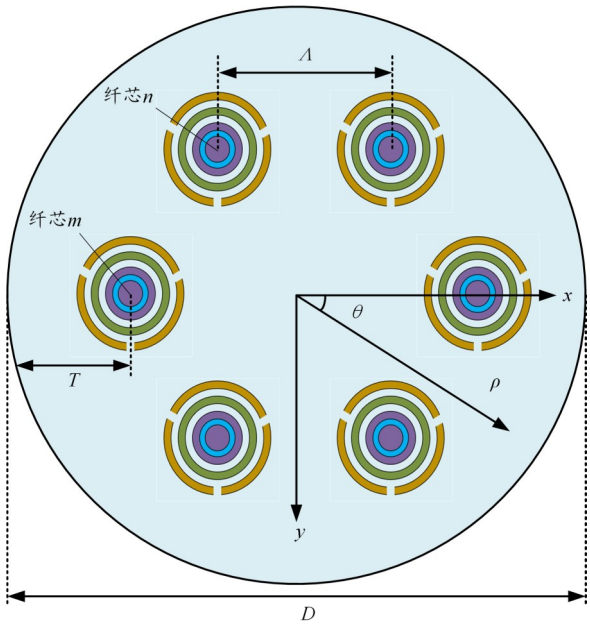
1 少模多芯光纤结构设计与原理

1.1 结构设计

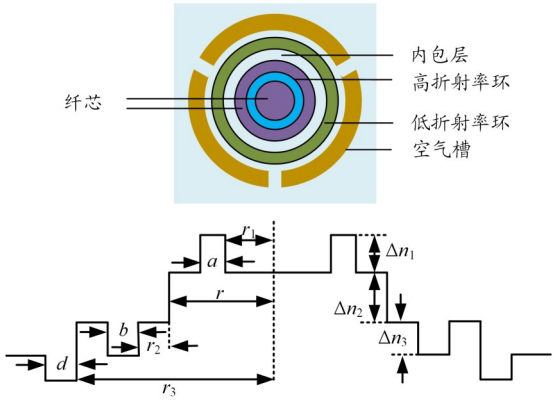
本文所提光纤基于SDM技术，采用阶跃型折射率分布，其结构如图1所示。光纤包层材料为纯二氧化硅，纤芯区为掺锗二氧化硅，纤芯外围的低折射率环由掺氟二氧化硅构成。为抑制模间耦合[18]，在纤芯内部LP_{02}模功率较弱处引入高折射率环，增大LP_{21}与LP_{02}模式间的有效折射率差；高折射率环外侧保留内包层以平衡基模束缚；外包低折射率环用于抑制相邻纤芯间的光场重叠[19]；最外层环形空气槽进一步隔离光场泄露，优化小弯曲半径下的抗弯性能。

图1(a)为少模多芯光纤横截面示意图。可以看出，图中6个纤芯沿正六边形顶点等距布置于纯二氧化硅包层中。D为光纤直径，Λ为相邻纤芯之间的间距，T为纤芯中心到包层外圆周的距离，θ为弯曲方向的角度，ρ为参考点位移。

图1(b)为单个纤芯结构及折射率分布，其中，纤芯区半径为r，高折射率环位于纤芯内部，半径为r_1，宽度为a，折射率为$n_{high-ring}$；内包层宽度为r_2；低折射率环宽度为b，折射率为$n_{low-ring}$；空气槽半径为r_3，宽度为d，间距为1 μm；Δn_1为纤芯高折射率环与纤芯折射率差，Δn_2为纤芯与包层的折射率差，Δn_3为低折射率沟槽与包层的折射率差。x、y分别为光纤横截面的2个相互正交的空间坐标。



(a) 少模多芯光纤横截面示意图



(b) 单个纤芯结构及折射率分布

图1 少模多芯光纤结构图

1.2 少模多芯光纤基本原理

模式耦合理论和功率耦合理论被广泛用于MCF芯间串扰计算。由于功率耦合理论能简化随机扰动下的计算复杂度，本文采用该方法评估相邻纤芯串扰。功率耦合方程为

$$\frac{dP_m}{dz}=\sum_{m\neq n}h_{mn}(z)[P_n(z)-P_m(z)] \tag{1}$$

式中：P_m、P_n分别为纤芯m和n的平均功率，z为传输方向，h_{mn}为功率耦合系数，其表达式为

$$h_{mn} = \frac{2k_{mn}^2 R}{\beta_m \Lambda} \tag{2}$$

式中：k_{mn}为模式耦合系数，R为光纤弯曲半径，β_m为纤芯m的模式传播常数。在相位匹配条件下，相邻纤芯之间的芯间串扰X_t由h_{mn}和传输距离L共同决定[20]，可表示为

$$X_t = \tanh(h_{mn} L) \tag{3}$$

有效模场面积A_{eff}反映了光场能量的集中程度，是衡量少模多芯光纤非线性性能的重要参数[21]，其定义为

$$A_{eff} = \frac{\left[\iint |E|^2 \mathrm{d}x\mathrm{d}y\right]^2}{\iint |E|^4 \mathrm{d}x\mathrm{d}y} \tag{4}$$

式中：E表示模式电场强度分布。

光纤在使用过程中会发生弯曲，导模部分辐射到包层，产生附加损耗。当光纤沿x轴弯曲时，光纤横截面的等效折射率分布为

$$n_{eq} = n\sqrt{1 + \frac{2x}{R_b}} \tag{5}$$

式中：n_{eq}为光纤弯曲后的等效折射率，n为光纤原始折射率，R_b为等效弯曲半径，R_b约为光纤实际弯曲半径R的1.28倍[22]。

当光纤发生弯曲时，由于等效折射率分布发生变化，导致部分光场泄露到包层，从而产生弯曲损耗。弯曲损耗B是衡量模式传输性能的重要指标[23]，其表达式为

$$B = -\frac{20}{\ln(10)} \times \frac{2\pi}{\lambda} \mathrm{Im}(n_{eff}) \tag{6}$$

式中：λ为光纤的工作波长，$\mathrm{Im}(n_{eff})$为波导中模式有效折射率n_{eff}的虚部。

2 少模多芯光纤传输性能仿真分析

2.1 仿真模型与参数设计

本文基于COMSOL Multiphysics软件中的有限元法对光纤传输特性进行建模仿真。纤芯与包层区域采用自由三角形网格剖分，完美匹配层（PML）内施加映射网格，外侧设置散射边界条件；通过全局参数扫描设定结构变量，并利用派生值功能提取有效模场面积、芯间串扰及弯曲损耗等关键性能指标。仿真基准条件设定为：R=80 mm、λ=1.55 μm、Δn_3=−0.7%。

在参数优化设计中，重点权衡芯间串扰、有效模场面积与弯曲损耗三者的制约关系。对于少模多芯光纤，增大纤芯半径虽可扩展有效模场面积，但会加剧相邻纤芯间的模式耦合串扰；纤芯区高折射率环的宽度与折射率值需协同优化，以平衡模场约束与串扰抑制效果；低折射率沟槽与空气槽辅助结构虽可降低芯间串扰，但仍需综合考量其折射率调控效能与工艺可实现性。基于上述原则，光纤初始结构参数如表1所示。

表1 光纤初始结构参数

参数	值	参数	值	参数	值
r_1/μm	3	r_3/μm	13	Δn_3/%	−0.7
a/μm	1.8	d/μm	2	Λ/μm	42
r/μm	7.2	Δn_1/%	0.2	D/μm	150
b/μm	2	Δn_2/%	0.88	T/μm	33

基于表1所列结构参数，为确保光纤稳定支持5个导模传输，需通过归一化频率V进行调控，使其满足5.1＜V＜5.5。采用有限元分析软件对少模多芯光纤进行本征模式分析，得到纤芯支持的5种LP模式模场分布如图2所示。可以看出，5种LP模式的光场均主要集中于纤芯区域，表明其具有良好的模式约束特性。

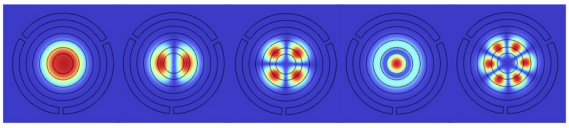


图2 光纤5个LP模式模场分布图

2.2 结构参数优化分析

本文首先通过对光纤结构参数展开研究，在COMSOL Multiphysics中根据光纤线轴将光纤弯曲半径R设为80 mm，结合当前制造工艺将低折射率环与包层的相对折射率差取−0.7%[24]，得到光纤有效折射率差Δn_{eff}与高折射率环宽a的关系如图3所示。相邻纤芯之间串扰X_t与高折射率环宽a的关系如图4所示。

由图3可知，LP_{21}与LP_{02}模式的有效折射率最为接近，两者（LP_{21-02}）有效折射率差Δn_{eff}随高折射率环宽a值增大而递增，可有效抑制模间串扰。结合图4分析，最高阶模式的芯间串扰随a值增大而降低，a≥1.8 μm后趋于饱和，综合权衡模式分离度与串扰抑制效果，本文最终选取a=1.8 μm作为高折射率环宽度，此时，LP_{21-02}的有效折射率差Δn_{eff}为1.9×10^{-3}，芯间串扰低于−50 dB/100 km，满足长距离、低串扰传输要求。

高折射率环可增强模场束缚能力，低折射率环则能有效抑制相邻纤芯间的耦合。在波长λ为1.55 μm

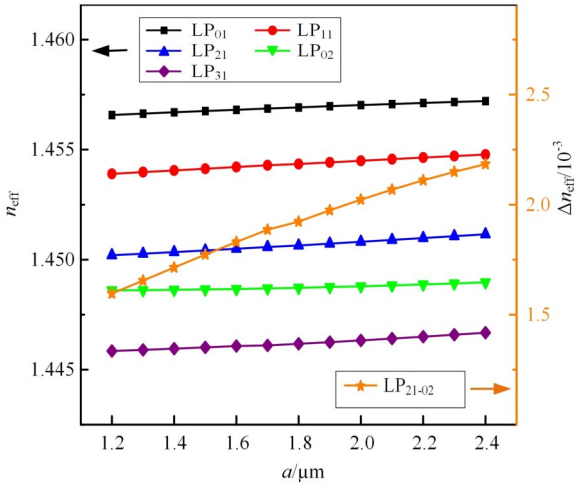


图3 光纤有效折射率差 Δn_{eff} 与高折射率环宽 a 的变化关系

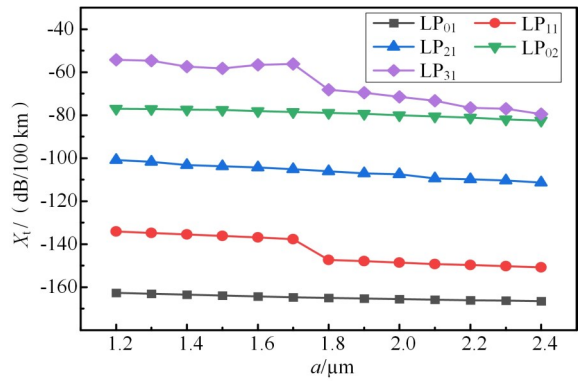


图4 芯间串扰 X_t 与高折射率环宽 a 的变化关系

时，基于式(3)仿真得到芯间串扰 X_t 随高折射率环与纤芯折射率差 Δn_1 的变化关系如图5所示，不同LP模式的芯间串扰 X_t 随低折射率环宽 b 的变化关系如图6所示。

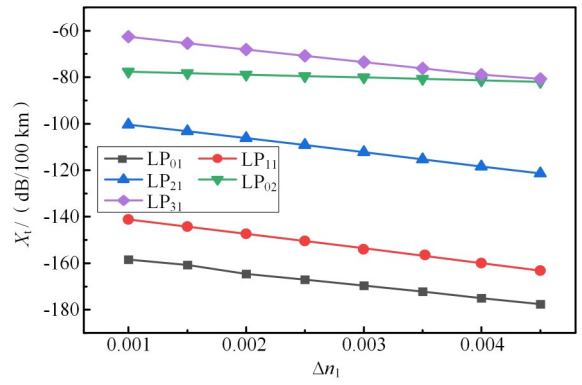


图5 芯间串扰 X_t 随高折射率环与纤芯折射率差 Δn_1 的变化关系

由图5可知，所有LP模式的芯间串扰均随高折射率环与纤芯折射率差 Δn_1 的增大而减小。由图6可知，随着低折射率环宽 b 的增大，串扰曲线逐渐下滑最后在2 μm左右趋于平缓，综合制造可行性与串扰抑制

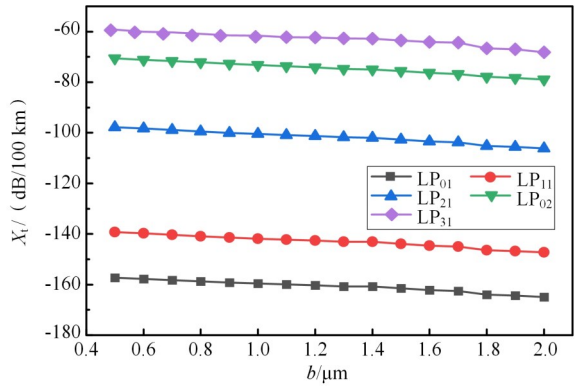


图6 芯间串扰 X_t 与低折射率环宽 b 的变化关系

需求，本文最终选取 b=2 μm。

在工作波长 λ 为1.55 μm、R 为80 mm的条件下，基于式(2)和式(3)仿真得到芯间串扰 X_t 与芯间距 Λ 之间的变化关系如图7所示。

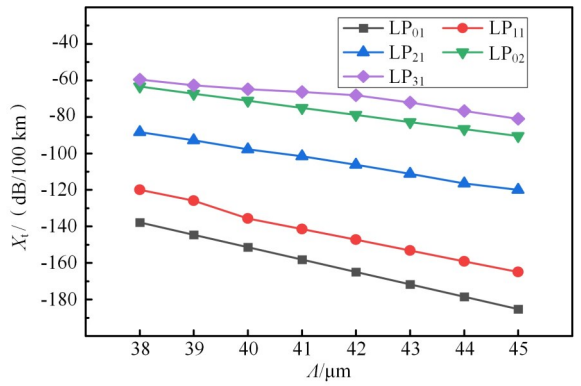


图7 芯间串扰 X_t 与芯间距 Λ 的变化关系

由图7可知，所有LP模式的芯间串扰 X_t 均随芯间距 Λ 增大而减小，当 Λ 为42 μm时，最高阶模式 LP_{31} 的芯间串扰 X_t 为−68.14 dB/100 km。鉴于日本已申请将42 μm作为少模多芯光纤的标准芯间距，本文选取该值作为相邻纤芯间距，以兼顾低串扰性能与工艺标准化需求。

2.3 抗弯曲性能分析

在实际部署中，光纤的弯曲是限制远距离传输性能的关键因素之一，光纤弯曲不仅会引入额外的传输损耗与模式畸变，还会改变模场的分布和泄露路径，进而影响相邻纤芯间的耦合强度。引入空气槽可增大折射率对比度与模场失配，从而显著抑制芯间串扰。芯间串扰 X_t 与弯曲半径 R 的关系如图8所示，与空气槽宽度 d 的关系如图9所示。

由图8可以看出，芯间串扰 X_t 随着弯曲半径 R 增大而略有上升，当 R>180 mm后，串扰变化幅度减

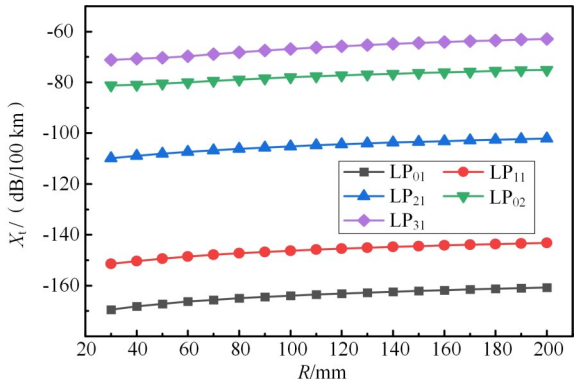


图8 芯间串扰X_t与弯曲半径R的变化曲线关系

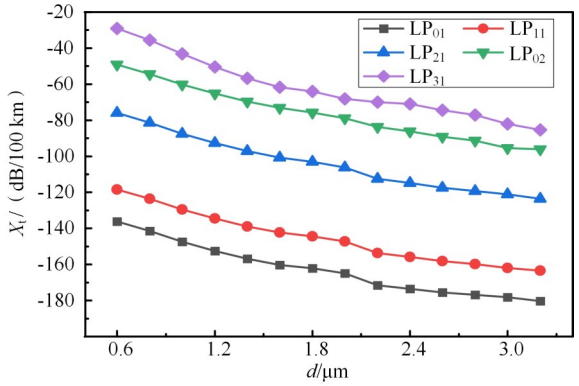


图9 芯间串扰X_t与空气槽宽度d的变化关系

小（<1 dB/100 km），表明该光纤在大弯曲半径下对弯曲不敏感。结合图9分析，所有LP模式芯间串扰X_t均随空气槽宽度d的增大而降低；当d≥2 μm时，最高阶模式LP_{31}的串扰的下降幅度变小，进入饱和区。综合权衡串扰抑制效益与工艺可实现性，本文最终选取空气槽宽度d为2 μm作为光纤参数。

除上述结构参数外，工作波长同样会影响纤芯模场尺寸，进而改变芯间串扰特性。光纤所支持的所有LP模式在C+L波段的芯间串扰变化趋势如图10所示，可以看出，所有LP模式的芯间串扰均随工作波长增大而升高；当波长为1.63 μm时，最高阶模式LP_{31}的串扰

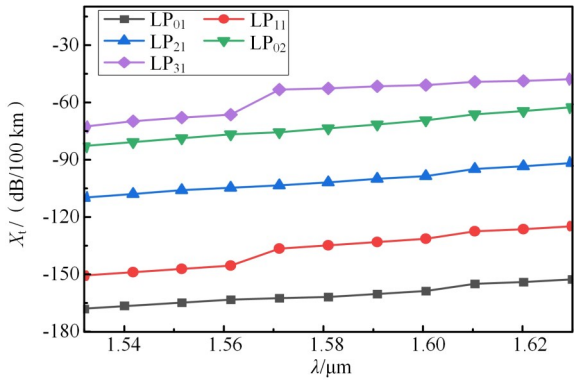


图10 芯间串扰X_t在C+L波段的变化关系

为−47 dB/100 km，表明该光纤在C+L波段（1.53~1.625 μm）内仍可实现低串扰宽带传输。

2.4 模场面积与弯曲损耗特性

在少模多芯光纤中，较大的有效模场面积A_{eff}有助于抑制自相位调制和交叉相位调制等非线性效应，提升高功率密度传输下的稳定性与抗干扰能力。为了研究高折射率环对模场分布的调控作用，本文基于式(4)计算得到A_{eff}与a的变化关系，具体如图11所示，A_{eff}与λ的变化关系如图12所示。

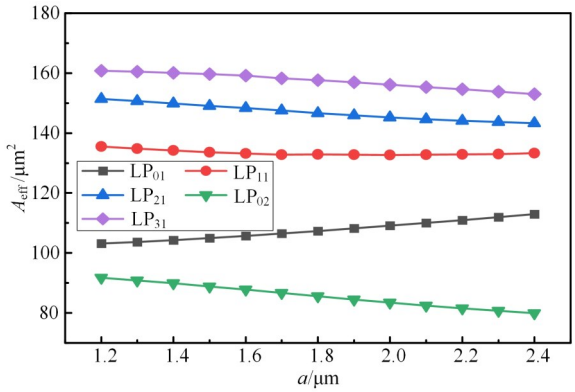


图11 A_{eff}与高折射率环宽a的变化关系

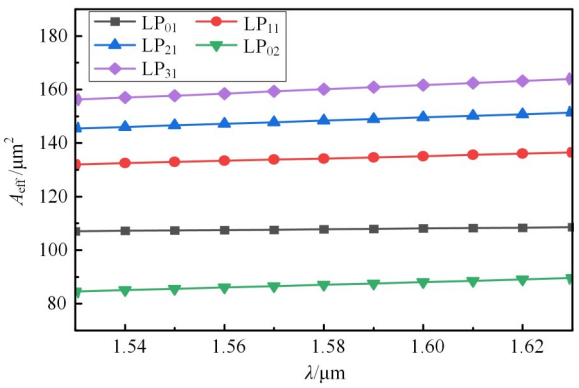
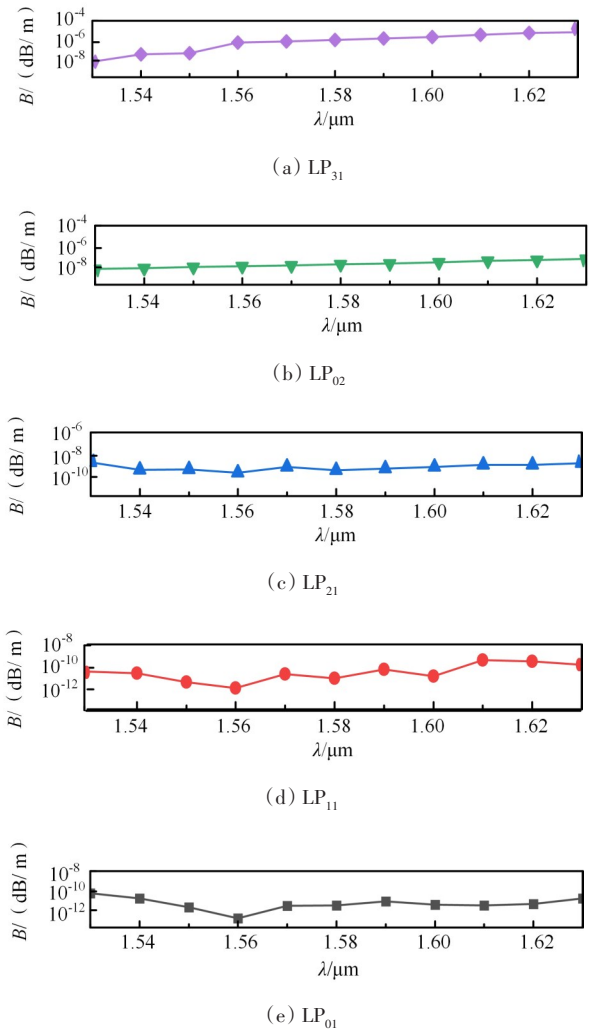


图12 A_{eff}与波长λ的变化关系

由图11可知，随着高折射率环宽a的增大，LP_{02}模式的A_{eff}随之减小，从91.73 μm^{2}降至79.9 μm^2。这是由于增大高折射率环宽度a扩大了纤芯外周的折射率梯度，导致高阶模能量向纤芯中心收缩。当a为1.8 μm时，LP_{02}模式的A_{eff}最小且为85 μm^2。结合图12分析，随着工作波长增大，所有模式的模场能量趋于扩散，导致A_{eff}逐渐上升；在C+L波段，所有LP模式的A_{eff}均大于85 μm^2。以上结果表明，该光纤结构在有效抑制非线性效应的同时，能够保障稳定的宽带通信。

弯曲损耗是衡量光纤传输稳定性的关键指标，而工作波长作为基本参量，会显著影响不同模式的弯曲

损耗特性。根据式(5)和式(6)进行计算，得到光纤R=80 mm时，不同LP模式的弯曲损耗B与波长λ的变化关系如图13所示，各LP模式的弯曲损耗B与弯曲半径R之间的关系如图14所示。



(a) LP_{31}　(b) LP_{02}　(c) LP_{21}　(d) LP_{11}　(e) LP_{01}

图13 不同LP模式的弯曲损耗B与波长λ的变化关系

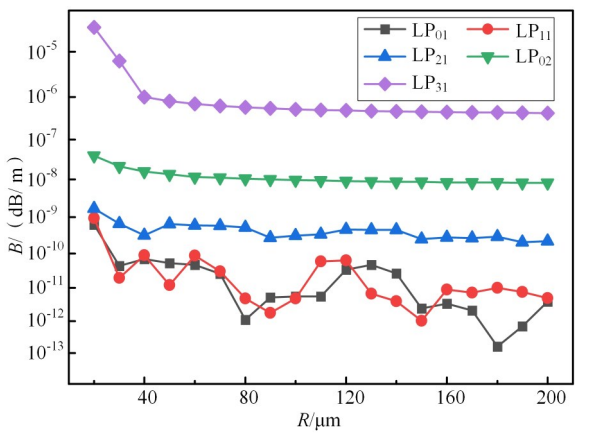


图14 弯曲损耗B与弯曲半径R的变化关系

由图13可知，随着工作波长λ增大，LP_{31}模式的弯曲损耗B上升较为明显(从1×10^{-8} dB/m增至1×10^{-4} dB/m)。这是由于高阶模的电场能量主要分布于纤芯外侧，对弯曲引起的折射率倾斜更为敏感。相比之下，低阶模式受波长影响较小，在长波段下仍能保持良好约束；当工作波长为1.63 μm时，LP_{31}模式的弯曲损耗B仍低于10^{-4} dB/km，满足低损耗传输要求。结合图14分析可知，随着弯曲半径R增大，高阶模式如LP_{31}、LP_{02}的弯曲损耗随R增大而下降并趋于饱和；而低阶模式如LP_{11}、LP_{01}则呈现小幅振荡。即使在较小弯曲半径下，LP_{31}模式的最大弯曲损耗B也仅为3×10^{-6} dB/m。结果表明，该光纤结构在小弯曲半径下具备优异的抗弯性能，适用于长距离、高密度通信场景。

3 光纤性能对比及光纤制备方法

本文提出了一种基于高低折射率双环与空气槽辅助的少模多芯光纤。表2对比了近5年该光纤与具有代表性少模多芯光纤的性能参数，结果如表2所示，可以看出，本文的设计在保持大A_{eff}以抑制非线性效应的同时，实现了更低的芯间串扰。尽管本文提出的高低折射率双环与空气槽辅助的低串扰少模多芯光纤的结构相对复杂、制备难度较高，但可采用管内沉积工艺与机械钻孔技术相结合的方法实现[25]：首先，利用等离子体化学气相沉积法制备含高折射率环的纤芯棒及低折射率包层管；随后，通过机械钻孔技术在包层管壁加工出环形空气槽；最后，将纤芯棒插入包层管中制成预制棒，并经拉丝工序获得目标光纤。

表2 光纤性能对比

文献	通道数/个	光纤结构	X_t/(dB/100 km)	A_{eff}/μm²
文献[7]	7×4	空气孔嵌入沟槽	−66	55
文献[8]	7×4	密集孔辅助	−32	114
文献[18]	7×5	高折射率环+空气孔	−44	100
文献[21]	9×4	空气孔+沟槽	−40	95
文献[22]	6×4	月牙空气孔+沟槽	−56	108
本文	6×5	高低折射率双环+空气槽	−68	85

4 结束语

本文设计了一种基于高低折射率双环与空气槽辅助的低串扰少模多芯光纤。仿真结果表明，该光纤在工作波长为1.55 μm、传输距离为100 km、弯曲半径为

80 mm的条件下，最高阶模式（LP_{31}）的芯间串扰低至−68.14 dB/100 km，其余支持模式的串扰均显著更低；所有支持模式的有效模场面积均大于85 μm²，相邻模式间有效折射率差均超过1.9×10^{-3}；当弯曲半径降至40 mm时，最高阶模式弯曲损耗低至3×10^{-6} dB/m。以上数据表明，该光纤兼具低串扰、大模场面积与优异抗弯性能，在大容量长距离光纤通信系统中具有良好的应用前景。

参考文献：

[1] Saitoh K，Matsuo S. Multicore fiber technology[J]. Journal of Lightwave Technology，2016，34（1）：55−66.

[2] 梁梓豪，陈舜儿，刘伟平. MCF性能的研究现状与发展分析[J]. 光通信技术，2017，41（1）：49−52.

[3] 涂佳静，李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. Acta Optica Sinica，2021，41（1）：0106003.

[4] Li Zenghui，Wang Luyao，Wang Yan，et al. Manufacturable low-crosstalk high-RCMF 13-core 5-LP mode fiber with graded-index core and stairway-index trench[J]. Optics Express，2021，29（17）：26418−26432.

[5] Wang Luyao，Li Shuguang，Meng Xiaojian，et al. Low cross talk homogeneous seven-core five-LP mode fiber based on a high and low refractive index double ring[J]. Journal of the Optical Society of America B，2021，38（12）：3849−3857.

[6] 易亚军，胡先志，杨博. 多芯-FMF传输的研究进展[J]. 光通信技术，2018，42（8）：22−25.

[7] Wang Guorui，Zhang Jiwei，Zhang Han，et al. A low crosstalk multi-core few-mode fiber with composite refractive index profile and air-hole embedded trench assistance[J]. Optics Communications，2021，499：127258.

[8] Xie Yuheng，Pei Li，Zheng Jingjing，et al. Impact analysis of a dense hole-assisted structure on crosstalk and bending loss in homogeneous few-mode multi-core fibers[J]. Optics Express，2020，28（16）：23806−23819.

[9] Goto Y，Tsujikaw A K，Aozas A S，et al. Impact of air hole on crosstalk suppression and spatial core density of multi-core fiber[J]. Journal of Lightwave Technology，2018，36（20）：4819−4825.

[10] 刘畅，裴丽，解宇恒，等. 异质结构的低串扰少模多芯光纤设计[J]. Chinese Journal of Lasers，2020，47（11）：1106004.

[11] Mukasa K，Imamura K，Sugizaki R. Multi-core few-mode optical fibers with large Aeff[C]//Optica. Proceedings of the 38th European Conference and Exhibition on Optical Communication（ECOC 2012）. Amsterdam：Optica Publishing Group，2012：8.

[12] Sasaki Y，Amma Y，Takenaga K，et al. Few-mode multicore fiber with 36 spatial modes（three modes（LP_{01}，LP_{11a}，LP_{11b}）× 12 cores）[J]. Journal of Lightwave Technology，2015，33（5）：964−970.

[13] Kumar D，Ranjan R. Optimal design for crosstalk analysis in 12-core 5-LP mode homogeneous multicore fiber for different lattice structure[J]. Optical Fiber Technology，2018，41：95−103.

[14] Xie Yuheng，Pei Li，Zheng Jingjing，et al. Low-DMD and low-crosstalk few-mode multi-core fiber with air-trench/holes assisted graded-index profile[J]. Optics Communications，2020，474：126155.

[15] Shao Pengshuai，Wang Luyao，Wang Yan，et al. Preparation and transmission characteristics of seven-core few-mode fiber with low loss and low inter-core crosstalk[J]. Optics Express，2022，30（15）：27746−27762.

[16] Li Zenghui，Shao Pengshuai，Li Shuguang，et al. Low crosstalk 125 μm cladding heterogeneous six-core few-mode fiber with air-hole array and trench structure[J]. Infrared Physics & Technology，2024，136：105031.

[17] 沈骁，金思成，韦玮. 1.55 μm 9芯4模保偏光纤设计与性能研究[J]. 南京邮电大学学报（自然科学版），2025，45（2）：68−76.

[18] Wang Luyao，Li Shuguang，Shao Pengshuai，et al. A low crosstalk seven-core five-mode fiber for high density transmission and large capacity communication[J]. Physica Scripta，2024，99（5）：055509.

[19] 李增辉，李曙光，李建设，等. 一种具有低串扰低非线性的双沟槽环绕型十三芯五模光纤[J]. 物理学报，2021，70（10）：179−189.

[20] Wang Chun，Li Shuguang，Li Xuxing，et al. Trench-assisted 12-core 5-LP mode fiber with a low refractive index circle and a high refractive index ring[J]. Optics Express，2023，31（5）：7290−7302.

[21] Jin Sicheng，Shen Xiao. Design and characteristics study of bend-resistant and low-crosstalk few-mode multi-core fiber[J]. Optik，2024，297：171560.

[22] Wang Guorui，Zhang Jiwei，Zhang Han，et al. Low cross talk crescent-shaped pore-assisted few-mode multi-core optical fiber for optical communication[J]. Journal of the Optical Society of America B，2022，39（7）：1839−1846.

[23] Tu Jiajing，Saitoh K，KoshibA M，et al. Design and analysis of large-effective-area heterogeneous trench-assisted multi-core fiber[J]. Optics express，2012，20（14）：15157−15170.

[24] Shao Pengshuai，Li Shuguang，Li Jianshe，et al. Low-cross-talk and multi-channel heterogeneous 13-core four-LP mode fiber with a high refractive index ring and a trench[J]. Journal of the Optical Society of America B，2022，39（6）：1462−1469.

[25] 吴椿烽，陈京京，郑垒垒，等. 弯曲不敏感低损耗大有效面积G.654.E光纤的研究[J]. 光通信技术，2022，46（1）：62−66.