

基于双耦合环辅助的低串扰 6-LP 光纤设计

臧鸿飞¹, 田凤^{2*}, 王拥军²¹北京邮电大学电子工程学院信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876;²北京邮电大学天地互联与融合北京市重点实验室, 北京 100876

摘要 为了降低少模光纤中的模间串扰,提出了一种新型双耦合环辅助的少模光纤结构设计。首先用 COMSOL 仿真软件对 6-LP 光纤结构进行建模,并分析了影响模式间耦合的主要因素,然后对双耦合环结构的 5 个参数进行仿真分析。结果表明,在 6-LP 少模光纤中,LP₂₁ 模和 LP₀₂ 模的有效折射率最接近,其差值是影响串扰的主要因素;该结构中 LP₂₁ 模和 LP₀₂ 模的最小模间折射率差为 1.5×10^{-3} ,是同等条件下传统阶跃结构的 1.88 倍,少模光纤中的模间串扰问题得到有效缓解。

关键词 光通信; 模分复用; 少模光纤; 双耦合环结构; 光纤特性

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0306002

1 引言

少模光纤是基于模分复用技术,以相互正交的多个模式为独立信道进行传输的光纤。通常而言,少模光纤中的模式数量为 2~10,少模光纤相较传统单模光纤具有多个独立信道,能够在一定程度上缓解通信容量不足的问题,并且相较于多模光纤,信道数量较少,不同模式间的色散与损耗可控。

在理想情况下,波导中的模式在传输过程中能够保证自身的场分布稳定。然而在实际传输中,由于各种外界条件的干扰以及各种设备制造上的缺陷,导模、包层模之间互有耦合,传输过程中的入射模式可能彼此耦合而发生能量交换,无法保持原有的场分布。导模与导模之间的耦合可能会造成不同模式间的串扰,导模与包层模之间的耦合会引起损耗,影响通信质量^[1-5]。

近年来相关研究提出了多种新型光纤结构用以改进光纤的性能,如弱耦合偏芯少模光纤、空心光纤、偏振光纤等新类型的光纤^[6-10]。本文提出了一个新型双耦合环结构来降低少模光纤中的模间耦合现象,在仿真平台上对该结构进行了仿真验证,并基

于该结构对 6-LP(linear polarization)少模光纤进行了优化设计。

2 双耦合环辅助型四模光纤的设计原理

研究模式间耦合之前首先要确定光纤中传输模式的具体表达,光学上一般用归一化频率 V 来表征^[11]:

$$V = 2\pi a \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} / \lambda = k_0 a n_{co} \sqrt{2\Delta n_{eff}}, \quad (1)$$

式中: a 与 λ 分别代表纤芯半径与工作波长; k_0 代表真空下的波数; Δn_{eff} 代表不同模式的有效折射率的差值; n_{co} 为纤芯折射率; n_{cl} 为包层折射率。归一化常数 b 为

$$b = (n_{eff}^2 - n_{cl}^2) / (n_{co}^2 - n_{cl}^2), \quad (2)$$

式中: n_{eff} 为有效模式折射率。通过 V 与 b 的关系,可以清晰地得到某个模式的截止频率,具体仿真图如图 1 所示。

在前 6 个 LP 模式中,首先需要知道影响模式间串扰的最主要因素。因此,本文以阶跃折射率结构为基础,采用表 1 所示结构参数,用 COMSOL 软件进行了 6-LP 少模光纤的建模,其中 Δn_1 为芯包

收稿日期: 2021-04-13; 修回日期: 2021-05-27; 录用日期: 2021-06-08

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB180100)、国家自然科学基金(62021005, 61875248, 61727817, 6202780085)

通信作者: *tianfeng@bupt.edu.cn

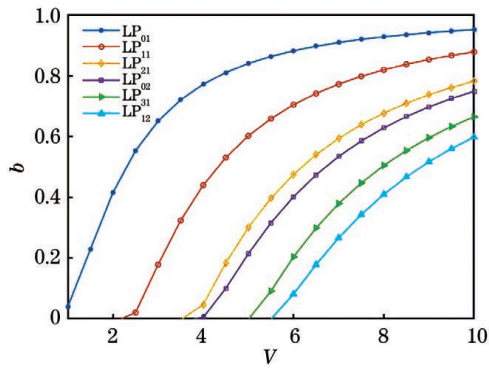


图 1 阶跃光纤 6-LP 模式的 V 与 b 的关系曲线
Fig. 1 V of 6-LP modes in step fiber versus b

折射率差值, w 为沟槽宽度, a_{cladding} 为包层半径, Δn_1 为纤芯沟槽折射差值。对前 6 个 LP 模式的有效折射率以及有效模场面积(A_{eff})进行了仿真, 结果如

表 1 6-LP 少模光纤的结构参数

Table 1 Structural parameters of 6-LP few-mode fiber

Parameter	$a / \mu\text{m}$	$\Delta n_1 / \%$	$w / \mu\text{m}$	$a_{\text{cladding}} / \mu\text{m}$	$\Delta n_1 / \%$	n_{cl}
Value	8.3	0.82	4.15	80	-0.7	1.444

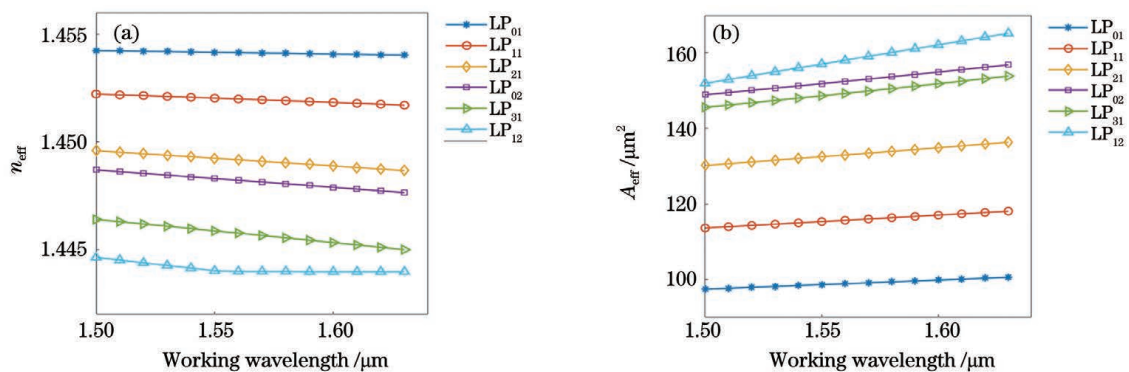


图 2 阶跃光纤 6 个 LP 模式的仿真结果。(a) 有效模式折射率随工作波长的变化;(b) 有效模场面积随工作波长的变化
Fig. 2 Simulated results of 6-LP modes in step fiber. (a) Effective mode refractive index versus working wavelength;
(b) effective mode field area versus working wavelength

增大纤芯与包层间的折射率差值是提高模式间有效折射率差的最有效且直观的方式,但在归一化频率 V 与模式数目都被限定的条件下,较大的芯包折射率差会导致较小的 A_{eff} ,非线性效应的抑制效果明显减弱。在阶跃折射率光纤中, A_{eff} 与 Δn_{eff} 间的折中关系限制了光纤的整体性能^[6]。

针对这一难题,本文设计了图 3(d)所示的双耦合环辅助结构,该结构相比于普通的阶跃结构多了两部分:纤芯中心的低折射率耦合环与对称分布的高折射率耦合环。利用高、低折射率环能够对纤芯中模式的有效折射率进行精确控制。如果在 LP_{02} 模功率最低的位置添加一个高折射率环形结构,该结构与 LP_{02} 模的交叠积分很小,而与 LP_{21} 模具有

图 2 所示,其中 A_{eff} 为有效模场面积。

由图 2(a)可知,在整个 C 波段 + L 波段, LP_{21} 与 LP_{02} 两个模式之间的有效折射率是最接近的,这两个模式之间的有效折射率差值最小。 LP_{21} 与 LP_{02} 两个模式的有效折射率在 1550 nm 处分别为 1.4492 与 1.4483,差值为 0.9×10^{-3} 。 LP_{21} 与 LP_{02} 两个模式的有效折射率差是 6-LP 少模光纤中模间串扰的主要影响因素,因此增大 LP_{21} 与 LP_{02} 模式间的 Δn_{eff} 是提升光纤综合性能的关键,这与相关文献的结论^[5]相符。而由图 2(b)所知,随着工作波长的变化, A_{eff} 呈线性变化,且该光纤中最小 A_{eff} 对应的是 LP_{01} 模,因此在之后的仿真中,本文只给出 LP_{01} 模的 A_{eff} 变化曲线图。

较大的交叠积分。因此, LP_{21} 模的 n_{eff} 会显著增加,而 LP_{02} 模的 n_{eff} 几乎不受影响。如果在 LP_{21} 模功率最低的位置添加一个低折射率环形结构,该结构与 LP_{21} 模的交叠积分很小,而与 LP_{02} 模具有较大的交叠积分。因此, LP_{02} 模的 n_{eff} 会显著减小,而 LP_{21} 模的 n_{eff} 几乎不受影响。 LP_{21} 模与 LP_{02} 模之间的 Δn_{eff} 会显著增大。图 3(a)、(b)分别表示该结构下的 LP_{21} 模与 LP_{02} 模的模场分布情况。

需要注意的是,根据图 3(a)、(c)可以看出, LP_{21} 与 LP_{31} 模场的空间位置重叠性很高,这会导致 LP_{21} 与 LP_{31} 模场的变化趋势相同,而双耦合环的作用是通过结构设计增大 LP_{21} 模的 n_{eff} 并减小 LP_{02} 模的 n_{eff} ,这必然会导致 LP_{31} 模的 n_{eff} 增大,造

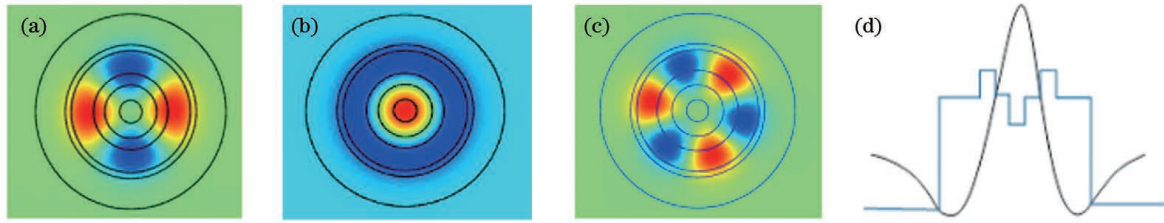


图 3 双耦合环辅助少模光纤中的模场分布。(a) LP_{21} 模场分布;(b) LP_{02} 模场分布;(c) LP_{31} 模场分布;(d) LP_{02} 模场与双耦合环辅助结构的交叠示意图

Fig. 3 Mode field distributions in double coupling ring assisted few-mode fiber. (a) LP_{21} mode field distribution; (b) LP_{02} mode field distribution; (c) LP_{31} mode field distribution; (d) overlapping diagram of LP_{02} mode field and auxiliary structure of double coupling ring

成 LP_{21} 与 LP_{02} 模之间的 Δn_{eff} 增加且 LP_{31} 与 LP_{02} 模之间的 Δn_{eff} 减小。而 LP_{31} 与 LP_{02} 之间的 Δn_{eff} 并不是无限大,因此,当达到某一个临界值时, $|\Delta n_{eff}|$ 最小值的主要影响因素会由 LP_{21} 、 LP_{02} 模转向 LP_{31} 、 LP_{02} 模。最理想的情况是使 LP_{21} 、 LP_{02} 模的 n_{eff} 分别与 LP_{31} 、 LP_{02} 模的 n_{eff} 相等,此时 $|\Delta n_{eff}|$ 最小值达到最大。

通过不断调测双耦合环结构的参数数值,可以得到不同 LP 模式 n_{eff} 的数值分布,对数值分布进行分析,就能确认光纤结构参数值的最优解。

3 仿真验证及结果

用 COMSOL 仿真软件对双耦合环辅助结构进行了光纤建模,纤芯折射率剖面及几何构造如图 4 所示。

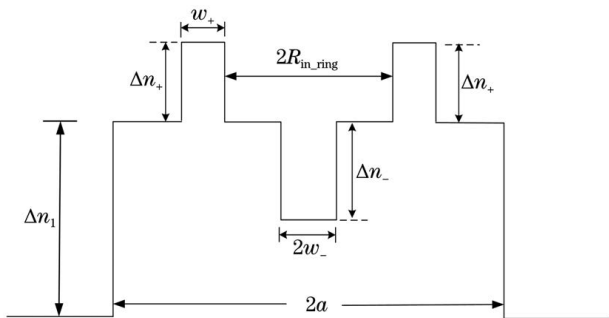


图 4 双耦合环辅助结构的折射率分布示意图

Fig. 4 Schematic of refractive index distribution in auxiliary structure of double coupling ring

在图 4 中, Δn_+ 表示高折射率耦合环与纤芯之间的相对有效折射率差, Δn_- 表示低折射率耦合环与纤芯之间的相对有效折射率差, w_+ 与 w_- 分别表示高、低折射率环的宽度, $R_{in,ring}$ 表示高折射率耦合环的内圆半径。

图 4 所示双耦合环辅助结构有 5 个主要参数:

Δn_+ , Δn_- , w_+ , w_- , $R_{in,ring}$ 。任何一个参数的改变都会影响少模光纤中 Δn_{eff} 的数值,6-LP 少模光纤 5 个参数的仿真结果如图 5~9 所示。

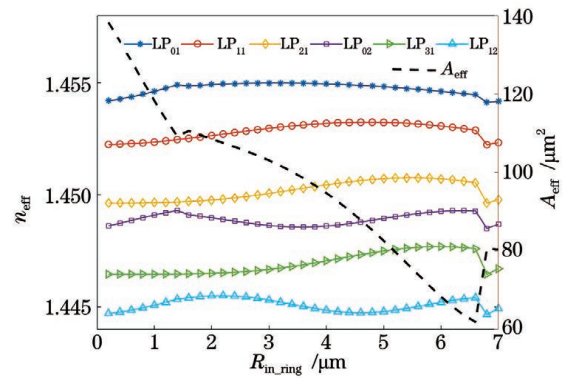


图 5 高折射率耦合环的内圆半径对有效模式折射率及 LP_{01} 有效模场面积的影响

Fig. 5 Influences of inner circle radius of high refractive index coupling ring on effective mode refractive index and effective mode field area of LP_{01}

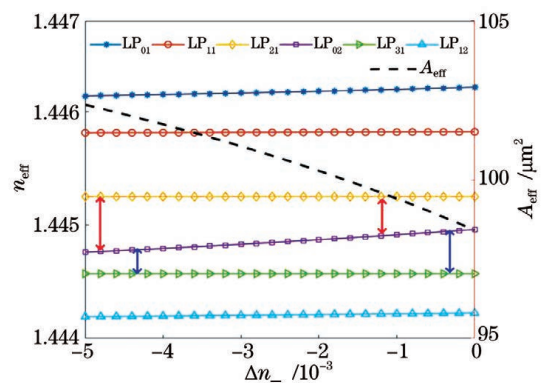


图 6 低折射率耦合环的折射率对有效模式折射率及 LP_{01} 有效模场面积的影响

Fig. 6 Influences of low refractive index coupling ring on effective mode refractive index and effective mode field area of LP_{01}

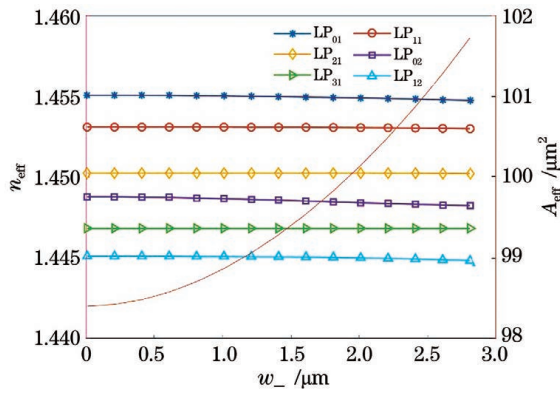


图 7 低折射率耦合环的宽度对有效模式折射率及 LP₀₁ 有效模场面积的影响

Fig. 7 Influences of width of low refractive index coupling ring on effective mode refractive index and effective mode field area of LP₀₁

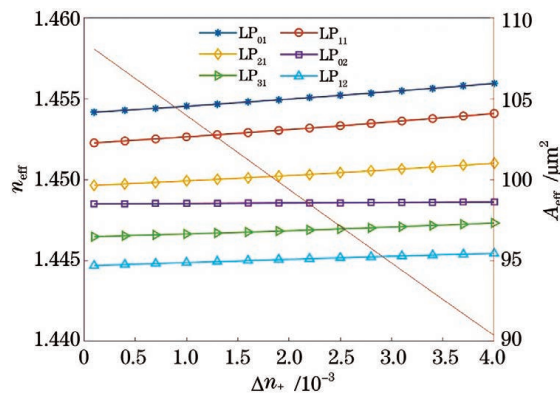


图 8 高折射率耦合环的折射率对有效模式折射率及 LP₀₁ 有效模场面积的影响

Fig. 8 Influences of refractive index of high refractive index coupling ring on effective mode refractive index and effective mode field area of LP₀₁

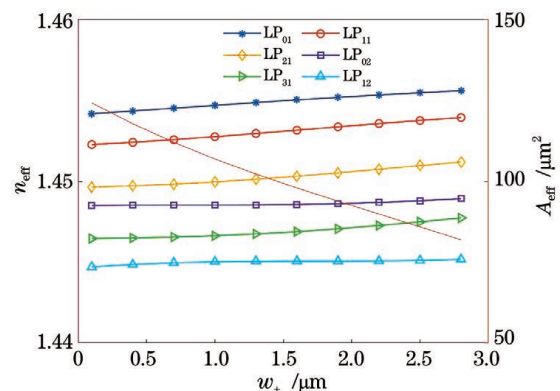


图 9 高折射率耦合环的宽度对有效模式折射率及有效模场面积的影响

Fig. 9 Influences of width of high refractive index coupling ring on effective mode refractive index and effective mode field area

3.1 高折射率耦合环的内圆半径

设定参数 Δn_+ , Δn_- , ω_+ , ω_- 分别为 0.2%, -0.1%, 1.5 μm , 1.5 μm , 在 0~7 μm 区间对 $R_{\text{in_ring}}$ 进行参数化扫描, 得到图 5 所示的结果。从图 5 中可以看出, $R_{\text{in_ring}}$ 对 Δn_{eff} 与 A_{eff} 的影响较大。 $R_{\text{in_ring}}$ 对 Δn_{eff} 的影响先增大后减小, 在 $R_{\text{in_ring}} = 1.5 \mu\text{m}$ 之前, LP₀₂ 模的有效折射率快速上升, LP₂₁ 模的有效折射率近似不变, 这一阶段光纤的 Δn_{eff} 甚至低于没有辅助结构时的 Δn_{eff} 。这是由于这个位置太靠近纤芯中央, 高折射率耦合环没有作用于 LP₂₁ 模反而作用于 LP₀₂ 模, 进一步增大了 LP₀₂ 模的有效折射率, 使其与 LP₂₁ 模之间的 Δn_{eff} 减小。在 $R_{\text{in_ring}} = 1.5 \mu\text{m}$ 之后, Δn_{eff} 的值随着 $R_{\text{in_ring}}$ 的增加而变大, 大概在 $R_{\text{in_ring}} = 3.5 \mu\text{m}$ 左右达到最大值。由于 LP₃₁ 模的模场分布与 LP₂₁ 模类似, 如图 3(a)、(c) 所示, 可以看出, 图 5 中 LP₃₁ 模的有效折射率的变化曲线与 LP₂₁ 模基本一致, 因此在 $R_{\text{in_ring}} > 3.5 \mu\text{m}$ 时, LP₃₁ 模的有效折射率快速增长, LP₀₂ 模与 LP₃₁ 模之间的 Δn_{eff} 超过 LP₀₂ 模与 LP₂₁ 模之间的 Δn_{eff} , 成为最小模式间折射率差, Δn_{eff} 的值随着 $R_{\text{in_ring}}$ 的继续增加而减小。

基模的 A_{eff} 也呈现出一个先增后减的趋势, 并且变化的区间跨度很大, 在 60~140 μm^2 区间变化, 其中在 $R_{\text{in_ring}} = 1.5 \mu\text{m}$ 处有一个明显的拐点。这是由于高折射率耦合环的位置变化使 LP₀₁ 模场与高折射率环的重叠面积发生变化, $R_{\text{in_ring}}$ 较小时, 重叠面积较大, 因此 A_{eff} 数值明显大很多, 达到了 140 μm^2 , 远超正常结构的 100 μm^2 。随着 $R_{\text{in_ring}}$ 的进一步增大, 重叠面积逐渐减小, 在 $R_{\text{in_ring}} = 1.5 \mu\text{m}$ 之后, 高折射率耦合环对基模的影响很小, 基模 A_{eff} 主要受低折射率耦合环的影响, 下降速度变缓。

3.2 低折射率耦合环的折射率

由图 6 可以看出, 随着 Δn_- 的不断减小, 即低折射率耦合环深度的不断增加, LP₀₂ 模式的有效折射率不断降低, 而其他 5 个模式的有效折射率近乎不变, 这就导致 LP₂₁ 模与 LP₀₂ 模之间的 Δn_{eff} 逐渐增大, 进而有效地减弱了模式间的串扰。需要注意的是, 随着 LP₀₂ 模式有效折射率的不断降低, LP₀₂ 模与 LP₃₁ 模之间的 Δn_{eff} 会逐渐增大, 在 $\Delta n_- = -2 \times 10^{-3}$ 处, LP₀₂ 模与 LP₃₁ 模之间的 Δn_{eff} 超过 LP₀₂ 模与 LP₂₁ 模之间的 Δn_{eff} , 成为最小模式间折射率差。因此, 模式间最小 Δn_{eff} 的数值会随着低折射率耦合环深度的增加先增大后减小, 这是由于存在一个转折点, 模式间最小 Δn_{eff} 的主要影响因素由

LP₃₁ 模转向 LP₂₁ 模。

由图 6 还可以看出, Δn_- 对基模的有效模场面积有积极作用, 当 Δn_- 为 0 时, 代表无低折射率耦合环结构, 此时的 A_{eff} 是最小的, 随着低折射率耦合环深度的不断增加, A_{eff} 不断变大, 但变化的数值维持在一个较小的区间内, 为 $98 \sim 103 \mu\text{m}^2$, 变化曲线相对平缓且几乎呈线性变化。

3.3 低折射率耦合环的宽度

由图 7 可以看出, ω_- 的变化主要影响 LP₀₂ 模, 随着低折射率耦合环宽度的增加, LP₀₂ 模的有效折射率依然呈下降趋势; 而 ω_- 的变化对 LP₂₁ 模与 LP₃₁ 模的影响近似于 0, 这也导致 6-LP 光纤整体 Δn_{eff} 随 ω_- 的变化情况与整体 Δn_{eff} 随 Δn_- 的变化情况相同, 都是先增加后减小, 原因也是转折点的存在使模式间最小 Δn_{eff} 的主要影响因素由 LP₃₁ 模转向 LP₂₁ 模, 转折点在 $\omega_- = 1.5 \mu\text{m}$ 左右; A_{eff} 会随着低折射率耦合环宽度的增加而增大, 但数值变化在 $98 \sim 102 \mu\text{m}^2$ 之间, 变化幅度仍然较小。

综上可以得到结论: 在 6-LP 少模光纤中, 低折射率耦合环的宽度和深度的增加会使模式间最小 Δn_{eff} 的数值先增大后减小, 同时使得基模的 A_{eff} 增大, 但增大效果有限, 并且 LP₀₂ 模的有效折射率降低。这是由于低折射率耦合环宽度和深度的增加都会影响 LP₀₂ 的模场, 而对 LP₂₁ 与 LP₃₁ 模场的影响较小, 在低折射率耦合环参数不断改变的过程中, 低折射率耦合环辅助结构与 LP₂₁、LP₃₁ 模的模场交叠很小而与 LP₀₂ 模的模场交叠很大。在该 6-LP 少模光纤中, 可选取转折点 $\Delta n_- = -2 \times 10^{-3}$, $\omega_- = 1.5 \mu\text{m}$ 。

3.4 高折射率耦合环的折射率

高折射率耦合环结构主要对 LP₂₁ 与 LP₃₁ 模产生影响, 这两个模式的有效折射率都随着高折射率耦合环折射率的增加而增加, 而 LP₀₂ 模的 n_{eff} 近似不变, 导致 Δn_{eff} 先增加后减小, 当 Δn_+ 约为 2×10^{-3} 时, LP₀₂ 模、LP₃₁ 模之间的 Δn_{eff} 与 LP₀₂ 模、LP₂₁ 模之间的 Δn_{eff} 近似相等。由图 8 可以看出, 高折射率耦合环对基模有效模场面积的影响比低折射率耦合环的影响更大, 基模有效模场面积的波动范围在 $90 \sim 110 \mu\text{m}^2$ 之间, 且有效模场面积的大小随着高折射率耦合环宽度的增加而减小。

3.5 高折射率耦合环的宽度

设定 Δn_+ , Δn_- , ω_- , $R_{\text{in_ring}}$ 分别为 0, 2%, -0.1% , $1.5 \mu\text{m}$, $3.5 \mu\text{m}$, 研究 ω_+ 的变化对 Δn_{eff} 的影响, 结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 随着

高折射率耦合环宽度的增大, LP₀₂ 模的有效折射率依然变化不大, 而 LP₂₁ 模与 LP₃₁ 模则呈现上升趋势, 在 $\omega_+ = 1.8 \mu\text{m}$ 附近, LP₀₂ 模、LP₃₁ 模之间的 Δn_{eff} 与 LP₀₂ 模、LP₂₁ 模之间的 Δn_{eff} 近似相等。

综上可以得到结论: 高折射率耦合环的作用与低折射率耦合环的作用刚好相反, 前者主要是影响 LP₂₁ 模与 LP₃₁ 模的模场, 其高度与宽度的改变也会影响与 LP₂₁ 模与 LP₃₁ 模的模场交叠大小, 在合适位置处, 高折射率耦合环结构会与这两个模式的模场充分交叠, 进而使有效折射率显著上升。从图 8、9 中也可以看出, LP₀₂ 模的有效折射率近乎不变, 而模式间最小 Δn_{eff} 的数值先增大后减小。与低折射率耦合环不同的是, 高折射率耦合环的 Δn_+ 与 ω_+ 的增加都会导致 A_{eff} 的降低, 但同样会导致 LP₃₁ 模与 LP₀₂ 模的有效折射率差减小, 所以应选择合适的 Δn_+ 与 ω_+ , 使得 LP₀₂ 模、LP₃₁ 模之间的 Δn_{eff} 与 LP₀₂ 模、LP₂₁ 模之间的 Δn_{eff} 近似相等。

少模光纤设计中模式的弯曲损耗是关键参数^[12], 因此本文仿真分析了弯曲损耗变化情况, 6-LP 光纤中的基模弯曲损耗随工作波长的变化曲线如图 10 所示。

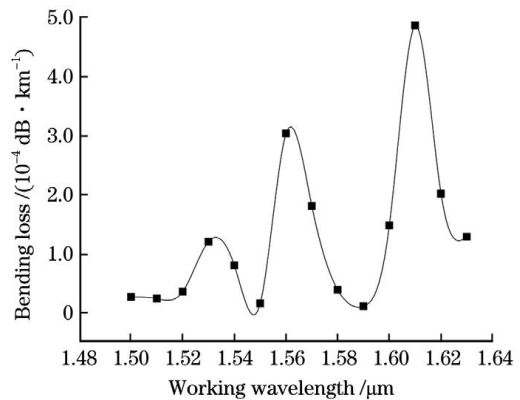


图 10 LP₀₁ 模的弯曲损耗随工作波长的变化

Fig. 10 Bending loss of LP₀₁ versus working wavelength

从图 10 中可以看出, 弯曲损耗随着波长的增大呈现出振荡增加的趋势, 说明在短波长段, 光纤的抗弯曲性能更佳。振荡现象是光纤中的基模和包层、涂覆层中传播的回廊模之间的耦合引起的。当两种模的相位同步(同向耦合)时, 弯曲损耗达到最大值; 反之, 异向耦合时, 弯曲损耗达到最小值^[13]。图 11 所示为弯曲损耗随弯曲半径的变化曲线图, 越高阶的模式, 其弯曲损耗对弯曲半径的变化越敏感, 因此本文只给出 6-LP 光纤中 LP₁₂ 模的弯曲损耗随弯曲半径的变化关系。从图 11 中可以看出, 弯曲损耗的数值随弯曲半径的增加而减小, 变化趋势为先急剧

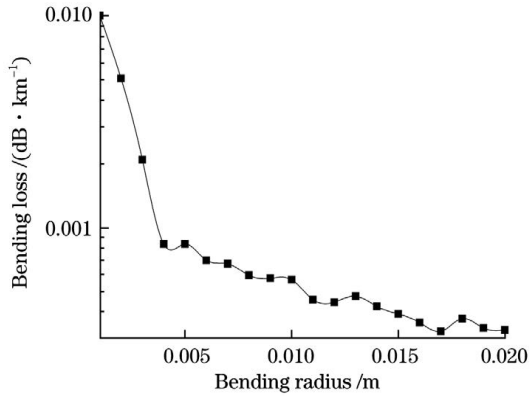


图 11 LP₁₂ 模的弯曲损耗随弯曲半径的变化

Fig. 11 Bending loss of LP₁₂ mode versus bending radius
降低后趋于平稳。

4 6-LP 少模光纤的参数及性能

基于上述仿真与结论,设计了一种双耦合环辅助型 6-LP 少模光纤,具体参数如表 2 所示。基于表 2 中的结构参数,使用 COMSOL 软件进行建模,仿真后得出 1550 nm 工作波长下的光学性能参数值,如表 3 所示。从表 3 中可以看出,所设计的双耦合环辅助型 6-LP 少模光纤的任意两个 LP 模式间的有效折射率差都在 1.5×10^{-3} 以上,LP₂₁ 与 LP₀₂ 模式间的有效折射率差为该光纤的最小有效折射率差值,为 1.5×10^{-3} 。仿真结果表明,新型双耦合环结构能够有效降低模式间的串扰,提高通信质量。

表 2 所设计的双耦合环辅助型 6-LP 少模光纤的结构参数

Table 2 Structural parameters of designed double coupling ring assisted 6-LP few-mode fiber

Parameter	$a / \mu\text{m}$	$\Delta n_1 / \%$	$R_{\text{in,ring}} / \mu\text{m}$	$w_+ / \mu\text{m}$	$\Delta n_+ / \%$	$w_- / \mu\text{m}$	$\Delta n_- / \%$
Value	8.3	0.8	3.5	2	0.25	1.5	-0.2

表 3 双耦合环辅助型 6-LP 少模光纤在 1550 nm 波长下的性能参数

Table 3 Performance parameters of double coupling ring assisted 6-LP few-mode fiber at 1550 nm wavelength

Performance parameter	LP ₀₁	LP ₁₁	LP ₂₁	LP ₀₂	LP ₃₁	LP ₁₂
n_{eff}	1.4540	1.4522	1.4497	1.4482	1.4464	1.4446
$A_{\text{eff}} / \mu\text{m}^2$	129	161	184	176	193	183
Differential mode delay / (ps · m ⁻¹)	-	4.9	11.2	13.1	18.5	21.4
Dispersion / (ps · nm ⁻¹ · km ⁻¹)	2.9	7.9	13.4	13.9	18.8	14.7
Minimum value of $ \Delta n_{\text{eff}} $	1.5×10^{-3} @ LP ₂₁ and LP ₀₂					

当其他条件相同时,对普通阶跃纤芯结构与所设计的双耦合环辅助结构 6-LP 少模光纤进行了仿真对比。由表 3 得知,所设计光纤的最小模式有效折射率差仍然是 LP₂₁ 与 LP₀₂ 模的有效折射率差,因此只给出 LP₂₁ 与 LP₀₂ 模的有效折射率变化曲

线,如图 12 所示。1550 nm 波长处阶跃结构的两个模式间的有效折射率差值为 0.8×10^{-3} ,而加上双耦合环后,差值变为 1.5×10^{-3} ,双耦合环结构将 LP₂₁ 与 LP₀₂ 模的有效折射率差值扩大为原来的 1.88 倍,远远满足模式间折射率差值大于 1×10^{-3}

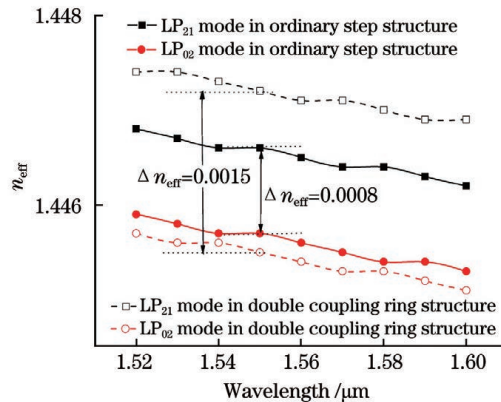


图 12 普通阶跃结构与双耦合环结构的 LP₂₁ 与 LP₀₂ 模的有效折射率对比图

Fig. 12 Comparison of effective refractive indexes of LP₂₁ and LP₀₂ modes in ordinary step structure and double coupling ring structure

的最低要求,有效地降低了模间串扰。

5 结 论

设计了一种双耦合环辅助型 6-LP 少模光纤,仿真分析了 6-LP 光纤中模式间串扰的主要影响因素,研究了双耦合环结构的作用原理,仿真分析了双耦合环结构 5 个结构参数对模间串扰与有效模场面积的影响。结果表明, Δn_{eff} 过大容易导致明显的模间串扰,增大 LP_{21} 与 LP_{02} 模间的 Δn_{eff} 是提升弱耦合少模光纤综合性能的关键,对于前 6 个 LP 模式, LP_{21} 与 LP_{02} 模式的 n_{eff} 是最接近的;双耦合环辅助型 6-LP 少模光纤与阶跃折射率 6-LP 光纤相比,将最小模间有效折射率差值提高为原来的 1.88 倍,能有效降低模式间的串扰。

参 考 文 献

- [1] Kao K C, Hockham G A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1966, 113(7): 1151-1158.
- [2] Kapron F P, Keck D B, Maurer R D. Radiation losses in glass optical waveguides[J]. Applied Physics Letters, 1970, 17(10): 423-425.
- [3] Imamura K, Tsuchida Y, Mukasa K, et al. Investigation on multi-core fibers with large A_{eff} and low micro bending loss[J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10595-10603.
- [4] Maruyama R, Kuwaki N, Matsuo S, et al. Relationship between mode coupling and fiber characteristics in few-mode fibers analyzed using impulse response measurements technique[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(4): 650-657.
- [5] Jiang S L. Weakly-coupled space division multiplexing optical fibers and key components for large-capacity optical fiber communication[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
姜寿林. 面向大容量光纤通信的弱耦合空分复用光纤及关键器件[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [6] 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.
- [7] Zhang J Y, Ren F, Zhang Y Y, et al. Design and analysis of weakly-coupled eccentric-core few-mode fiber for sensing application[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2406001.
张金玉, 任芳, 张艺赢, 等. 面向传感应用的弱耦合偏芯少模光纤设计与分析[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2406001.
- [8] Zhang J Q, Zhang M, Yin J D, et al. Design of low loss hollow-core anti-resonance fiber for 3 μm spectral region[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1723001.
张家强, 张敏, 尹金德, 等. 3 μm 波段低损耗抗弯曲反谐振空芯光纤设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1723001.
- [9] Liu C, Pei L, Xie Y H, et al. Design of low crosstalk few mode multi-core fiber based on heterogeneous structure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1106004.
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]. 中国激光, 2020, 47(11): 1106004.
- [10] Zhu F X, Chen H, Yin J D, et al. Radially polarized field fiber based on circularly symmetric radial birefringence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0101005.
朱方祥, 陈浩, 尹金德, 等. 基于圆对称径向双折射的径向偏振场光纤[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0101005.
- [11] 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.
- [12] Koch B, Noé R, Sandel D, et al. 200-Gbit/s, 430-km PDM-RZ-DQPSK (4 bit/symbol) Transmission with 10 krad/s Endless Polarization Tracking[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 21-25, 2010, San Diego, California. Washington, D. C.: OSA, 2010: OThD4.
- [13] Harris A, Castle P. Bend loss measurements on high numerical aperture single-mode fibers as a function of wavelength and bend radius[J]. Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(1): 34-40.

Design of Low Crosstalk Double Coupling Ring Assisted 6-LP Fiber

Zang Hongfei¹, Tian Feng^{2*}, Wang Yongjun²

¹ State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

² Beijing Key Laboratory of Space-Round Interconnection and Convergence, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract

Objective In the design of a few-mode fiber, the inter-mode coupling phenomenon is a problem that cannot be avoided. The weakly coupled mode division multiplexing system has a simple structure, low cost, and a wide range of applications. However, the inter-mode coupling phenomenon leads to instability between signal transmissions. This restricts the application of an optical fiber in media and long-distance transmissions. In a weakly coupled mode division multiplexing system where each mode or mode group is transmitted as an independent channel, the direct detection of intensity modulation can be realized and the cost is low. The key of the weak coupling mode division multiplexing technology lies in the highly selective mode excitation and the low-mode crosstalk characteristics of the few-mode fiber. The fiber mode crosstalk caused by the imperfection of the fiber and the environmental disturbance accumulates with the distance, so the transmission distance is limited, which is more suitable for short-distance application scenarios such as access networks and data centers. This paper focuses on the study of low mode coupling in the weakly coupled mode division multiplexing systems, and proposes a new type of fiber with low mode coupling, whose effectiveness is validated by simulation. Finally, a 6-LP few-mode fiber based on the dual coupling ring structure is designed.

Methods Firstly, COMSOL modeling is carried out based on the step 6-LP few-mode fiber, and the main influencing factors of the coupling between modes in the 6-LP few-mode fiber are discussed. The simulation analysis shows that the key to reducing the crosstalk between modes of the few-mode fiber is to increase the effective refractive index difference between LP_{21} and LP_{02} . Then, based on the electric field distributions of the 6 modes, a new type of dual coupling ring assisted few-mode fiber structure is designed. After COMSOL modeling, the simulation analysis is performed on the five specific parameters of the double coupling loop structure, and the change trend of the coupling size between the modes under different parameters is obtained. Finally, a 6-LP few-mode fiber based on this structure is designed, and the advantages of this 6-LP fiber compared with ordinary step 6-LP fibers are analyzed by simulation.

Results and Discussions The simulation results of this paper show that in the 6-LP few-mode fiber, the effective mode refractive index difference of LP_{21} and LP_{02} modes is the closest, and the difference is the main factor affecting crosstalk (Fig. 2). Based on the analysis of the spatial distributions of the 6-LP modes, a dual coupling ring assisted few-mode fiber structure (Fig. 4) is designed, which has two more parts than the ordinary step structure: the low refractive index coupling ring in the center of the fiber core and the symmetrically distributed high refractive index coupling ring. The existence of the high and low refractive index ring can accurately control the effective refractive index of the mode in the core. Because a high-refractive-index ring structure is added at the position where the power of the LP_{02} mode is the lowest, the overlap integral between the structure and the LP_{02} mode is small, but it has a larger overlap integral with the LP_{21} mode. Therefore, the effective mode index (n_{eff}) of the LP_{21} mode increases significantly, while the n_{eff} of the LP_{02} mode is almost unaffected. Similarly, if a low refractive index ring structure is added at the position where the power of the LP_{21} mode is the lowest, the overlap integral between the structure and the LP_{21} mode is small, but it has a larger overlap integral with the LP_{02} mode. Therefore, the n_{eff} of the LP_{02} mode is significantly reduced, while the n_{eff} of the LP_{21} mode is almost unaffected. In this way, the difference of effective mode refractive index (Δn_{eff}) between the LP_{21} mode and the LP_{02} mode will increase significantly. Based on this structure, the specific parameters of 6-LP few-mode fiber are designed (Table 2). In this structure, the minimum refractive index difference between LP_{21} and LP_{02} is 1.5×10^{-3} , which is 1.88 times the minimum refractive index difference of the traditional step structure under the same conditions (Fig. 12).

Conclusions In order to reduce the problem of inter-mode crosstalk in the low-mode fiber, a new type of dual coupling ring assisted few-mode fiber structure design is proposed, the main influencing factors of crosstalk in the 6-LP mode are analyzed, and five main structural parameters of the new dual coupling ring structure are simulated and analyzed. Based on this designed structure, a 6-LP few-mode fiber is developed, which reduces the inter-mode crosstalk in the few-mode fiber. The results show that in the 6-LP few-mode fiber, the effective mode refractive index difference between the LP_{21} mode and the LP_{02} mode is the closest, and the difference is the main factor affecting crosstalk. The double coupling ring structure adjusts the effective mode refractive indices of the LP_{21} mode and the LP_{02} mode. In this structure, the minimum refractive index difference between LP_{21} and LP_{02} is 1.5×10^{-3} , which is 1.88 times the minimum refractive index difference of the traditional step structure under the same conditions.

Key words optical communications; mode division multiplexing; few-mode fiber; double coupling ring structure; fiber properties