

基于对称双环嵌套管的低损耗弱耦合 六模空芯负曲率光纤*

惠战强^{1)2)†} 刘瑞华¹⁾ 高黎明¹⁾ 韩冬冬¹⁾²⁾ 李田甜¹⁾²⁾ 巩稼民¹⁾²⁾

1) (西安邮电大学电子工程学院, 西安 710121)

2) (西安市微波光子与光通信技术重点实验室, 西安 710121)

(2023年11月10日收到; 2024年1月13日收到修改稿)

本文设计了一种具有对称双环嵌套管结构的新型低损耗少模空芯负曲率光纤, 该光纤支持 LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} , LP_{31a} , LP_{31b} 共 6 种纤芯模式. 所设计的光纤以 SiO_2 作为基底材料, 采用特殊的对称双环嵌套结构将包层区域进行划分, 能够有效地减小纤芯模式与包层模式的耦合. 使用有限元法对该少模空芯负曲率光纤的结构参数进行优化, 并分析了纤芯各个模式的限制损耗和弯曲损耗. 仿真结果表明, 所提出的少模空芯负曲率光纤能够同时支持弱耦合的 6 种纤芯模式独立传输 (相邻模式间的有效折射率差均大于 10^{-4} , 有效地避免了纤芯内模式间的耦合). 在 400 nm 带宽 (1.23—1.63 μm , 覆盖 O, E, S, C, L 波段) 范围内, 纤芯中的 6 个模式均保持低损耗稳定传输. 各模式限制损耗在 1.4 μm 处达到最低, 其中基模 LP_{01} 模式的限制损耗最低, 为 4.3×10^{-7} dB/m. 此外, 当弯曲半径为 7 cm 时, 各模式在一定工作波长范围内均保持低弯曲损耗传输. 公差分析表明, 当结构参数偏移 $\pm 1\%$ 时, 该少模空芯负曲率光纤仍然可以保持低损耗弱耦合的传输特性.

关键词: 空芯负曲率光纤, 少模光纤, 限制损耗, 弯曲损耗

PACS: 07.60.Vg, 42.81.Qb, 42.81.Dp, 42.81.Uv

DOI: 10.7498/aps.73.20231785

1 引言

空芯光纤 (hollow-core fibers, HCFs)^[1-5], 相较于传输介质为石英或其他固体材料的传统实芯光纤而言, 其纤芯介质为空气, 因此具有低时延、低非线性、微色散、弱背向散射、高功率损伤阈值、低温度敏感等优点^[6-10], 使其在气体传感^[11]、高能脉冲压缩^[12]、中红外传输^[13]、高次谐波产生^[14]等领域得到广泛应用. 根据导光原理不同, 空芯光纤主要分为两类^[15]. 一类是基于光子带隙效应的空芯光子带隙光纤 (hollow core photonic bandgap

fiber, HC-PBGF), 该光纤基于光子带隙效应工作, 由周期性交替排列的空气-玻璃结构组成, 能够对特定频率形成光子禁带, 使该频率的光被限制在空气纤芯内^[16], 但由于固有的表面散射损耗 (surface scattering loss, SSL)^[17]和表面模式效应^[18], 限制了 HC-PBGF 的工作性能. 另一类被称为空芯负曲率光纤 (hollow core negative curvature fiber, HC-NCF)(又称空芯反谐振光纤), 该光纤主要由一圈负曲率玻璃管组成, 其导光原理被认为是反谐振反射效应和耦合抑制效应的结合^[15], 并且反谐振反射是抑制纤芯模式与包层模式间耦合的前提. 此外, 纤芯模式和包层模式之间的相位失配抑制了模

* 国家自然科学基金 (批准号: 61875165)、陕西省重点研发计划 (批准号: 2022GY-008)、陕西省自然科学研究计划 (批准号: 2022JQ-638)、陕西省创新能力支撑计划项目 (批准号: 2022PT-15)、陕西省教育厅协同创新项目 (批准号: 20JY060) 和 705 所重点实验室开放基金 (批准号: 705JCH2023-3.2) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhanqianghui@xupt.edu.cn

式之间的耦合^[19]. 与 HC-PBGF 相比, HC-NCF 中空气-玻璃界面上的电磁场最小, 从而使得 SSL 显著降低^[15], 导致限制损耗 (confinement loss, CL) 和弯曲损耗 (bending loss, BL) 成为 HC-NCF 最主要的损耗. HC-NCF 已被证明可以用于实现低损耗传输 (0.28 dB/km)^[20]. 近年来, HC-NCF 因其具有超低传输损耗^[21]、超弱光学非线性^[22]、超大传输带宽^[23]、低传播延迟^[24]、低热敏感性^[25]、近零色散^[26]、小的光场-材料模场重叠面积^[27]以及高模式纯度^[28]等特点, 引起了广泛的研究兴趣, 已成功用于高功率单模激光低损传输^[29]、微波光子链路^[30]、中红外吸收光谱传感器^[31]等. 此外, 在中红外波段, 硫系材料与传统的光纤基底材料 (石英) 相比, 具有低声子能量、宽中红外透明窗口^[32]、相对稳定的物理化学性质等优点^[33], 在中红外区域受到了广泛关注, 基于硫系玻璃的 HC-NCF 为中红外波段光子信息技术的发展提供了更多可能. 然而, 当前空芯负曲率光纤的研究主要聚焦于其单模传输特性和偏振调控特性^[34-37], 在其少模传输特性方面的研究目前报道还比较少.

另一方面, 随着大数据、云计算、5G/6G、人工智能、移动物联网等各种新型宽带多媒体业务的快速发展, 对光纤网络带宽的需求呈指数级增加, 为了实现扩容增速, 人们已经从波长、时间、偏振、轨道角动量等多个物理维度对信息进行多维复用, 但传统单模光纤 (single mode fiber, SMF) 的传输容量仍趋于逼近香农极限, 很难继续支撑持续增长的带宽需求^[38-40]. 为了应对这一挑战, 模分复用技术 (mode division multiplexing, MDM)^[41] 近年逐渐成为突破单纤传输容量极限、缓解光纤传输网络带宽危机的一个重要技术方向. 少模光纤 (few mode fiber, FMF) 是 MDM 技术的核心器件之一^[42], 主要利用同一根光纤中相互正交的各个模式实现多路信号的同时传输, 使得光纤通信容量成倍增加. 然而, 传统少模光纤中的模式复用信号容易发生模式耦合^[43], 导致接收信号模糊失真. 为了提高传输信号质量, 需要避免少模光纤中的模式耦合, 解决这一问题的有效方法是设计一种弱耦合少模光纤. 而 HC-NCF 特殊的导光机制可以有效抑制模式间的耦合, 极大提升 MDM 系统性能^[44,45]. 与传统 FMF 相比, 少模 HC-NCF 具有极低损耗、低差分群时延 (different group delay, DGD)、低非线性系数、低模式串扰等优点, 光信号通过此光纤传输

时不易失真, 使其更具吸引力.

最近, 几种具备少模特性的低损耗 HC-NCF 陆续被报道, 并成功应用于大容量、高速率、长距离的光纤传输链路. 如 2020 年, Wang 等^[46] 提出了一种双模弱耦合连接管 HC-NCF, 可支持两个线性偏振模式 (linear polarized mode, LP) LP₀₁ 和 LP₁₁ 在纤芯中同时传输, 基模 LP₀₁ 的最小 CL 为 1.7×10^{-4} dB/m. 2021 年, Goel 与 Yoo^[47] 报道了一种具有中心对称嵌套结构的少模 HC-NCF, 可以支持五到九种不同模式同时传输, 其中基模 LP₀₁ 的最小 CL 为 1.4×10^{-5} dB/m. 2022 年, Ou 等^[48] 提出了一种弱耦合跑道型嵌套少模 HC-NCF, 实现了 LP₀₁ 和 LP₁₁ 两种模式的低损耗传输, 基模 LP₀₁ 的最小 CL 为 10^{-5} dB/m. 同年, Liu 等^[49] 提出了一种低弯曲损耗少模玻璃片连接嵌套管结构的 HC-NCF, 该光纤支持 LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁, LP₀₂, LP₃₁ 五种纤芯模式同时独立传输, 具有低模式耦合和低弯曲损耗特性, 基模 LP₀₁ 的最小 CL 为 3.4×10^{-7} dB/m. 从工程应用的角度来看, 能够支持多种模式的少模 HC-NCF 可以进一步提高 MDM 系统性能, 增加光纤通信容量. 然而, 以上所设计的这些少模 HC-NCF 在复用模式数和传输损耗特性方面仍然不能满足实际工程需求. 因此, 设计低损耗弱耦合多模式复用的少模 HC-NCF 仍颇具挑战.

针对上述问题, 本文设计了一种基于对称双环嵌套管包层结构的新型弱耦合少模 HC-NCF, 具有低限制损耗、大差分群时延和低弯曲损耗特性. 在 400 nm 带宽 (1.23—1.63 μm , 覆盖 O, E, S, C, L 波段) 内, 所设计的光纤可以支持 6 种不同纤芯模式同时传输, 各模式之间的有效折射率差 Δn_{eff} 均大于 10^{-4} , 极大地抑制了 6 种 LP 模式之间的耦合, 避免了不同模式间的信道串扰. 下文, 将系统研究所提出的光纤结构参数对纤芯各模式 CL 的影响, 并详细分析在最优结构参数下, 光纤中各个模式的有效折射率和 CL 随波长的变化规律. 此外, 还研究了该弱耦合少模 HC-NCF 的弯曲损耗和制造公差.

2 光纤结构

所提出的对称双环嵌套管少模 HC-NCF 的横截面如图 1 所示. 白色部分代表空气, 蓝色部分代表 SiO₂, 光纤包层由 6 个无接触的大圆管组成, 每

个大圆管单元包括两个对称嵌套小圆管和一个中心连接玻璃片. 无接触节点的大包层玻璃管有效地避免了由于管环互相接触产生的 Fano 共振^[50], 减小了光纤损耗. 同时, 对称双环嵌套管的引入不仅可以将包层空气区域进行分割, 而且增加了反谐振层数, 在抑制纤芯模式与包层模式耦合的同时, 减少了纤芯光场的泄露, 而中心连接玻璃片的作用是将包层空气区域进行分割, 减少包层模式的产生, 从而降低了纤芯模式与包层模式的耦合程度. 对称双环嵌套管少模 HC-NCF 的几何结构参数分别表示为: 纤芯半径 R 、相邻包层大圆管间隙 g 、包层管单元玻璃片厚度 t 、包层大圆管半径 r_1 、包层嵌套小圆管半径 r_2 .

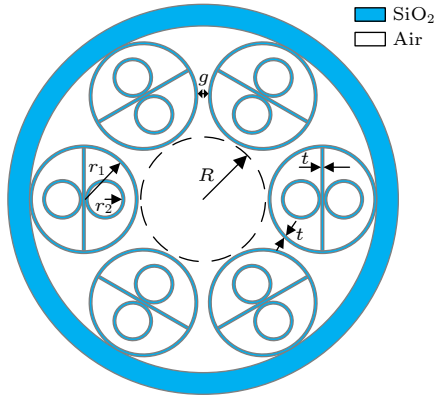


图 1 对称双环嵌套管少模 HC-NCF 的横截面结构图
Fig. 1. Cross sectional structure of few-mode HC-NCF with symmetrically double ring nested tube structure.

采用基于有限元方法 (finite element method, FEM) 的模态求解器 (COMSOL Multiphysics) 来对 HC-NCF 的导波特性和分析. 为实现精确模拟, 需要精心优化网格尺寸和完美匹配层 (perfectly matched layer, PML) 相关参数. 仿真中使用了自适应三角形网格, 并且将 SiO_2 区域和空气区域的最大网格尺寸分别设置为 $\lambda/6$ 和 $\lambda/4$ ^[15]. 在包层外放置一个具有 $8 \mu\text{m}$ 厚度的标准圆柱形 PML 来包围仿真区域, 用以吸收泄露的光场. 对于 SiO_2 材料, 其折射率 n_{silica} 可以由 Sellmeier 方程确定^[51]:

$$n_{\text{silica}}^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1} \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}, \quad (1)$$

其中, λ 为波长, 单位为 μm ; λ_i 为第 i 个谐振波长, 单位为 μm ; B_i 为第 i 个谐振波长的强度, 即 Sellmeier 系数, 一般作为常数项. 通常取前三项,

具体参数: $B_1 = 0.6961663$, $B_2 = 0.4079426$, $B_3 = 0.8974794$, $\lambda_1 = 0.0684043$, $\lambda_2 = 0.1162414$, $\lambda_3 = 9.896161$.

根据反谐振导光机理, 玻璃管厚度 t 的设计需要满足反谐振条件. 谐振厚度和反谐振厚度分别表示为^[52]

$$t_{\text{R}} = \frac{m\lambda}{2\sqrt{n_{\text{silica}}^2 - 1}}, \quad (2)$$

$$t_{\text{AR}} = \frac{(m - 0.5)\lambda}{2\sqrt{n_{\text{silica}}^2 - 1}}, \quad (3)$$

其中, λ 为波长; m 为整数, 表示谐振的阶数. 在仿真中, 设置 $m = 2$, 既能保持大传输带宽的特性, 又满足制造可行性^[46], 此时对应于传输波长 $1.55 \mu\text{m}$ 的反谐振厚度 $t_{\text{AR}} = 1.11 \mu\text{m}$. 此外, 纤芯半径 R 、包层大圆管半径 r_1 与相邻两个大包层管间的间隙 g 的关系为^[49]

$$r_1 = \frac{g/2 - R \sin(\pi/N)}{\sin(\pi/N) - 1}, \quad (4)$$

其中, $N (\geq 3)$ 为包层管的数量, 当 N, g, R 固定时, r_1 唯一确定.

HC-NCF 依靠其特有的导光机制可以有效地将光限制在空气纤芯中传输, 但仍有一部分光会通过管间隙或透过管壁泄露到包层中, 从而发生纤芯模式与包层模式的耦合. 这部分泄露到包层内而造成的能量损耗称为限制损耗, 它是 HC-NCF 损耗的主要来源, 可以利用有效折射率的虚部计算得到^[53,54]:

$$\text{CL} = \frac{40\pi}{\ln(10)\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) = 8.686 \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (5)$$

其中, λ 为波长, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 表示有效折射率的虚部. 本文所设计的低损耗弱耦合少模 HC-NCF 采用了对称双环嵌套结构, 其将包层管区域进行分割, 减少了包层模式的产生, 同时增加了反谐振层数, 能够有效地减小纤芯模式与包层模式的耦合, 从而实现低损耗少模传输.

3 对称嵌套管少模 HC-NCF 结构优化及分析

CL 是少模 HC-NCF 的重要性能参数之一, 它在一定程度上反映了少模 HC-NCF 对光波的限制能力. 损耗太大, 会制约光纤通信系统的最大传输

距离,为实现相同距离的传输,必然需要引入更多的光放大器,导致系统成本增加.因此,对于所设计的少模 HC-NCF,首先需要分析不同结构参数对各模式 CL 的影响,以期得到具有较小限制损耗的最优少模 HC-NCF 结构.

3.1 相邻大包层圆环管间隙 g 对 CL 的影响

引入包层管间隙 g ,可以避免在少模 HC-NCF 反谐振包层大圆管之间形成额外的谐振腔,是降低 CL 的一种有效途径.然而,当 g 太大时,包层大圆管不能充分限制光;当 g 太小时,包层大圆管之间容易相互接触产生节点,导致模场与玻璃表面重叠从而增加光纤损耗.只有当包层管间隙 g 取值合适时,才可以有效地消除连接包层大圆管的节点引起的法诺共振.因此首先需要分析包层管间隙 g 对各模式有效折射率系数和 CL 的影响.

数值模拟中,定义参数 $k = r_2/r_1$,表示包层嵌套小圆管与包层大圆管的半径之比(后文中 k 均为此定义),选择入射光波长为 $1.55 \mu\text{m}$, $k = 0.4$,纤芯半径 $R = 16 \mu\text{m}$,得到结果如图 2 所示.图 2(a) 为光纤支持的各个模式的有效折射率与相邻包层大圆管间隙 g 的关系,可以看出, LP_{01} 模的有效折射率系数最大, LP_{31} 模的有效折射率系数最小,但总体而言,结构参数 g 对各模式的有效折射率系数的影响都很小.另一方面,结构参数 g 对各个模式 CL 的影响如图 2(b) 所示,随着包层大圆管间隙 g 的增大,各模式的 CL 整体均呈上升趋势;而且对于较高阶的模式,如 LP_{02} , LP_{31a} 和 LP_{31b} 模式,其相应的 CL 值更高.当 g 取值在 $0-1 \mu\text{m}$ 之间时,各模式 CL 均较小,综合考虑,选择 $g = 0.5 \mu\text{m}$.

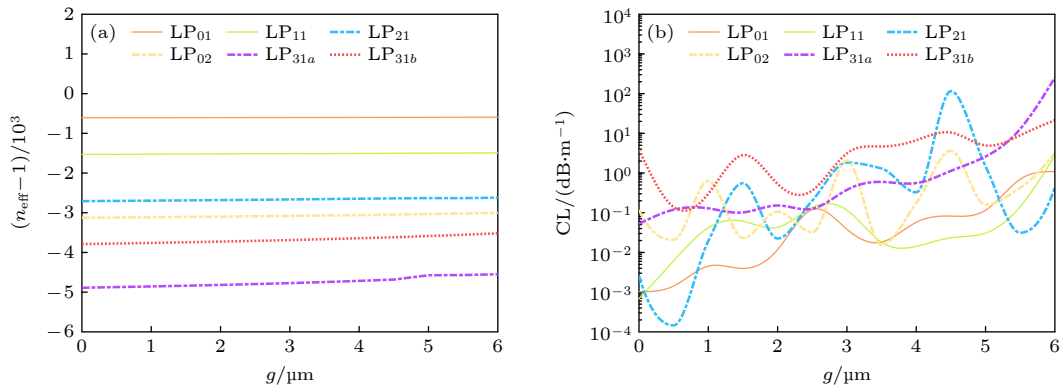


图 2 当纤芯半径 $R = 16 \mu\text{m}$ 和 $k = 0.4$ 时,改变 g 对模式传输特性的影响 (a) 有效折射率; (b) CL

Fig. 2. When the core radius $R = 16 \mu\text{m}$ and $k = 0.4$, the impact of changing g on mode transmission characteristics: (a) Effective refractive index; (b) CL.

图 3 显示了纤芯所支持的 6 个模式的模场分布图,本文主要研究光纤所支持的 LP 模式,下标“a”和“b”分别表示电场方向沿水平和垂直方向.需要说明的是, LP_{11} , LP_{21} 模式组由于 LP_{11a} , LP_{11b} , LP_{21a} , LP_{21b} 折射率差值太小,并未完全分离成 LP_{11a} , LP_{11b} , LP_{21a} , LP_{21b} 模式传输,因此此处对 LP_{11} , LP_{21} 模式组并不进行具体划分,而是将其视为一个模式组进行信号传输,而纤芯中支持的 LP_{31a} , LP_{31b} 折射率差值达到了模式解耦条件^[55](即两个模式的有效折射率差值大于 10^{-4}),因此可以作为一个相互正交的独立信道传输信号.

3.2 包层嵌套小圆管半径 r_2 对 CL 的影响

其次,分析包层嵌套小圆管半径对各模式有效折射率系数和 CL 的影响.根据 3.1 节的讨论,设置光纤参数 $g = 0.5 \mu\text{m}$, $R = 16 \mu\text{m}$.在此条件下,分析 k 值变化对光纤传输特性的影响,得到结果如图 4 所示.图 4(a) 为纤芯中各模式的有效折射率随 k 的变化曲线图,可以看出, k 值的变化对各个模式有效折射率的影响很小.图 4(b) 是纤芯中相邻各模式之间的有效折射率之差,当 k 从 0.25 增加到 0.3 时, LP_{31b} 模式与 LP_{31a} 模式之间的有效折射率差明显增大,这是由于 k 值很小时,纤芯区域的光有一部分能量泄露到了包层区域.当 k 取 0.25 时, LP_{31a} 模式损耗最大,其模场分布如图 5 所示.图 5(a) 为光纤横截面二维模场分布图,图 5(b) 为光纤横截面三维模场分布图,由色条图可知,颜色越红代表能量密度越高,颜色越蓝代表能量密度越低.由图 5(a) 和图 5(b) 可以明显地看出,光在空气纤芯中的约束被减弱,原处在纤芯区域的模式

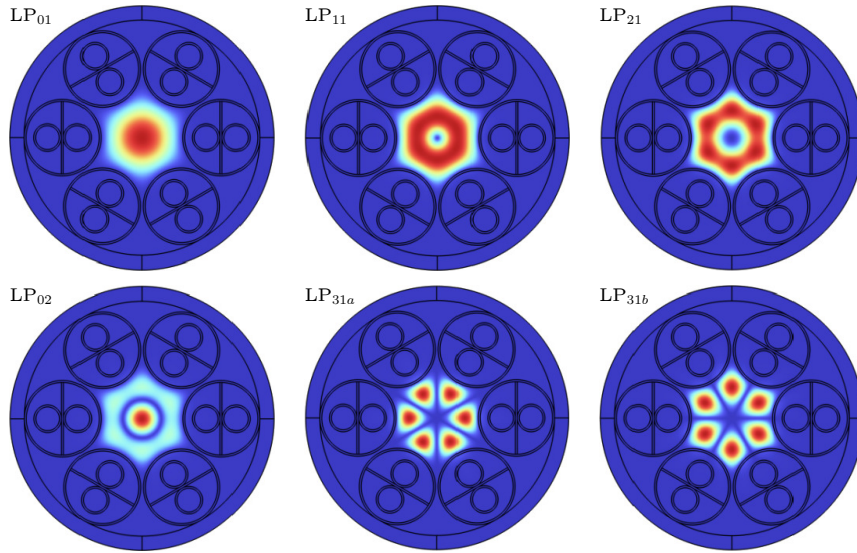


图 3 少模 HC-NCF 中纤芯模式的模场分布图

Fig. 3. Mode field distribution of guided core modes in the few-mode HC-NCF.

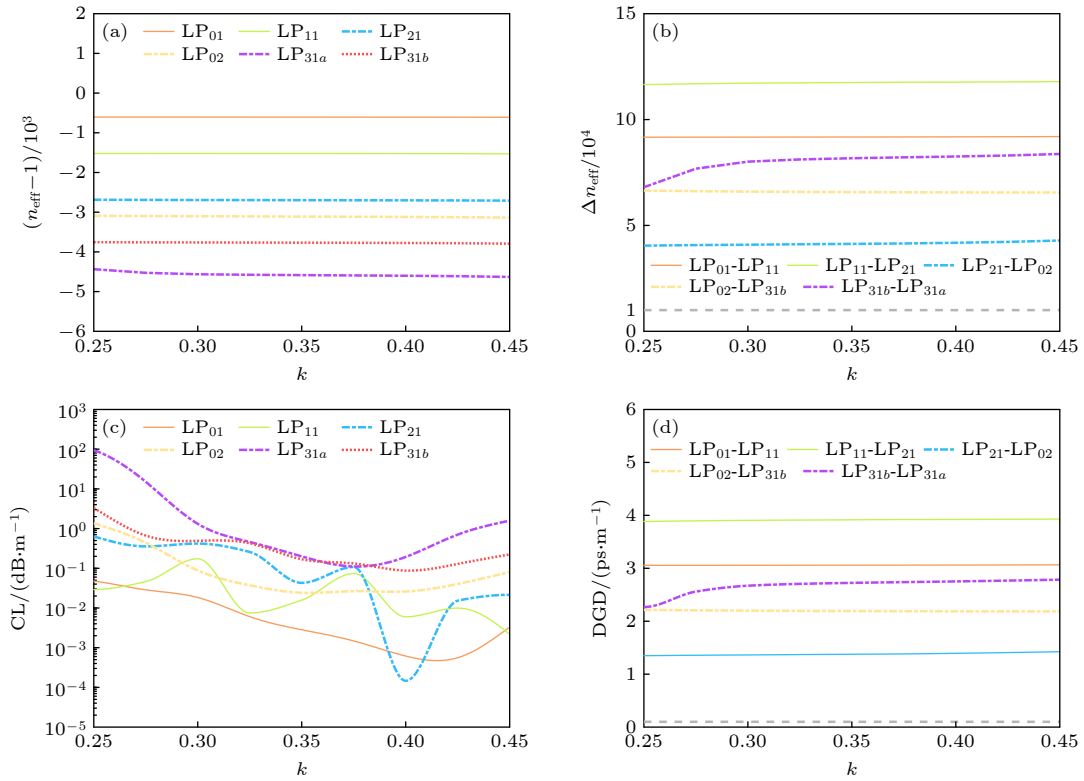


图 4 当纤芯半径 $R = 16 \mu\text{m}$, $g = 0.5 \mu\text{m}$, 改变 k 对模式传输特性的影响 (a) 有效折射率; (b) 相邻模式有效折射率差; (c) CL; (d) 相邻模式间 DGD

Fig. 4. Impact of changing k on mode transmission characteristics for $R = 16 \mu\text{m}$ and $g = 0.5 \mu\text{m}$: (a) Effective refractive index; (b) difference of effective refractive index of adjacent modes; (c) CL; (d) DGD between adjacent modes.

能量, 有相当一部分泄露到包层, 包层区域出现能量较高的模式分布, 正是由于纤芯模式与包层模式发生耦合, 使得 LP_{31a} 模式的 CL 显著增大. 图 4(c) 为各模式的 CL 随 k 值的变化曲线, 由图可知: 随着 k 值在 0.25—0.35 范围内逐渐增大, 模式的 CL

随之快速下降, 这是因为更大的嵌套管结构减弱了对称嵌套管型少模 HC-NCF 中纤芯模式与包层模式的耦合, 增加了该光纤纤芯限制光的能力, 导致光很好地限制在空气纤芯内传输. 当 k 在 0.35—0.45 范围内变化时, 各模式 CL 逐渐趋于稳定. 当 k

取 0.4 时, 各模式的 CL 较小. 图 4(d) 分析了相邻模式间的差分群时延随 k 的变化规律, 可以看出, 随着 k 值的增加, DGD 始终保持在一定水平, 并且均大于 1 ps/m, 这说明该光纤所支持的 6 种模式中, 每相邻的两种导模彼此分离得很好.

3.3 纤芯半径 R 对 CL 的影响

纤芯半径 R 是少模 HC-NCF 的另一个重要结

构参数, 它会影响模式的 CL 和有效折射率, 因此, 接着分析了纤芯半径对所设计的对称双环嵌套管型少模 HC-NCF 的模式有效折射率和 CL 的影响. 分析中设置 $g = 0.5 \mu\text{m}$, $k = 0.4$, 得到结果如图 6 所示. 其中, 图 6(a) 为纤芯中各模式的有效折射率随 R 的变化曲线. 可见, 各模式的有效折射率随 R 增加均呈增长趋势, 但增幅不同, LP_{31a} 模式增幅最大. 图 6(b) 是纤芯中相邻各模式之间的有效

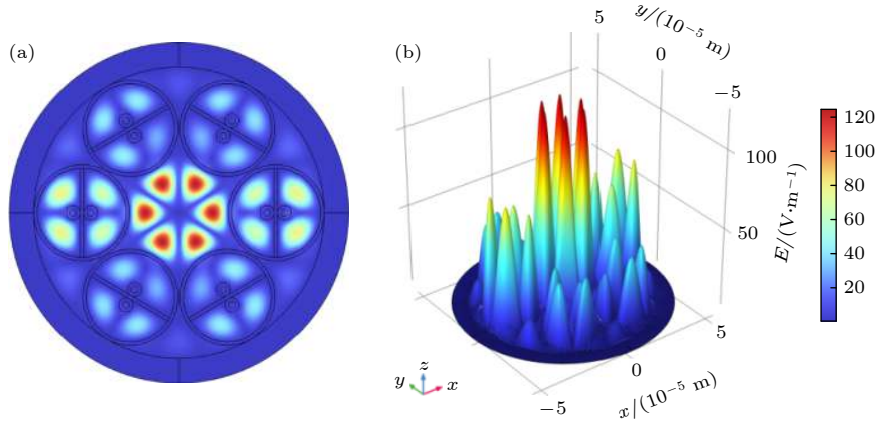


图 5 $k = 0.25$, LP_{31a} 模的模场分布 (a) 二维平面图; (b) 三维立体图

Fig. 5. Mode field distribution of LP_{31a} modes at $k = 0.25$: (a) 2D plane diagram; (b) 3D stereo diagram.

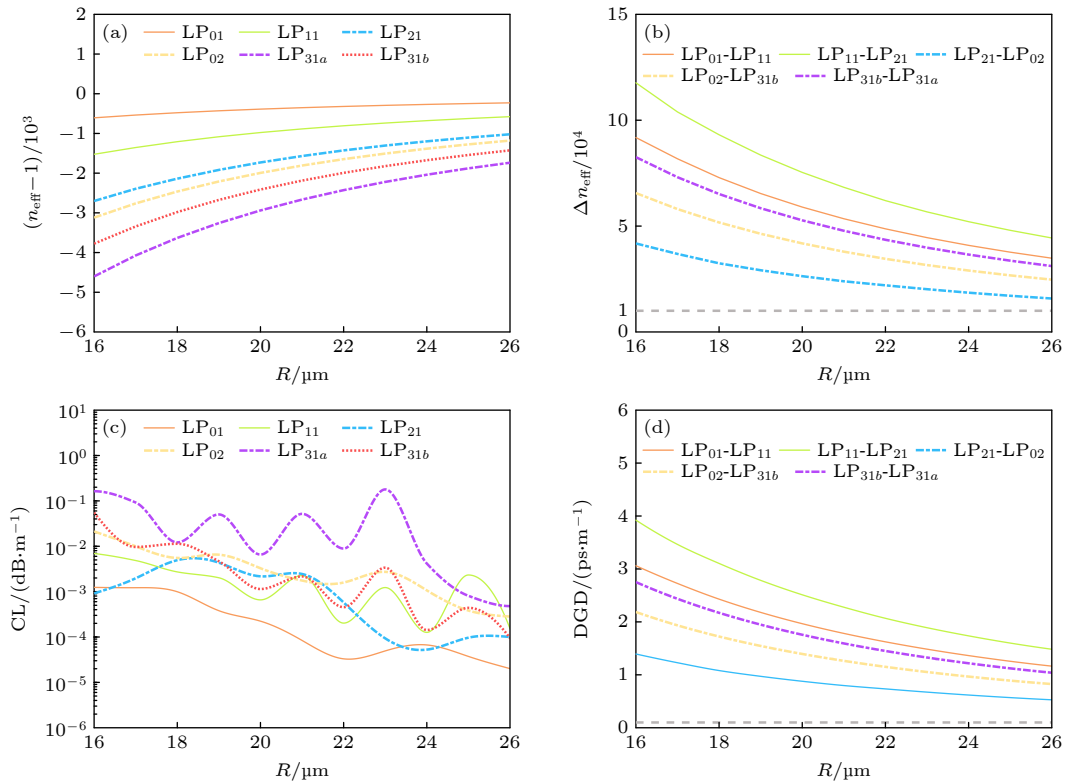


图 6 当 $g = 0.5 \mu\text{m}$, $k = 0.4$ 时, 改变纤芯半径 R 对模式传输的影响 (a) 有效折射率; (b) 相邻模式有效折射率差; (c) CL; (d) 相邻模式间的 DGD

Fig. 6. Impact of changing R on mode transmission characteristics for $g = 0.5 \mu\text{m}$ and $k = 0.4$: (a) Effective refractive index; (b) difference of effective refractive index of adjacent modes; (c) CL; (d) DGD between adjacent modes.

折射率差随 R 的变化曲线, 随着纤芯半径 R 不断增加, 相邻模式的有效折射率差始终大于 10^{-4} , 符合少模光纤模式解耦临界条件, 说明该光纤能够有效减小模间串扰. 图 6(c) 是 CL 随 R 的变化曲线, 当 R 从 $16\ \mu\text{m}$ 增大到 $26\ \mu\text{m}$ 时, 各模式的 CL 整体呈下降趋势, 纤芯半径越大, 能量泄露到包层的部分越少, 光能够很好的在纤芯区域传输. 但是, 纤芯尺寸过大会影响光纤的弯曲性能, 甚至可能使光纤在使用过程中发生断裂^[15]. 当 R 在 $20\text{--}24\ \mu\text{m}$ 范围变化时, 各模式的限制损耗变化较为剧烈, 当 $R = 24\ \mu\text{m}$ 时, 各模式的限制损耗均处于一个相对较小的状态. 为了确保各模式间弱耦合, 并且考虑到对于低 BL 的要求, 设计中没有进一步增加半径. 另外, 计算了相邻模式间的 DGD, 得到结果如图 6(d) 所示. 可见, LP_{11} 与 LP_{21} 间的 DGD 最大, 但各模式间的 DGD 随着光纤半径的增加, DGD 均逐渐减小. 综上所述, 当纤芯半径增大时, 少模 HC-NCF 各模式有效折射率均增大、CL 均降低, 而模式之间的有效折射率差以及 DGD 均呈下降趋势, 为了有效减少 CL, 同时抑制模式耦合, 并且

获得低弯曲损耗, 必须仔细选择纤芯半径 R , 因此结合图 6 变化规律, 最终选择 R 为 $24\ \mu\text{m}$.

3.4 不同入射波长对 CL 的影响

以上系统分析了对称双环嵌套管少模 HC-NCF 主要结构参数对光纤各模式 CL 的影响, 数值计算了各模式的有效折射率、相邻模式的有效折射率差以及 CL. 最终得到所设计少模光纤的最优结构参数为 $g = 0.5\ \mu\text{m}$, $k = 0.4$, $R = 24\ \mu\text{m}$. 然而, 上述分析是在光纤通信典型波长 $1550\ \text{nm}$ 处开展的, 为了适应当前流行的密集波分复用 (dense wavelength division multiplexer, DWDM) 技术, 有必要分析所设计少模光纤的宽带波长特性. 因此, 接着讨论了少模 HC-NCF 所支持的各个模式的 CL 随波长的变化规律, 得到结果如图 7 所示. 图 7(a) 为纤芯中各模式的有效折射率随波长变化的曲线. 图 7(b) 为纤芯中相邻模式的有效折射率差随波长变化的曲线, 可以看出, 在所分析波段 ($1.2\text{--}1.7\ \mu\text{m}$), 各模式 Δn_{eff} 均大于 10^{-4} , 能够有效地抑制模式间的耦合. 图 7(c) 为各模式 CL 随入射

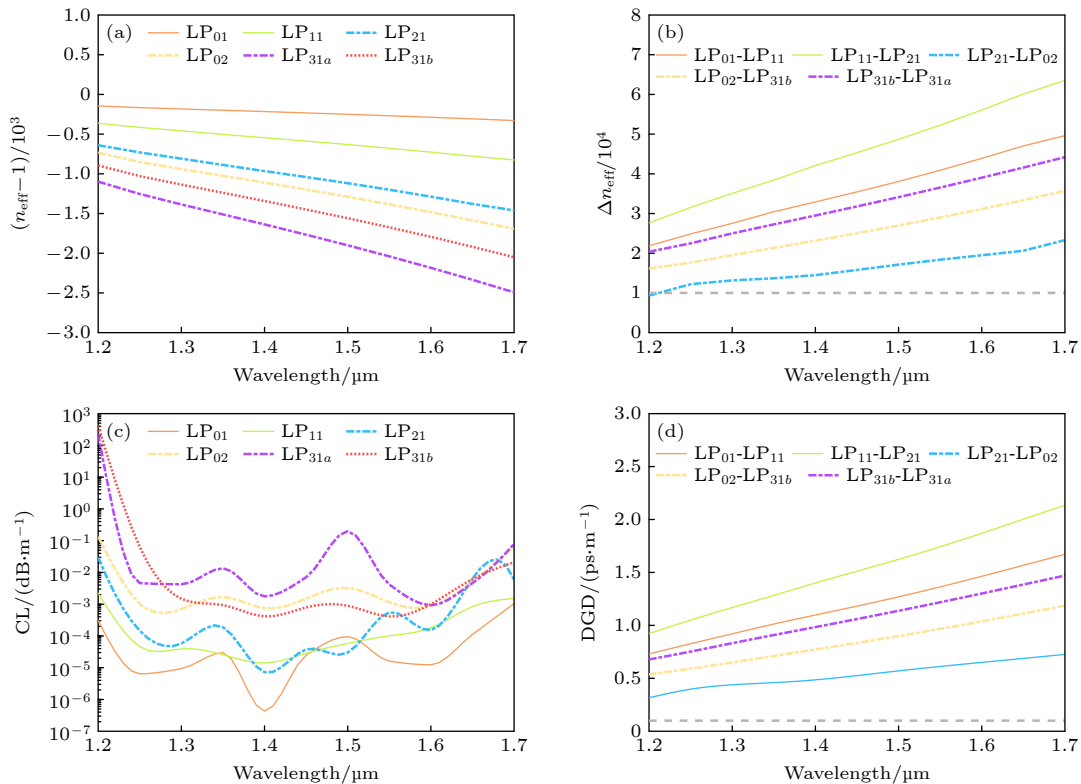


图 7 当 $g = 0.5\ \mu\text{m}$, $k = 0.4$, $R = 24\ \mu\text{m}$ 时, 波长变化对模式传输的影响 (a) 有效折射率; (b) 相邻模式有效折射率差; (c) CL; (d) 相邻模式间的 DGD

Fig. 7. Variation of changing wavelength on mode transmission characteristics for $g = 0.5\ \mu\text{m}$, $k = 0.4$ and $R = 16\ \mu\text{m}$: (a) Effective refractive index; (b) difference of effective refractive index of adjacent modes; (c) CL; (d) DGD between adjacent modes.

波长的变化曲线, 当工作波长为 $1.2 \mu\text{m}$ 时, 纤芯中各模式的 CL 均保持在较高水平. 随着工作波长的增加, CL 呈下降趋势. 当工作波长在 $1.2\text{--}1.6 \mu\text{m}$ 范围内变化时, 各模式的 CL 起伏振荡并保持在一定水平. 各模式 CL 在 $1.4 \mu\text{m}$ 处均达到最低, 其中, 基模 LP_{01} 模式的 CL 最低, 为 $4.3 \times 10^{-7} \text{ dB/m}$. 在 $1.23\text{--}1.61 \mu\text{m}$ 波长范围内, LP_{01} , LP_{11} 和 LP_{21} 模式的 CL 均小于 10^{-3} dB/m ; 在 $1.3\text{--}1.63 \mu\text{m}$ 范围内, LP_{02} 和 LP_{31b} 模式的 CL 小于 $3 \times 10^{-3} \text{ dB/m}$. 图 7(d) 为相邻模式的 DGD 随波长的变化曲线, 光纤各个相邻模式间均具有较大的 DGD, 并且在所分析的整个波长范围内, 其值均大于 0.1 ps/m , 这说明相邻两种模式之间分离效果很好.

4 弯曲特性

由于在实际应用中, 受工作环境及施工条件影响, 光纤弯曲不能完全避免, 因此, 弯曲损耗成为少模 HC-NCF 的另一个重要特性参数. 当弯曲损耗过大时, 会引起光纤链路中的光功率下降, 进而

影响光纤通信系统性能. 因此, 从工程应用角度考虑, 有必要分析所设计少模 HC-NCF 的弯曲损耗. 为了计算 BL, 采用保角变换方法估计弯曲状态下的等效折射率分布. 假设光纤沿 x 方向弯曲, 等效折射率可以用下式计算^[56]:

$$n_{\text{eq}}(x, y) = n(x, y) \sqrt{1 + 2x/(\rho R_b)}, \quad (6)$$

其中 $n(x, y)$ 表示光纤的有效折射率, 当光纤处于直线状态时 (即 $x = 0$), 有 $n_{\text{eq}}(x, y) = n(x, y)$; R_b 为光纤弯曲半径; ρ 是弹性光学效应的校正系数; x 为距离光纤中心的横向距离.

对于优化的少模 HC-NCF 光纤, 其最佳结构参数为 $g = 0.5 \mu\text{m}$, $k = 0.4$, $R = 24 \mu\text{m}$, 利用 FEM 法数值计算了不同弯曲半径下光纤各模式 BL 的变化. 由于在 x 方向上纤芯模式和包层模式之间更容易发生耦合, 即 x 方向比 y 方向对于弯曲更加敏感^[57], 因此本文主要研究 x 方向上的 BL 变化 (沿 y 方向情况类似), 如图 8(a) 坐标所示. 图 8(b) 为不同弯曲半径下, 纤芯中各模式的等效折射率曲线图. 可见, 在所考虑的弯曲半径内, 各模式的有效折射率随弯曲半径变化不大. 图 8(c) 为相邻模

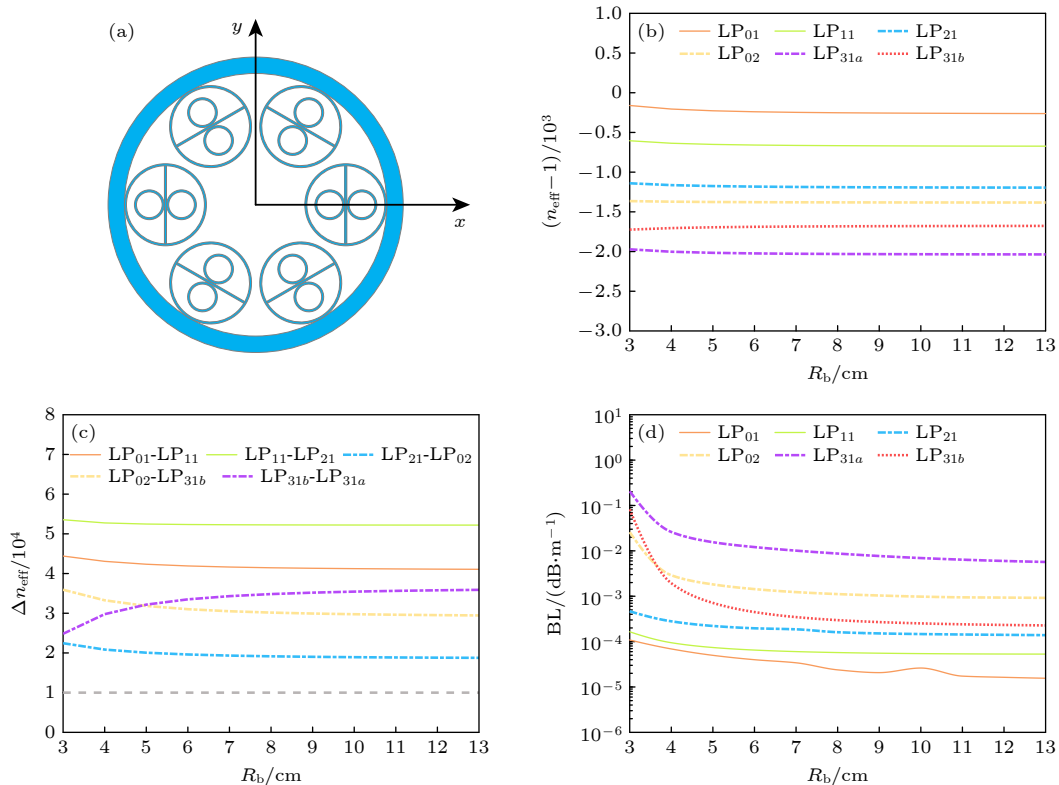


图 8 当 $g = 0.5 \mu\text{m}$, $k = 0.4$, $R = 24 \mu\text{m}$ 时, 不同弯曲半径对模式传输的影响 (a) 预期基线; (b) 有效折射率; (c) 相邻模式有效折射率差; (d) BL

Fig. 8. Variation of changing bending radius on mode transmission characteristics for $g = 0.5 \mu\text{m}$, $k = 0.4$: (a) Expected baseline; (b) effective refractive index; (c) difference of effective refractive index of adjacent modes; (d) BL.

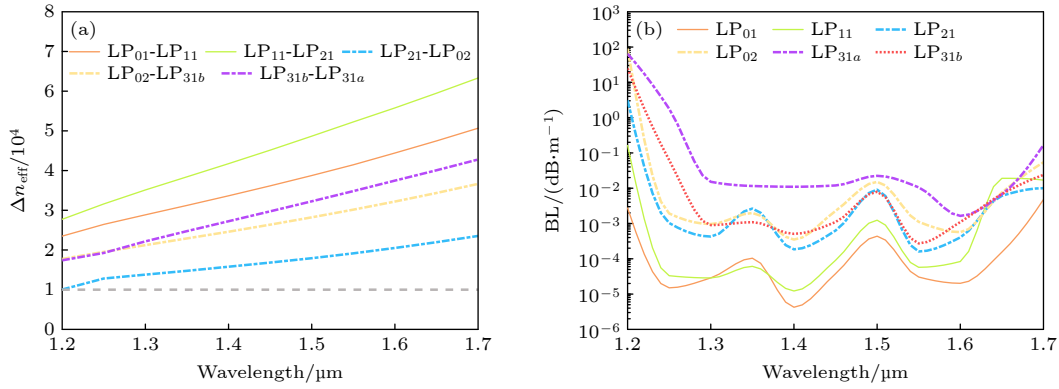


图 9 当弯曲半径 $R_b = 7$ cm 时, 不同波长对模式传输的影响 (a) 相邻模式有效折射率差; (b) BL

Fig. 9. Variation of changing wavelength on mode transmission with bending radius $R_b = 7$ cm: (a) Difference of effective refractive index of adjacent modes; (b) BL.

式间等效折射率差随弯曲半径的变化规律, 当弯曲半径大于 7 cm 时, 相邻模式间的等效折射率差逐渐趋于稳定. 图 8(d) 为各模式 BL 随弯曲半径的变化曲线, 当弯曲半径逐渐增大时, 各模式的 BL 逐渐减小; 当弯曲半径大于 6 cm 时, 各模式的 BL 下降趋势趋于平缓, LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁ 和 LP_{31b} 模式的 BL 均小于 5×10^{-4} dB/m, LP₀₂ 模式的 BL 小于 10^{-3} dB/m, LP_{31a} 模式的 BL 小于 10^{-2} dB/m. 反之, 当弯曲半径很小时, BL 随弯曲半径减小而迅速增长.

取弯曲半径 $R_b = 7$ cm, 分析光纤在不同工作波长下 BL 的变化, 图 9(a) 为不同工作波长下, 纤芯中相邻模式间的等效折射率差. 图 9(b) 显示了各模式 BL 随波长的变化趋势, 当工作波长在 1.23—1.61 μm 范围内变化时, 基模 LP₀₁ 的 BL $< 4.5 \times 10^{-4}$ dB/m, LP₁₁ 模式的 BL $< 1.3 \times 10^{-3}$ dB/m, 当工作波长在 1.3—1.67 μm 范围内变化时, 后四种模式的 BL $< 2.3 \times 10^{-2}$ dB/m. 在波长 1.4 μm 处, 基模 LP₀₁ 的 BL 最低为 4.24×10^{-6} dB/m. 结果表明, 在弯曲状态下, 少模 HC-NCF 所支持的 6 种模式在一定工作波长范围内仍能保持低弯曲损耗传输.

5 制造公差

当前的微结构光纤通常采用堆叠-拉制 [58,59]、3D 打印 [60] 和挤压 [61] 等技术进行制备. 然而, 相比于实芯微结构光纤, HC-NCF 的制备技术更为复杂. 在预制棒的拉丝过程中, 熔炉内温度高低、包层管内气压大小及拉丝速度快慢等因素的随机改变都会使得 HC-NCF 的结构发生变化. 因此, 有必要对所设计的少模 HC-NCF 制造公差进行分析.

已有工作讨论了光纤包层负曲率圆弧位置相对理想位置偏差 $\pm 2\%$ 变化对损耗特性的影响 [62]. 在此基础上, 本文进一步研究了所设计少模 HC-NCF 主要结构参数均发生 $\pm 1\%$ 的误差时, 对其性能的影响. 光纤主要结构参数包括包层嵌套小圆环半径 r_2 与大圆环半径 r_1 比值 k 、纤芯半径 R 以及嵌套管壁厚 t . 其中, 随着 R 的增加, CL 呈明显下降趋势, 但 R 过大会使得模式间发生严重耦合, 所以综合考虑确定了合适的 R 值. 另外在光纤制造中, R 的尺寸较其他结构参数来说较大, 容易确定. 而嵌套管结构参数 t 和 k 的数值较小, 其变化对于光纤性能影响较大, 故重点讨论了参数 t 和 k 的变化.

5.1 嵌套管壁厚 t

少模 HC-NCF 的工作波段由反谐振条件决定, 选取不同的玻璃管厚度会导致光纤的工作带宽和损耗特性发生变化, 因此玻璃管厚度是少模 HC-NCF 的关键参数之一 [63]. 分别研究了嵌套管壁厚参数发生 $\pm 1\%$ 偏差时对纤芯各模式的有效折射率和 CL 的影响, 结果如图 10 和图 11 所示. 由图 10(a) 和图 11(a) 可知, 在 1.25—1.65 μm 波长范围内, 纤芯中相邻两模式间的有效折射率差均大于 10^{-4} , 符合少模光纤模式解耦临界条件. 从图 10(b) 可以看出, 由于管厚 t 发生了变化, 反谐振条件也发生了改变, 从而低 CL 对应的工作波长区间也发生了改变. 当工作波长为 1.3 μm 时, 各模式的 CL 达到较低水平, 基模 LP₀₁ 最低 CL 为 5.678×10^{-7} dB/m. 同样, 从图 11(b) 可知, 当工作波长为 1.45 μm 时, 各模式的 CL 较低, 基模 LP₀₁ 最低 CL 为 2.324×10^{-6} dB/m.

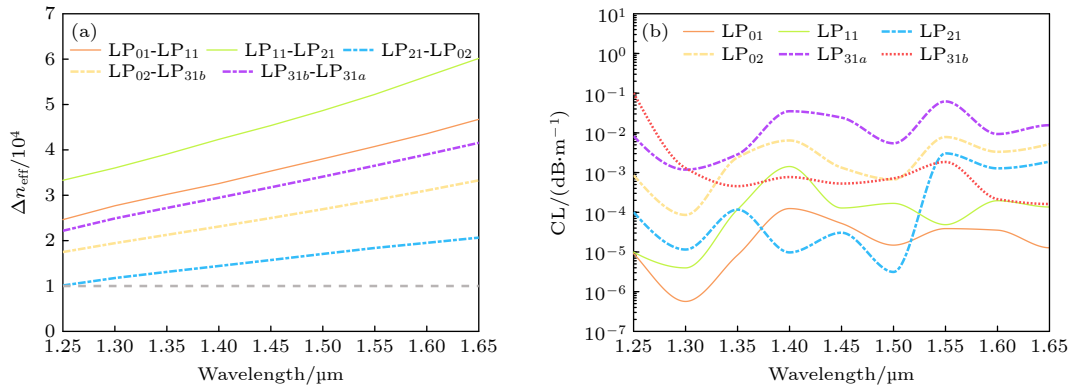

 图 10 嵌套管壁厚参数 t 偏移+1%时, 相邻模式有效折射率差和 CL 的变化

Fig. 10. With nested tube wall thickness parameter t deviation +1%, the change of effective refractive index difference of adjacent mode and CL.

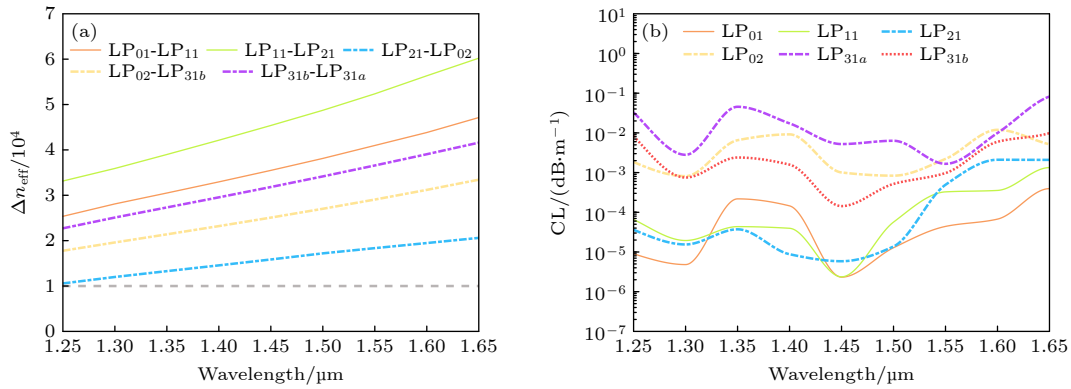

 图 11 嵌套管壁厚参数 t 偏移-1%时, 相邻模式有效折射率差和 CL 的变化

Fig. 11. With nested tube wall thickness parameter t deviation -1%, the change of effective refractive index difference of adjacent mode and CL.

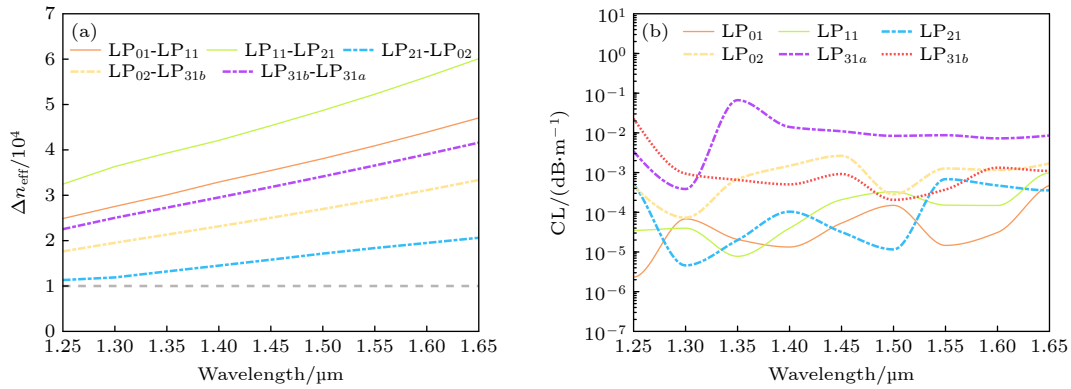

 图 12 参数 k 偏移+1%时, 相邻模式有效折射率差和 CL 的变化

Fig. 12. With parameter k deviation +1%, the change of effective refractive index difference of adjacent mode and CL.

5.2 结构参数 k

少模 HC-NCF 的毛细管除了会导致光泄漏外, 还会直接影响包层模式与纤芯模式的耦合效率, 因此, 接着分别研究了对称嵌套小圆管半径与大包层管环半径之比 (即参数 k) 发生 $\pm 1\%$ 偏差对纤芯各

模式的有效折射率和 CL 的影响. 结果如图 12 和图 13 所示. 由图 12(a) 和图 13(a) 可见, 在 1.25—1.65 μm 波长范围内, 纤芯中相邻两模式之间的有效折射率差均大于 10^{-4} , 表明有效抑制了各模式间的耦合. 从图 12(b) 和图 13(b) 可以看出, LP_{01} , LP_{11}

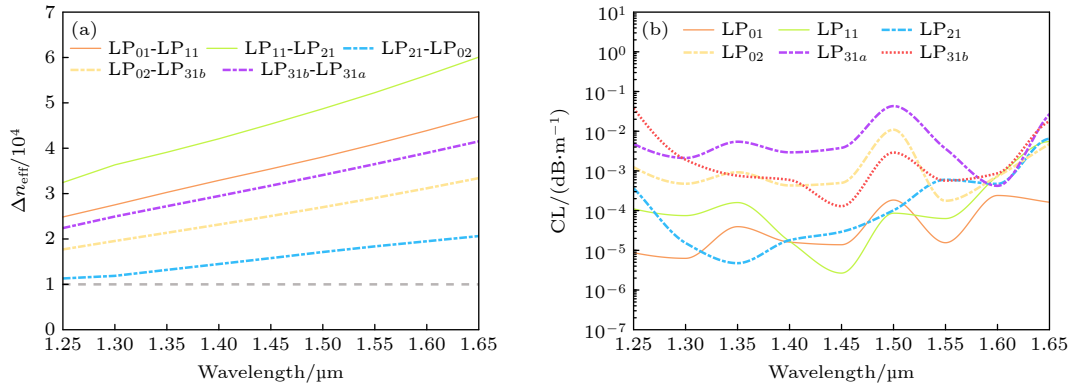


图 13 参数 k 偏移 -1% 时, 相邻模式有效折射率差和 CL 的变化

Fig. 13. With parameter k deviation -1%, the change of effective refractive index difference of adjacent mode and CL.

表 1 少模 HC-NCF 性能比较

Table 1. Performance comparison of few-mode HC-NCF.

结构	中心波长/ μm	支持模式数	基模最低限制损耗/(dB·m ⁻¹)	工作带宽/nm	弯曲半径/cm	弯曲损耗/(dB·m ⁻¹)
Wang Z, et al. (2020) ^[46]	1.55	2	1.7×10^{-4} @1.53 μm	340	10	6.6×10^{-4} (200 nm)
Goel C, et al. (2021) ^[47]	1.00	5	1.4×10^{-5} @1 μm	—	20	5×10^{-3}
Ou J, et al. (2022) ^[48]	1.55	2	7.4×10^{-7} @1.06 μm	800	—	—
Liu H, et al. (2022) ^[49]	1.55	5	3.4×10^{-7} @1.38 μm	300	6	3×10^{-4} (210 nm)
Our work	1.55	6	4.3×10^{-7} @1.4 μm	330	7	4.5×10^{-4} (420 nm)

和 LP₂₁ 模式的 CL 在 10⁻⁵—10⁻³ dB/m 范围内变化, LP₀₂, LP_{31a} 和 LP_{31b} 模式的 CL 在 10⁻⁴—10⁻¹ dB/m 范围内变化, 显然, 当 k 值发生 $\pm 1\%$ 偏差时, 各模式的 CL 在小范围内波动.

最后, 将本文设计的少模 HC-NCF 与文献报道的其他类型 HC-NCF 的主要性能参数作比较, 结果如表 1 所列. 对比的性能参数包括以下 6 个: 中心波长、支持模式数、基模最低限制损耗、工作带宽、弯曲半径、弯曲损耗. 可以看出, 文献报道的少模 HC-NCF 中心波长大部分为 1.55 μm , 支持模式数相对较少, 本文设计的少模 HC-NCF 能够支持 6 种 LP 模式同时独立传输, 具有较大的工作带宽, 同时, 限制损耗和弯曲损耗也比较低, 具有显著优势.

6 结论

本文提出了一种具有对称双环嵌套管包层结构的新型少模 HC-NCF, 可以同时支持 LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁, LP₀₂, LP_{31a}, LP_{31b} 6 种纤芯模式超低损耗独立传输. 使用 FEM 法对光纤传导特性进行分析, 得到 HC-NCF 的最优结构参数为 $g = 0.5 \mu\text{m}$, $k = 0.4$, $R = 24 \mu\text{m}$. 讨论了光纤在不同波长处的

CL, 并且研究了纤芯各模式在不同弯曲半径下的 BL 以及特定弯曲半径下工作波长对 BL 的影响. 结果表明, 在 1.3—1.63 μm 范围内, LP₀₁, LP₁₁ 和 LP₂₁ 模式的 CL 均小于 10⁻³ dB/m, LP₀₂ 和 LP_{31b} 模式的 CL 小于 3×10^{-3} dB/m. 各模式 CL 在 1.4 μm 处达到最低, 其中, 基模 LP₀₁ 模式的最低 CL 为 4.3×10^{-7} dB/m; 此外, 当弯曲半径为 7 cm 时, 各模式均保持低弯曲损耗特性, 在 1.23—1.61 μm 范围, LP₀₁ 的 BL 小于 4.5×10^{-4} dB/m, LP₁₁ 的 BL 小于 1.3×10^{-3} dB/m. 所设计的少模 HC-NCF 在支持 6 种不同模式独立传输的同时, 具有超低 CL 和弯曲不敏感特性, 为模分复用系统的发展提供了器件支撑.

参考文献

- [1] Benabid F, Knight J C, Antonopoulos G, Russell P S J 2002 *Science* **298** 399
- [2] Poletti F, Wheeler N V, Petrovich M N, Baddela N, Fokoua E N, Hayes J R, Gray D R, Li Z, Slavik R, Richardson D J 2013 *Nat. Photonics* **7** 279
- [3] Belardi W, Knight J C 2014 *Opt. Lett.* **39** 1853
- [4] Yu F, Knight J C 2016 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **22** 146
- [5] Hasan M I, Akhmediev N, Chang W 2017 *Opt. Lett.* **42** 703
- [6] Shen W, Du J, Sun L, Wang C, He Z 2020 *J. Lightwave*

- Technol.* **38** 3874
- [7] Liu Z, Karanov B, Galdino L, Hayes J R, Lavery D, Clark K, Shi K, Elson D J, Thomsen B C, Petrovich M N, Richardson D J, Poletti F, Slavik R, Bayvel P 2019 *J. Lightwave Technol.* **37** 909
- [8] Michaud-Belleau V, Fokoua E R N, Bradley T, Hayes J R, Slavik R 2021 *Optica* **8** 216
- [9] Zhu X, Wu D, Wang Y, Yu F, Li Q, Qi Y, Knight J, Chen S, Hu L 2021 *Opt. Express* **29** 1492
- [10] Azendorf F, Schmauss B, Shi B, Fokoua E N, Radan Slavík, Eiselt M 2021 *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC) San Francisco, California United States, June 6–10, 2021* p1
- [11] Liu W, Zheng Y, Wang Z, Wang Z X, Yang J, Chen M X, Qi M, Rehman S U, Shum P P, Zhu L, Wei L 2021 *Adv. Mater. Interfaces* **8** 2001978
- [12] Jérôme F, Cook K T, George A K, Wadsworth W J, Knight J C 2007 *Opt. Express* **15** 7126
- [13] Ulrich A, Maier R R, Yu F, Knight J C, Hand D P, Shephard J D 2013 *Biomed. Opt. Express* **4** 193
- [14] Couch D E, Hickstein D D, Winters D G, Backus S J, Kirchner M S, Domingue S R, Ramirez J J, Durfee C G, Murnane M M, Kapteyn H C 2020 *Optica* **7** 832
- [15] Poletti F 2014 *Opt. Express* **22** 23807
- [16] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, Birks T A, Russell P S, Roberts P J, Allan D C 1999 *Science* **285** 1537
- [17] Roberts P, Coumy F, Sabert H, Mangan B, Williams D, Farr L, Mason M, Tomlinson A, Birks T, Knight J, Russell S J P 2005 *Opt. Express* **13** 236
- [18] Luan F, George A K, Hedley T D, Pearce G J, Bird D M, Knight J C, Russell P S J 2004 *Opt. Lett.* **29** 2369
- [19] Wei C, Weiblen R J, Menyuk C R, Hu J 2017 *Adv. Opt. Photonics* **9** 562
- [20] Jasion G T, Bradley T, Harrington K, Sakr H, Poletti F 2020 *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC) San Diego, California United States, March 8–12, 2020*
- [21] Osório J H, Amrani F, Delahaye F, Dhaybi A, Vasko K, Melli F, Giovanardi F, Vandembroucq D, Tessier G, Vincetti L, Debord B, Jérôme F, Benabid F 2023 *Nat. Commun.* **14** 1146
- [22] Mulvad H C H, Abokhamis Mousavi S, Zuba V, Xu L, Sakr H, Bradley T D, Hayes J R, Jasion G T, Numkam Fokoua E R, Taranta A, Alam S, Richardson D J, Poletti F 2022 *Nat. Photonics* **16** 448
- [23] Ding W, Wang Y Y, Gao S, Wang M, Wang P 2020 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **26** 4400312
- [24] Gao S F, Wang Y Y, Ding W, Jiang D, Gu S, Zhang X, Wang P 2018 *Nat. Commun.* **9** 2828
- [25] Yue B, Feng J, Tao J, Zhou G, Huang X 2021 *Opt. Fiber Technol.* **67** 102734
- [26] Xue L, Sheng X, Jia H, Lou S 2023 *J. Lightwave Technol.* **41** 6043
- [27] Belardi W 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 4497
- [28] Yan S B, Lou S, Wang X, Zhang W, Zhao T 2018 *Opt. Fiber Technol.* **46** 118
- [29] Michieletto M, Lyngsø J K, Jakobsen C, Lægsgaard J, Bang O, Alkeskjold T T 2016 *Opt. Express* **24** 7103
- [30] Zhang X, Feng Z, Marpaung D A, Fokoua E R, Sakr H, Hayes J R, Poletti F, Richardson D J, Slavík R 2022 *Light Sci. Appl.* **11** 213
- [31] Yao C Y, Gao S F, Wang Y Y, Wang P, Jin W, Ren W 2020 *J. Lightwave Technol.* **38** 2067
- [32] Ma X X, Li J S, Guo H T, Li S G, Zhang H, Xu Y T, Meng X J, Guo Y, Chen Q, Wang C J, Cui X W 2023 *Plasmonics* **18** 899
- [33] Zhang H, Chang Y J, Xu Y T, Liu C Z, Xiao X S, Li J S, Ma X X, Wang Y Y, Guo H T 2023 *Opt. Express* **31** 7659
- [34] Zhou Y, Cao R, Wang S, Peng J, Li H, Chu Y, Xing Y, Dai N, Li J 2022 *IEEE Photonics J.* **14** 1
- [35] Zhu Y, Wang S, Chen M, Zuo X, Wang H, Rao C, Xu Y, Ji D, Liu Y 2022 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **34** 283
- [36] Nawazuddin M B, Wheeler N V, Hayes J R, Bradley T D, Sandoghchi S R, Gouveia M A, Jasion G T, Richardson D J, Poletti F 2018 *J. Lightwave Technol.* **36** 1213
- [37] Yan S, Lou S, Lian Z, Zhang W, Wang X 2019 *J. Lightwave Technol.* **37** 5707
- [38] Luo L W, Ophir N, Chen C P, Gabrielli L H, Poitras C B, Bergmen K, Lipson M 2014 *Nat. Commun.* **5** 3069
- [39] Chen Y X, Lin Z J, Bélanger-de Villers S, Rusch L A, Shi W 2020 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **26** 6100107
- [40] Naghshvarianjahromi M, Kumar S, Deen M J, Iwaya T, Kimura K, Yoshida M, Hirooka T, Nakazawa M 2022 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **28** 7500210
- [41] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E 2013 *Nat. Photonics* **7** 354
- [42] Tarighat A, Hsu R C J, Shah A, Sayed A H, Jalali B 2007 *IEEE Commun. Mag.* **45** 57
- [43] Berdagué S, Facq P 1982 *Appl. Opt.* **21** 1950
- [44] Habib M S, Antonio-Lopez J E, Markos C, Schülzgen A, Amezcua-Correa R 2019 *Opt. Express* **27** 3824
- [45] Habib M S, Bang O, Bache M 2016 *Opt. Express* **24** 8429
- [46] Wang Z, Tu J, Liu Z, Yu C, Lu C 2020 *J. Lightwave Technol.* **38** 864
- [47] Goel C, Yoo S 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 6592
- [48] Ou J, Li J P, Zheng W Q, Qin Y W, Xu O, Huang Q D, Peng D, Xiang M, Xu Y, Fu S N 2022 *20th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON) Shenzhen, China, August 12–15, 2022* p1
- [49] Liu H, Wang Y, Zhou Y, Guan Z, Yu Z, Ling Q, Luo S, Shao J, Huang D, Chen D 2022 *Opt. Express* **30** 21833
- [50] Vincetti L, Setti V 2012 *Opt. Express* **20** 14350
- [51] Zhang J, Wang Z, Chen J 2014 *Proc. COMSOL Conf. Shanghai, China 2014* p2
- [52] Litchinitser N M, Abeeck A K, Headley C, Eggleton B J 2002 *Opt. Lett.* **27** 1592
- [53] Vincetti L 2016 *Opt. Express* **24** 10313
- [54] Chen X, Hu X, Yang L, Peng J, Li H, Dai N, Li J 2019 *Opt. Express* **27** 19548
- [55] Wang L, LaRochelle S 2015 *Opt. Lett.* **40** 5846
- [56] Nagano K, Kawakami S, Nishida S 1978 *Appl. Opt.* **17** 2080
- [57] Belardi W, Knight J C 2014 *Opt. Express* **22** 10091
- [58] Pryamikov A D, Biriukov A S, Kosolapov A F, Plotnichenko V G, Semjonov S L, Dianov E M 2011 *Opt. Express* **19** 1441
- [59] Yu F, Wadsworth W J, Knight J C 2012 *Opt. Express* **20** 11153
- [60] Yang S, Sheng X, Zhao G, Lou S, Guo J 2021 *IEEE Access* **9** 29599
- [61] Hayashi J G, Ventura A, Cimek J, Slimen F B, White N, Sakr H, Jasion G T, Wheeler N V, Poletti F 2020 *22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) Bari, Italy, July 19–23, 2020* p1
- [62] Shaha K S R, Khaleque A 2021 *Appl. Opt.* **60** 6243
- [63] Wei C, Weiblen R J, Menyuk C R, Hu J 2017 *Adv. Opt. Photonics* **9** 504

Low-loss weak-coupling 6-mode hollow-core negative curvature fiber based on symmetric double-ring nested tube*

Hui Zhan-Qiang^{1)2)†} Liu Rui-Hua¹⁾ Gao Li-Ming¹⁾ Han Dong-Dong¹⁾²⁾
 Li Tian-Tian¹⁾²⁾ Gong Jia-Min¹⁾²⁾

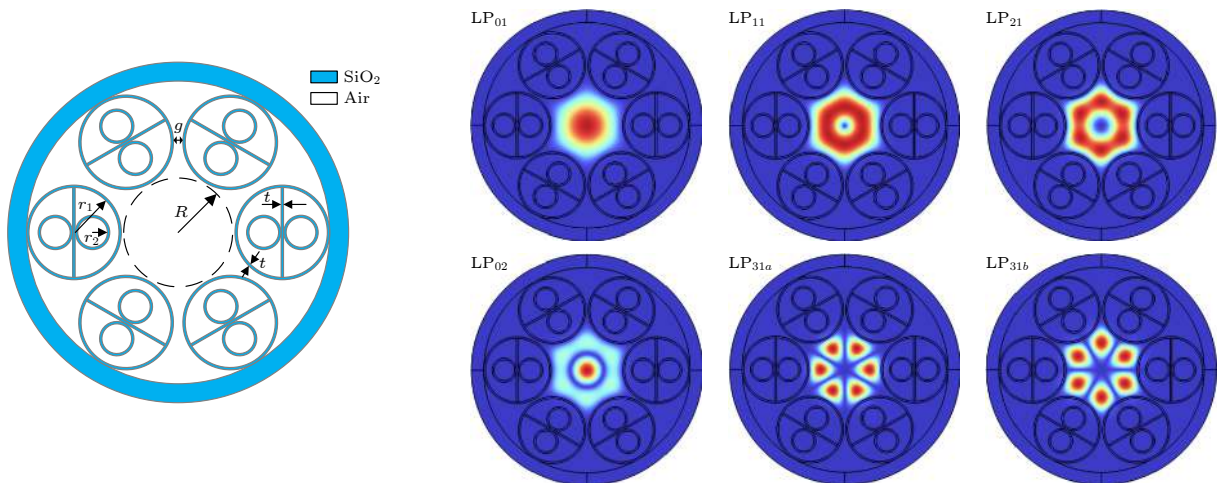
1) (*School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China*)

2) (*Xi'an Key Laboratory of Microwave Photonics and Optical Communication Technology, Xi'an 710121, China*)

(Received 10 November 2023; revised manuscript received 13 January 2024)

Abstract

Few-mode optical fibers have played an increasingly important role in breaking through the transmission capacity limitations of single-mode optical fiber and alleviating the bandwidth crisis in optic fiber communication systems in recent years. Nevertheless, traditional solid core few-mode optical fibers usually suffer optical fiber nonlinearity and mode coupling, leading to mode crosstalk between channels. Hollow core negative curvature fibers (HC-NCF) have attracted widespread attention due to their advantages, such as low latency, low nonlinearity, low dispersion, low transmission loss, and large operating bandwidth. In this work, a novel low-loss few-mode HC-NCF with symmetrically double ring nested tube structure is designed, which supports six core modes including LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} , LP_{31a} , and LP_{31b} . The designed optical fiber is based on silica dioxide substrate and adopts a unique symmetrical double ring nested cladding structure, which can effectively suppress the coupling between the core mode and the cladding mode. The finite element method (FDE) is used to numerically analyze the properties of the proposed few-mode HC-NCF and optimize the structural parameters of the few-mode HC-NCF. Moreover, the confinement loss and bending loss of all core modes are investigated. The simulation results show that the proposed few-mode HC-NCF can support the



* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61875165), the Key Research and Development Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2022GY-008), the Natural Science Research Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2022JQ-638), the Innovation Capability Support Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2022PT-15), the Collaborative Innovation Projects of Education Office of Shaanxi Province, China (Grant No. 20JY060), and the Open Fund for 705 Key Laboratory, China (Grant No. 705JCH2023-3.2).

† Corresponding author. E-mail: zhanqianghui@xupt.edu.cn

independent transmission of six weakly coupled core modes (with the effective refractive index difference greater than 1×10^{-4} between the adjacent core modes, which greatly avoids the coupling between the adjacent modes in the fiber core). In the 400 nm bandwidth (1.23–1.63 μm , covering the O, E, S, C, and L bands), all six modes in the fiber core maintain low loss transmission. Moreover, in the range of 1.3–1.63 μm , the confinement loss (CL) of LP_{01} , LP_{11} and LP_{21} mode are all less than 1×10^{-3} dB/m, and the CL of LP_{02} and LP_{31b} mode are both less than 3×10^{-3} dB/m. The CL of each mode reaches the lowest value at 1.4 μm , and the LP_{01} mode has the lowest CL of 4.3×10^{-7} dB/m. In addition, for a bending radius of 7 cm, each mode maintains the low bending loss characteristic in a certain operating wavelength range. In the range of 1.23–1.61 μm , the BL of LP_{01} is less than 4.5×10^{-4} dB/m, and the BL of LP_{11} is less than 1.3×10^{-3} dB/m. The tolerance analysis shows that even with the deviation of structural parameters of $\pm 1\%$, the few-mode HC-NCF can still maintain the characteristic of low-loss and weak coupling. The designed few-mode HC-NCF has ultra-low CL and bending-insensitive characteristics while supporting independent transmission of six modes, which will find huge potential applications in future high performance mode division multiplexing systems.

Keywords: hollow-core negative curvature fibers, few-mode fibers, confinement loss, bending loss

PACS: 07.60.Vg, 42.81.Qb, 42.81.Dp, 42.81.Uv

DOI: [10.7498/aps.73.20231785](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231785)

基于对称双环嵌套管的低损耗弱耦合六模空芯负曲率光纤

惠战强 刘瑞华 高黎明 韩冬冬 李田甜 巩稼民

Low-loss weak-coupling 6-mode hollow-core negative curvature fiber based on symmetric double-ring nested tube

Hui Zhan-Qiang Liu Rui-Hua Gao Li-Ming Han Dong-Dong Li Tian-Tian Gong Jia-Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 070703 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231785

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231785>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低串扰低弯曲损耗环形芯少模多芯光纤的设计

Design of ring-core few-mode multi-core fiber with low crosstalk and low bending loss

物理学报. 2022, 71(9): 094205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211534>

三层芯结构在单模大模场面积低弯曲损耗光纤中的应用和分析

Application and analysis of three-layer-core structure in single-mode large-mode-area fiber with low bending loss

物理学报. 2021, 70(22): 224214 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210410>

基于嵌套三角形包层结构负曲率太赫兹光纤的研究

Research on negative curvature terahertz fiber based on nested triangle structure cladding

物理学报. 2020, 69(16): 167801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200457>

低差分模式群时延少模光纤的变分法分析及优化

Analysis and optimization of few-mode fibers with low differential mode group delay by variational method

物理学报. 2022, 71(9): 094206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212198>

低损耗大带宽双芯负曲率太赫兹光纤偏振分束器

Dual-core negative curvature fiber-based terahertz polarization beam splitter with ultra-low loss and wide bandwidth

物理学报. 2022, 71(4): 048702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211650>

基于少模长周期光纤叠栅的模式转换器

Superimposed long period gratings based mode converter in few-mode fiber

物理学报. 2019, 68(5): 054204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181674>