物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

低串扰低弯曲损耗环形芯少模多芯光纤的设计

张媛　姜文帆　陈明阳

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

Zhang Yuan　Jiang Wen-Fan　Chen Ming-Yang

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 71, 094205 (2022)　DOI: 10.7498/aps.71.20211534
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.71.20211534
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

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

一种沟槽辅助气孔隔离的低串扰高密度异质多芯少模光纤
A low-crosstalk and high-density multi-core few-mode fiber based on heterogeneous core and trench-assisted air-holes isolation
物理学报. 2022, 71(2): 024205　https://doi.org/10.7498/aps.71.20210974

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
Double-trench assisted thirteen-core five-mode fibers with low crosstalk and low non-linearity
物理学报. 2021, 70(10): 104208　https://doi.org/10.7498/aps.70.20201825

开放式多通道多芯少模光纤表面等离子体共振生物传感器
Multi-channel few-mode multicore fiber based surface plasmon resonance biosensor with open air-hole
物理学报. 2020, 69(13): 137802　https://doi.org/10.7498/aps.69.20200353

一种基于三芯光子晶体光纤的宽带模分复用器的设计与研究
Design and research of a broadband mode-division multiplexer based on three-core photonic crystal fiber
物理学报. 2022, 71(4): 044206　https://doi.org/10.7498/aps.71.20211187

M型少模光纤中模间受激布里渊散射特性及其温度和应变传感特性
Inter-mode stimulated Brillouin scattering and simultaneous temperature and strain sensing in M-shaped few-mode fiber
物理学报. 2020, 69(11): 114203　https://doi.org/10.7498/aps.69.20200103

低串扰低弯曲损耗环形芯少模多芯光纤的设计

张媛[1)] 姜文帆[2)] 陈明阳[1)†]

1) (江苏大学机械工程学院光电信息科学与工程系, 镇江 212013)

2) (香港城市大学电子工程系, 香港)

(2021 年 8 月 20 日收到; 2022 年 1 月 27 日收到修改稿)

针对少模多芯光纤中存在的纤芯内模式间的耦合及芯间模式耦合等问题, 提出一种阶跃型环形芯组成的 7 芯结构光纤, 每个纤芯可支持 5 个模式. 各纤芯具有一个中心低折射率区域和一个高折射率环, 保证纤芯内模式间均具有较大的折射率差, 从而减小模式间耦合问题. 运用有限元法模拟分析了中心纤芯和外纤芯的弯曲损耗、模式间的串扰特性及纤芯参数对串扰性能的影响. 数据模拟结果表明, 当波长为 1.55 μm, 这种多芯光纤在弯曲半径为 50 mm 时, 弯曲损耗远低于光纤衰减损耗, 且纤芯中 5 个模式的相邻纤芯之间串扰均小于–20 dB/100 km, 因而这种多芯光纤在小弯曲半径下仍可实现纤芯间独立的长距离信息传输.

关键词: 少模多芯光纤, 芯间串扰, 弯曲损耗, 模场

PACS: 42.79.Sz, 42.81.Dp, 42.81.Uv, 42.81.–i **DOI:** 10.7498/aps.71.20211534

1 引 言

空间复用是解决光传输网络宽带危机的一种有效方法. 目前实现空间复用的光纤有多芯光纤(空分复用)、少模光纤 (模分复用) 和多芯光纤+少模光纤 (空分复用+模分复用)[1]. 单芯单模光纤传输容量极限为 100 Tb/s, 少模光纤模式复用的传输容量可以突破 115 Tb/s, 多芯光纤空分复用可大幅提高单光纤传输容量, 使其达到 2.15 Pb/s[2]. 多芯光纤 (空分复用)+少模光纤 (模分复用) 相结合的传输容量已经达到 10.16 Pb/s. 在少模多芯光纤中, 同一包层具有多个纤芯, 各纤芯支持多个传输模式, 信道数等于纤芯总数乘以模式总数. 因此, 对比于多芯单模光纤, 空间信道数成倍扩大, 极大提高了传输容量[3].

2012 年日本古河公司的研究人员首次提出了少模多芯光纤概念, 设计了 W 型折射率分布的 7 芯和 19 芯 2-LP 模式的少模多芯光纤[4], 通过优化纤芯结构、纤芯间距等参数, 实现了 170 μm^2 的大有效面积 (LP_{01} 模式), 串扰低于–30 dB, 为多芯光纤扩容提供了发展方向. 2015 年 Igarashi 等[5]提出了一种弱耦合 19 芯 6 模光纤, 弯曲阈值为 15 mm, 串扰低于–30 dB/9.8 km, 实现了少模多芯光纤超大容量传输. 2016 年, 日本 NTT 公司提出了一种 12 芯 3 模光纤[6], 当传输距离为 527 km 时, 串扰低于–48.4 dB. 同年, 日本 KDDI 公司设计出 19 芯 6 模光纤[7], 成功地完成了传输距离为 19.8 km, 弯曲半径 140 mm, 串扰低于–40 dB 的传输实验. 2018 年, Kumar 和 Ranjan[8] 提出了用于分析芯间串扰的 12 芯 5-LP 模同质多芯光纤, 在所有 5-LP 模式下, 数值研究了芯间串扰对弯曲半径、芯间距、传输距离、波长和纤芯半径的影响.

在少模多芯光纤通信中, 既要保证纤芯间模式的独立传输, 又要求同一纤芯中模式应具有低的串扰, 同时, 所有传输模式还应具有较低的弯曲损耗. 为此, 本文提出一种可支持 5 个模式传输的环形芯结构少模多芯光纤, 该结构的纤芯设计可以使其纤

† 通信作者. E-mail: miniyoung@163.com

© 2022 中国物理学会 Chinese Physical Society

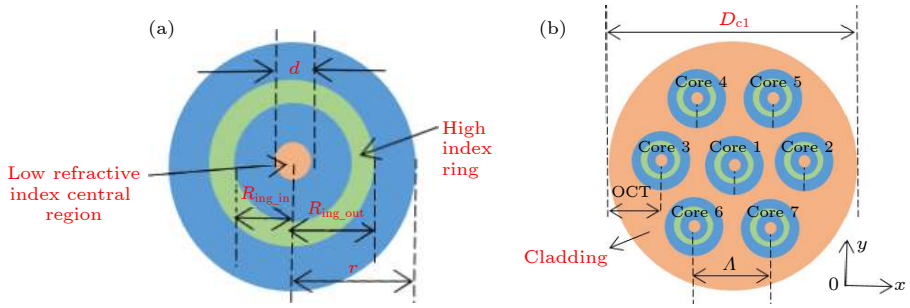

图 1 环芯少模多芯光纤结构示意图 (a) 单独纤芯示意图; (b) 剖面图

Fig. 1. Structure diagram of ring core few-mode multi-core fiber: (a) Single fiber core; (b) whole configuration.

芯中模式之间的折射率差均较大, 从而有效降低纤芯内模式间的耦合, 满足 5 种模式相对独立地传输的要求. 同时, 该结构还能保证所有纤芯模式具有较低的弯曲损耗, 且在较小的弯曲半径下, 仍然具有较低的模式串扰, 从而为长距离的传输应用提供新型解决方案.

2 环形芯少模多芯光纤设计

2.1 环形芯少模多芯光纤的结构

为保证光纤具有一定的机械弯曲性能, 必须限制多芯光纤的包层直径大小, 因而在有限的区间内设置多个纤芯, 芯间距大时相应的纤芯数就要减少. 因此, 若要保持纤芯数量, 那么增大有效折射率差从而减小模式串扰成为一种直接的思路. 但是较大的纤芯-包层折射率差意味着纤芯中掺杂较多, 就会增加传输衰减. 于少模光纤而言, 设计环形芯结构, 可以使纤芯中相邻模式之间等效折射率差的差别较大[9], 该结构如图 1(a) 所示. 较于传统的阶跃型折射率分布纤芯, 该结构具有更大的有效模场面积, 从而减小光传输中的非线性效应[10].

本文以环芯少模光纤为基础, 设计低串扰传输型 5 模 7 芯光纤. 利用基于有限元分析的仿真软件 COMSOL Multiphysics 建立光纤模型, 进行模式求解. 边界条件设置为完美匹配层 (PML), 采用三角形子域对计算区域进行离散化, 设置计算区域网格的最大单元尺寸为 0.05 μm, 将计算区域划分为约 5 万个单元. 图 1 为这种多芯光纤的横截面示意图. 纤芯整体采用正六边形排布结构, 中间纤芯和周围纤芯的折射率和尺寸均相同. 图 1 中, 低折射率中心区域的区域半径 $d = 0.82$ μm, 轻掺杂高折射率环内圈到中心距离 $R_{ring_in} = 4.65$ μm, 轻掺杂高折射率环外圈到中心距离 $R_{ring_out} = 5.45$ μm, 整个纤芯半径 $r = 7.5$ μm. 包层直径 $D_{cl} = 180$ μm. 为简化串扰计算, 外包层厚度 (外纤芯中心至包层圆周的距离) 设置与芯间距 Λ 相同, OCT $= \Lambda = 45$ μm.

2.2 折射率及模式分布

环形芯少模多芯光纤折射率分布如图 2 所示, 选择包层材料为纯二氧化硅, 纤芯材料为锗掺杂二氧化硅. 设置纤芯与包层 (即图 1(b) 蓝色区域纤芯与橙色区域包层) 的折射率差 $\Delta n_1 = 0.9\%$, 其中纤芯折射率 $n_{core} = 1.457174$, 包层折射率 $n_{clad} = 1.444$. 轻掺杂高折射率环与纤芯折射率差 $\Delta n_2 = 0.1\%$, 轻掺杂高折射率环的折射率 n_{ring} 为 1.458779.

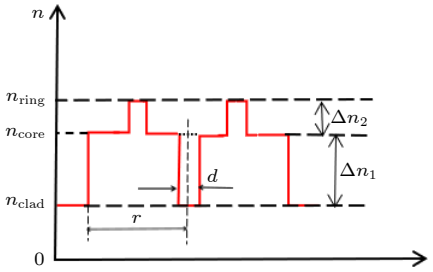

图 2 环形芯少模多芯光纤折射率分布图

Fig. 2. Refractive index distribution of ring core few-mode multi-core fiber.

由于纤芯采用低折射率区域和高折射率环形的设计结构, 使得其纤芯间模式具有较高的折射率差. 光纤处于较小的弯曲半径下, 仍然能够保持纤芯任意相邻的两个模之间的有效折射率差足够大, 从而使得纤芯内模式间的串扰较低, 实现模式稳定且独立传输.

当入射波长 $\lambda = 1550$ nm, 纤芯与包层的折射率差 $\Delta n_1 = 0.9\%$ 时, 环形芯少模光纤同时存在多个模式, 图 3 为弯曲半径为 50 mm 时, 每个模式的有效折射率随 R_{ing} 的变化. 其中, 虚线表示中间纤芯 (1 号纤芯) 各模式, 实线表示外纤芯 (2 号纤

芯) 中各模式. 当环芯的 $R_{\text{ring_in}}$ 值逐渐增大, 在 1—4 μm 的范围内, 中间纤芯 (1 号纤芯) 各模式与外纤芯 (2 号纤芯) 中相邻模式有效折射率差逐渐减小, 导致模式之间的耦合不断增加. 当 $R_{\text{ring_in}}$ 值为 4—5 μm 时, 两个模的有效折射率差开始增大, 当选取 $R_{\text{ring_in}} > 5$ μm 时会发现模式的有效折射率变化增大, 因此综合选择 $R_{\text{ring_in}} = 4.65$ μm. 此结构的环形芯型少模多芯光纤存在 LP_{01} 模、LP_{11} 模、LP_{21} 模、LP_{02} 模和 LP_{31} 模等 5 种模式, 且各模式间的有效折射率差保持在较大的值 (其中最小有效折射率差 $\Delta n_{\text{eff}} = 1.83 \times 10^{-3}$; $\Delta n_{\text{eff}} > 1.1 \times 10^{-3}$ 时足够使每个模式保持稳定的光学信号传输[11]), 从而有效减小纤芯内的模式间串扰.

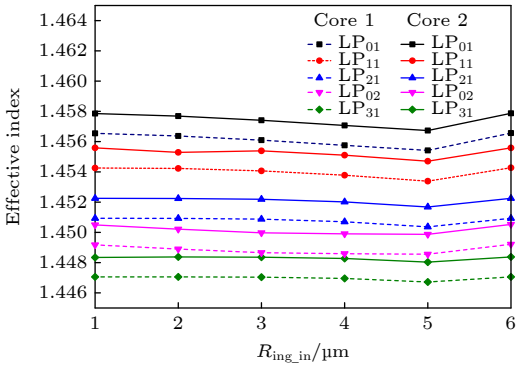

图 3 各模式的有效折射率与纤芯内半径 $R_{\text{ring_in}}$ 的关系

Fig. 3. Relationship between the effective refractive index of each mode changes with the inner radius $R_{\text{ring_in}}$.

图 4 是外纤芯在 x 方向的电场能量分布图, 利用 COMSOL 和 MATLAB 联合仿真软件求解模式耦合系数时可以同时得到清晰的能量场分布, 验证了该光纤结构存在上述 5 种模式.

3 数值仿真

3.1 弯曲损耗分析

当光纤发生弯曲时, 光纤的传输特性会发生改变, 纤芯中的模场会沿着弯曲方向向外辐射, 产生弯曲损耗[12,13]. 光纤弯曲, 密度的变化使折射率发生改变, 弯曲半径越小, 折射率变化越大. 按照图 1 所示, 当光纤沿着 x 轴正方向弯曲时, 弯曲光纤的横截面折射率等效为[10]

$$\begin{aligned} n'(x,y) &= n_{\text{material}}(x,y)\exp(x/R) \\ &\approx n_{\text{material}}(x,y)\exp(1+x/R), \end{aligned} \tag{1}$$

式中, $n_{\text{material}}(x, y)$ 为直光纤的折射率, $n'(x, y)$ 为弯曲光纤的等效折射率[14].

光纤的弯曲损耗可通过将弯曲光纤近似为一直光纤, 再通过求解模式的方法得到[15]. 计算得到的光纤模式有效折射率虚部与模式弯曲损耗之间满足下式关系[16]:

$$L = -\frac{40\pi}{\ln(10)\,\lambda}\text{Im}(n_{\text{eff}})\,\text{dB/m}, \tag{2}$$

这里 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 指 n_{eff} 的虚部.

下面考虑光纤沿 x 方向弯曲时, 不同纤芯的弯曲损耗情况. 由于不同纤芯所处位置不同, 在弯曲状态下的折射率变化也不同. 而由弯曲光纤的直波导近似理论, 光纤弯曲时, 2 号纤芯的折射率增加量最大, 因而, 这里以 1 号纤芯 (中间纤芯) 和 2 号纤芯 (外纤芯) 为例, 来分析弯曲对纤芯模式传输特性的影响.

由于弯曲半径越小, 弯曲的曲率会越大, 因此光纤的弯曲特性可以通过光纤的弯曲半径来表征.

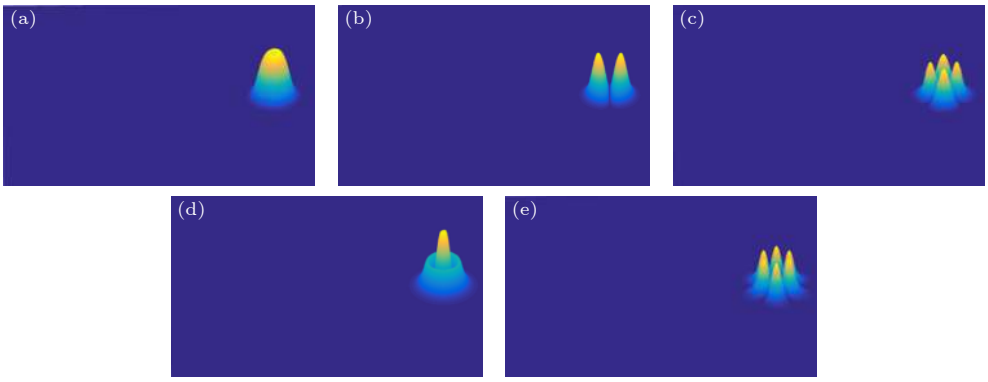

图 4 弯曲半径为 50 mm 时, 外纤芯 5 种模式的电场能量分布 (a) LP_{01} 模式; (b) LP_{11} 模式; (c) LP_{21} 模式; (d) LP_{02} 模式; (e) LP_{31} 模式

Fig. 4. Electric field energy distribution of the outer fiber core in five modes at the bending radius of 50 mm: (a) LP_{01} mode; (b) LP_{11} mode; (c) LP_{21} mode; (d) LP_{02} mode; (e) LP_{31} mode.

为了系统地分析弯曲半径是如何影响弯曲损耗的, 按照图 1(b) 所示, 将光纤沿着 x 轴正方向弯曲, 计算中间纤芯 (1 号纤芯) 和外纤芯 (2 号纤芯) 弯曲损耗. 由图 5 可见, 随着弯曲半径的减小, 中心纤芯和外纤芯基模的弯曲损耗不断增大, 在弯曲半径减小到 10 mm 后, 弯曲损耗明显增大.

图 5(a) 和图 5(b) 分别表示中心纤芯和外纤芯在不同弯曲半径下弯曲损耗的变化, 外纤芯各模式弯曲损耗较大, 弯曲程度更高. 由于在弯曲状态下, 外纤芯的折射率变化更大, 因而其弯曲损耗也大于中心纤芯. 从图 5(a) 可以看出, 当弯曲半径 $R_{\rm b} < 50$ mm 时, 纤芯中 $\rm LP_{31}$ 模式较其余模式弯曲损耗增加更为明显, 当 $R_{\rm b} = 10$ mm 时弯曲损耗最大, 为 0.002 dB/m. 图 5(b) 表示外纤芯的弯曲损耗, 可以看出, 弯曲半径 $R_{\rm b} < 60$ mm 时 $\rm LP_{31}$ 模式的弯曲损耗显著增加, 在 10—40 mm 之间, $\rm LP_{02}$ 模式受弯曲半径的影响增大, 弯曲损耗增加了 3 个数量级. 在多芯光纤中外纤芯 $\rm LP_{31}$ 模式的弯曲损耗最大, 约为 0.024 dB/m, 仍符合 ITU-TG.657B3 光纤标准. 该结构光纤的优越性之一就在于在实际铺设中能实现弯曲半径 10 mm 的弯曲程度, 使 5 种线偏振模依旧保持以上低弯曲损耗, 独立传输信息.

弯曲损耗随弯曲半径的变化趋势可以从模式有效折射率的变化得到验证. 图 6 给出了在 1550 nm 波长处, 中间纤芯 (1 号纤芯) 和外纤芯 (2 号纤芯) 的基模和高阶模随弯曲半径的有效折射率变化曲线. 由图 6 可见, 由于纤芯采用低折射率区域和高折射率环形的设计结构, 使得纤芯间模式具有较高的折射率差. 在光纤处于较小的弯曲半径下, 仍然能够保持纤芯任意相邻的两个模之间的有效折射率差足够大, 从而使得纤芯内模式间的串扰较低, 实现模式稳定且独立传输. 由图 6 可见, 随着弯曲半径的增大, 有效折射率随之减小, 外纤芯有效折射率随弯曲半径变化更为明显. 从图 6(b) 可知, 在 80 mm 以及更小弯曲半径下, 由于有效折射率的增大, 弯曲损耗随之增大. 外纤芯模式的有效折射率随弯曲半径减小, 其有效折射率增加量明显高于中心纤芯. 因而, 外纤芯中模式具有更大的弯曲损耗.

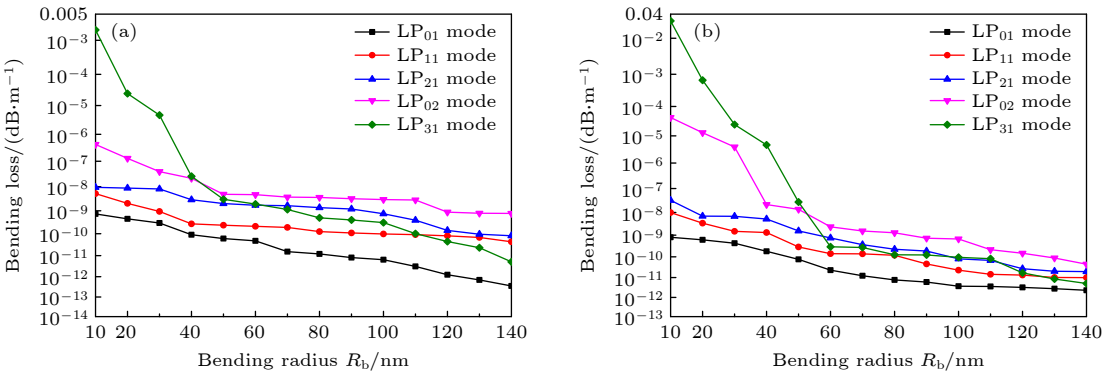

图 5 $\lambda = 1550$ nm 时, 弯曲半径 $R_{\rm b}$ 与弯曲损耗的关系曲线 (a) 中心纤芯; (b) 外纤芯

Fig. 5. Bending loss curves as a function of bending radius $R_{\rm b}$ at the wavelength of 1550 nm: (a) Central core; (b) outer core.

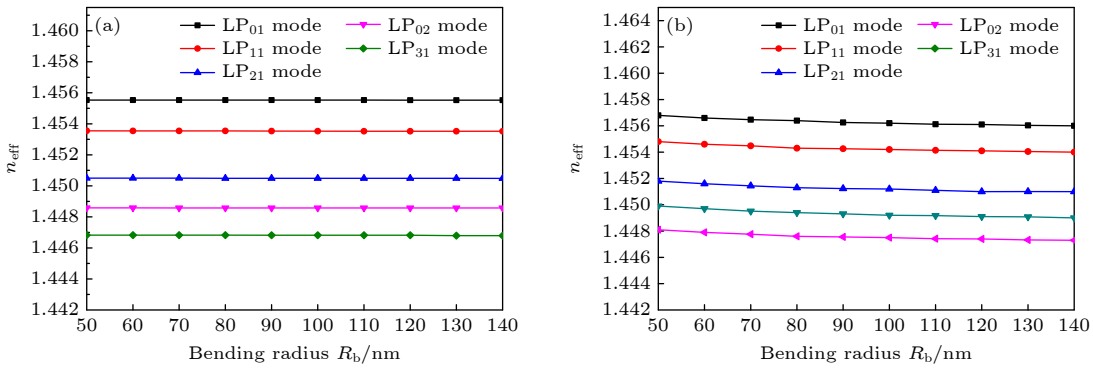

图 6 模式有效折射率随弯曲半径 $R_{\rm b}$ 的变化曲线 (其中 $\lambda = 1550$ nm, $\Lambda = 45$ μm) (a) 中心纤芯模式; (b) 外纤芯模式

Fig. 6. Effective refractive indexes of the modes as a function of bending radius $R_{\rm b}$ for the fiber with $\lambda = 1550$ nm and $\Lambda = 45$ μm: (a) Central core; (b) outer core.

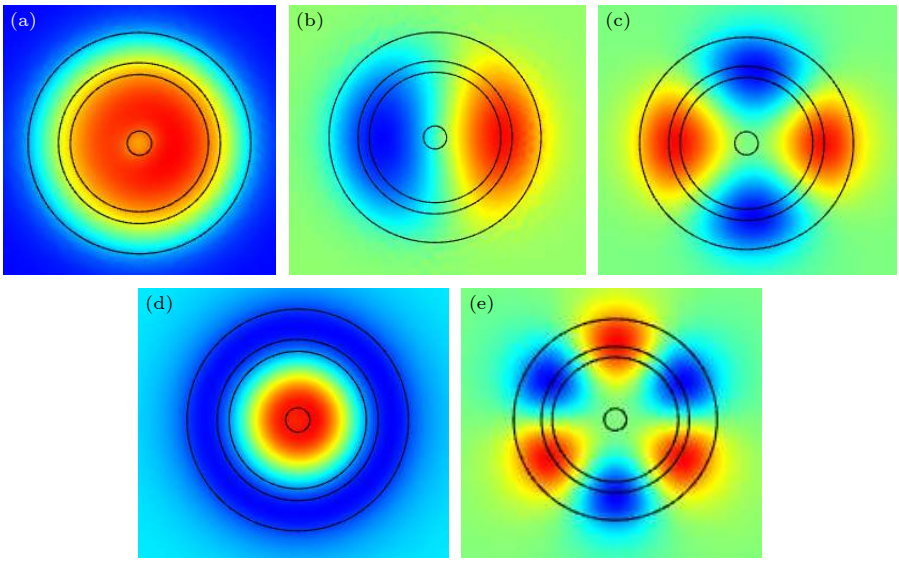

图 7 多芯光纤在 50 mm 弯曲半径下外纤芯的模场分布图 (a) LP_{01} 模; (b) LP_{11} 模; (c) LP_{21} 模; (d) LP_{02} 模; (e) LP_{31} 模

Fig. 7. Mode field distribution of the outer core of the multi-core fiber at the bending radius of 50 mm: (a) LP_{01} mode; (b) LP_{11} mode; (c) LP_{21} mode; (d) LP_{02} mode; (e) LP_{31} mode.

图 7 给出了外纤芯在弯曲半径 $R_{\rm b}=50$ mm 时的模场分布图, 可以看出, 在弯曲状态下, 5 种线偏振模的模场仍较规则, 仅是模场分布略向$+x$方向偏移. 由于有效折射率较低, 高阶模的模场向包层扩展, 因而其弯曲损耗较大.

3.2 串扰分析

多芯光纤的核心指标是芯间串扰[17,18]. 在传播过程中注入到某个纤芯的光功率会耦合到相邻纤芯中, 串扰反映了其耦合情况. 串扰 (XT) 的定义为

$$XT=10\log_{10}(P'/P)[\rm dB], \tag{3}$$

其中 P 和 P'分别是指定某一纤芯后, 该纤芯的输出功率和相邻纤芯的输出功率.

到目前为止, 用来计算多芯光纤串扰的方法主要有两种: 一种是基于模式耦合理论 (CMT) 的计算方法[19], 另一种是基于功率耦合理论 (CPT) 的计算方法[20]. 通常采用指数自相关函数的功率耦合系数法[21,22]:

$$h_{mn}(z)=\frac{2K_{mn}^2 d}{1+(\Delta\beta'_{mn}d)^2}, \tag{4}$$

其中, K_{mn}, d 和 $\Delta\beta_{mn}$ 分别指模式耦合系数、相关长度、纤芯 m 和纤芯 n 的传播常数差. 多芯光纤以恒定半径 $R_{\rm b}$ 弯曲, 并以恒定扭率 γ 连续扭曲[23], 则功率耦合系数取平均值需要将功率耦合系数在弯曲半径上取平均值, 计算公式如下[22]:

$$\overline{h}_{mn}=\frac{\gamma}{2\pi}\int_0^{2\pi/\gamma}h_{mn}(z)\,{\rm d}z. \tag{5}$$

最后通过平均功率耦合系数 $\overline{h}_{mn}$, 可以计算出光纤长度为 L 时, 相邻纤芯之间的串扰 XT (dB 的形式):

$$XT=\tanh\left(\overline{h}_{mn}L\right). \tag{6}$$

对于同种材料的多芯光纤 (multi-core fiber, MCF), 当弯曲半径较小时, (5) 式可近似为

$$\overline{h}_{mn}=\frac{2K_{mn}^2R_{\rm b}}{\beta_m\Lambda}. \tag{7}$$

因此, 当获得模式耦合系数 K_{mn} 时, 可以很容易计算出 MCF 的平均串扰. 由 (7) 式可知, 为降低芯间串扰, 可通过增大芯间距和增加纤芯-包层的折射率差来减小耦合系数.

对于少模多芯光纤, 其不仅存在不同纤芯基模之间的串扰, 还存在基模与高阶模之间的串扰. 当光纤沿$+x$方向弯曲时, 由于中心纤芯 (1 号纤芯) 和外纤芯 (2 号纤芯) 的有效折射率均增大, 且外纤芯模式有效折射率增加更快, 因而外纤芯的高阶模与中心纤芯的基模的耦合可能会增加. 而位于$-x$方向的 3 号纤芯, 由于其折射率是随弯曲而减小的, 因而其纤芯模式对中心纤芯的串扰是减小的. 在弯曲状态下, 中心纤芯模式对 3 号纤芯的基模的串扰和 3 号纤芯对中心纤芯模式串扰相似, 而中心纤芯模式对 2 号纤芯模式的串扰也是减小的.

因此, 仅分析 2 号纤芯对 1 号纤芯的串扰, 即可知光纤中纤芯之间的最大串扰水平.

在设计的光纤结构中 LP_{11}, LP_{21} 和 LP_{31} 模式均存在简并模, 表 1 分析了中间纤芯 (1 号纤芯) 和外纤芯 (2 号纤芯) 中 LP_{11} 模、LP_{21} 模、LP_{31} 模之间的串扰情况. 当工作波长 $\lambda = 1550$ nm, 弯曲半径 $R_b = 140$ mm 时, 中间纤芯 LP_{11a} 模式与外纤芯各模式之间, 尤其是与高阶模 LP_{31} 模式的串扰高于其简并模 LP_{11b} 模式的情形. 所以选择串扰较高的 LP_{11a} 模式进行接下来的研究工作. LP_{21b} 模式与外纤芯 LP_{11} 模式和 LP_{31} 模式之间的串扰均大于 LP_{21a} 模式. 本文设计的少模多芯光纤需要支持高阶模 LP_{31} 模式进行长距离传输, 因此选择 LP_{21b} 模式. 从表 1 可以看出, 与中间纤芯 LP_{31a} 模式相比, LP_{31b} 模式与各模式之间最大串扰值更高, 达到–28.19 dB/100 km, 因此选择串扰受弯曲影响相对较大的 LP_{31b} 模式进行分析.

图 8 给出了在 1550 nm 波长下, 弯曲半径 R_b 与串扰的关系. 可以看出, 中间纤芯与外纤芯由于弯曲后各模式模场耦合程度不同, 相邻模式之间的串扰差值较大. 图 8(a) 是中间纤芯的基模 (LP_{01} 模) 与外纤芯各模式之间的串扰曲线, 由于基模对模场的束缚能力较强, 所以在弯曲状态下串扰值相对较低. LP_{01} 模式与 LP_{31} 模式之间弯曲有效折射率相差最大, 因此串扰值最小, 在弯曲半径为 50 mm 时, 串扰仅为–138 dB/100 km. 图 8(b) 和图 8(c) 给出了中间纤芯 LP_{11} 和 LP_{21} 与外纤芯各模式的串扰, 这两种高阶模在弯曲之后与外纤芯模场重叠部分较少, 串扰值总体也较低. 图 8(a)—图 8(c) 中均是与外纤芯中的 LP_{11a} 模式串扰最大. 从图 8(d) 和图 8(e) 可以看出, LP_{02} 模式和 LP_{31} 模式与外纤芯模式之间串扰较大, 且随着弯曲半径减小串扰增加得更为明显. 当弯曲半径小于 80 mm 时, LP_{31} 模式与各模式之间串扰快速增加, 模场耦合加剧. 尤其是与外纤芯 LP_{31} 模式之间串扰最大, 在弯曲半径为 50 mm 时, 为–24.66 dB/100 km. 因此在低弯曲损耗的同时, 为了实现低串扰, 多芯光纤弯曲半径极限主要由高阶模决定, 限制多芯光纤用于长距离传输的主要是 LP_{31} 模式.

对于少模多芯光纤来说, 纤芯数目太少会造成包层空间的浪费和传输容量的下降; 纤芯数过多会导致芯间距减小, 相邻芯间模式耦合严重, 串扰很高. 因此要在满足光纤直径及包层厚度的要求下优化芯间距达到最佳的传输质量.

表 1 中间纤芯与外纤芯各模式之间的串扰

Table 1. Crosstalk between different modes of middle core and outer core.

		XT/[dB·(100 km)$^{-1}$]					
Core 2		LP_{11b}	LP_{11b}	LP_{21b}	LP_{21b}	LP_{31b}	LP_{31b}
Core 1	LP_{11b}	–92.84	–129.70	–125.62	–95.26	–118.93	–116.99
	LP_{11b}	–124.63	–92.86	–99.26	–135.26	–123.78	–120.89
	LP_{21b}	–79.30	–82.52	–63.70	–72.51	–90.05	–93.15
	LP_{21b}	–60.43	–69.32	–71.89	–63.78	–89.96	–89.17
	LP_{31b}	–33.35	–44.74	–46.39	–35.01	–28.76	–46.20
	LP_{31b}	–41.08	–33.92	–34.12	–50.58	–49.63	–28.19

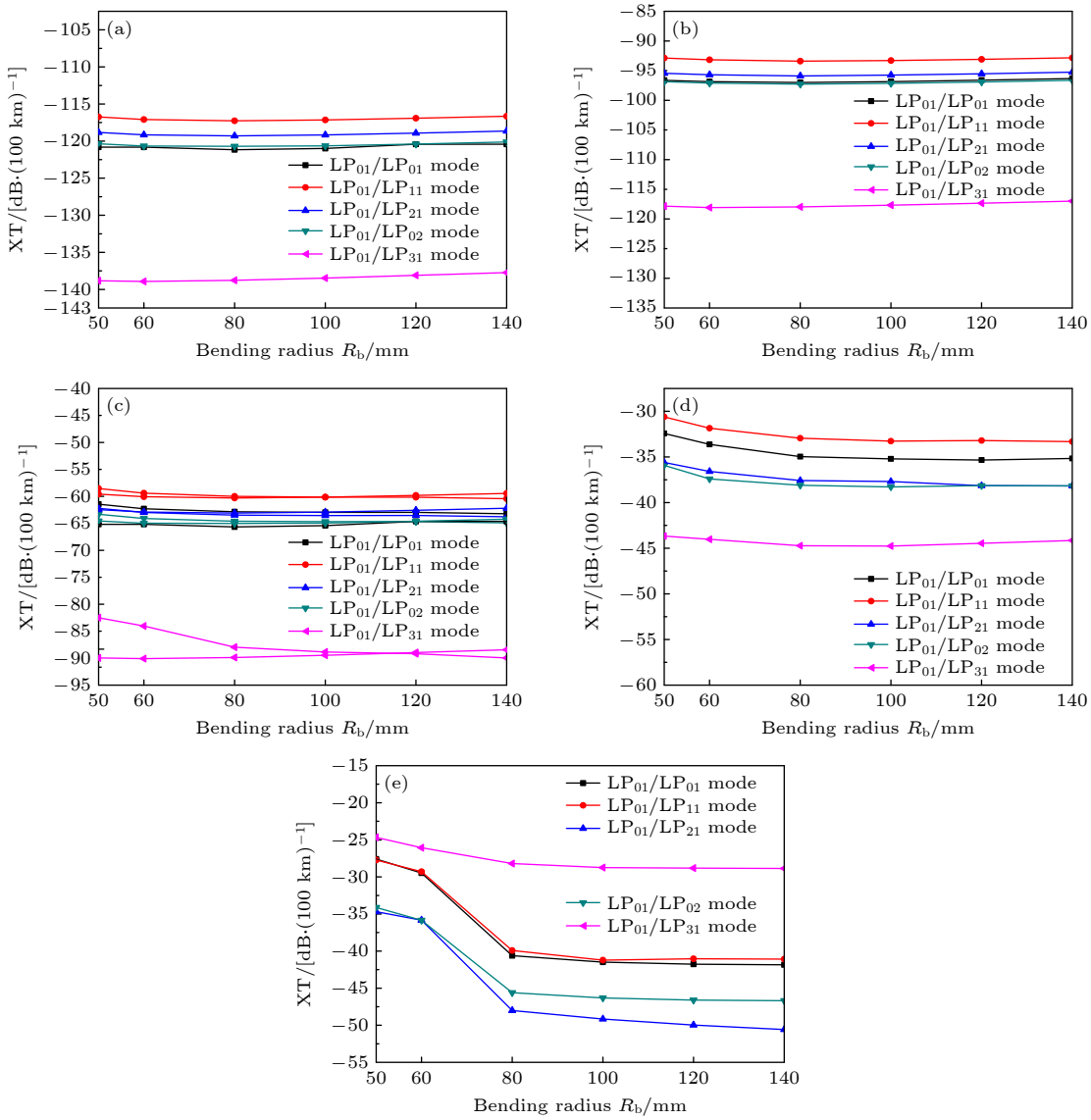

图 8 $\lambda = 1550$ nm, $\Lambda = 45$ μm 时, 弯曲半径 R_b 与串扰的关系曲线 (a) 中间纤芯中的 LP_{01} 模式和外纤芯各模式的串扰; (b) 中间纤芯中的 LP_{11} 模式和外纤芯各模式的串扰; (c) 中间纤芯中的 LP_{21} 模式和外纤芯各模式的串扰; (d) 中间纤芯中的 LP_{02} 模式和外纤芯各模式的串扰; (e) 中间纤芯中的 LP_{31} 模和外纤芯的各模式的串扰

Fig. 8. Crosstalk curves for the multi-core optical fiber with $\lambda = 1550$ nm and $\Lambda = 45$ μm: (a) LP_{01} mode in the central core and the modes in the outer core; (b) LP_{11} mode in the central core and the modes in the outer core; (c) LP_{21} mode in the central core and the modes in the outer core; (d) LP_{02} mode in the central core and the modes in the outer core; (e) LP_{31} mode in the central core and the modes in the outer core.

下面分析纤芯间距对串扰的影响. 仍对中间纤芯 (1 号纤芯) 与外纤芯 (2 号纤芯) 模式间串扰进行分析. 由图 8 可知, 当光纤发生弯曲后, 相邻模式之间的串扰会比其他模式间更为明显, 因此图 9 选择了中间纤芯每一模式与外纤芯串扰相对较大的 5 种情况, 分别为中间纤芯 LP_{01} 模式与外纤芯 LP_{11} 模式、中间纤芯 LP_{11} 模式与外纤芯 LP_{11} 模式、中间纤芯 LP_{21} 模式与外纤芯 LP_{11} 模式、中间纤芯 LP_{02} 模式与外纤芯 LP_{02} 模式、中间纤芯 LP_{31} 模式与外纤芯 LP_{31} 模式.

由图 9 可见, 芯间距在 35—45 μm 之间时, 串扰随芯间距的增大而降低. 纤芯中模式阶次越高, 越容易与相邻纤芯各模式发生较大的串扰. 图 9(a) 给出了基模 LP_{01} 模式与 LP_{11} 模式在不同纤芯间距下的串扰曲线, 基模对模场的束缚能力高于高阶模, 因此对比于图 9(b)—图 9(e), LP_{01} 模式与外纤芯的耦合较弱, 串扰较小. 从图 9(b) 可以得知, 串扰最大为–35.5 dB/100 km. 图 9(c) 给出中间纤芯 LP_{21} 模式与相邻 LP_{11} 模式之间的串扰规律, 串扰值较图 9(b) 增加, 最大串扰为–26.4 dB/100 km.

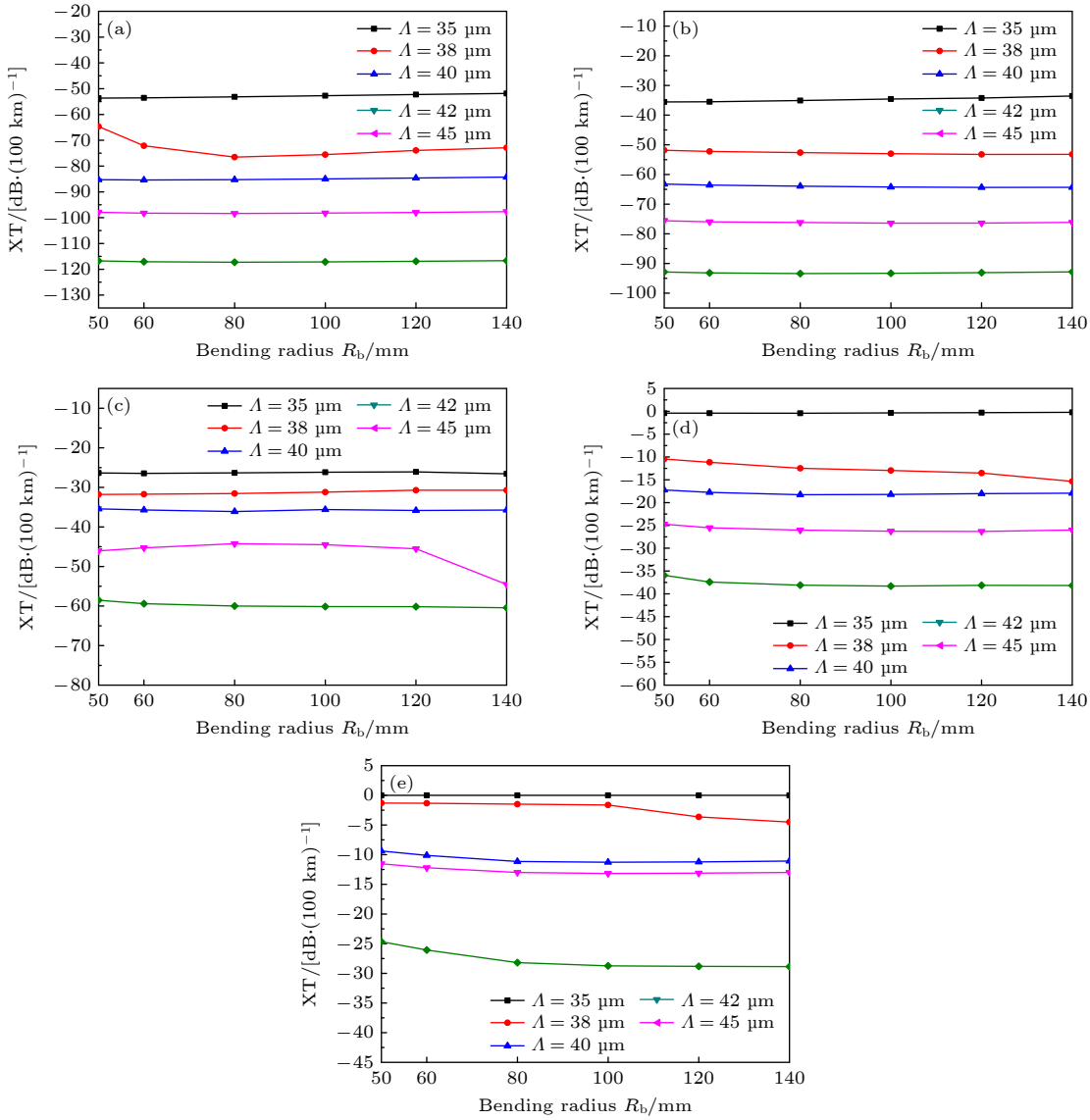

图 9 芯间距 Λ 与串扰的关系曲线 (a) 中间纤芯 LP_{01} 模式与外纤芯 LP_{11} 模式; (b) 中间纤芯 LP_{11} 模式与外纤芯 LP_{11} 模式; (c) 中间纤芯 LP_{21} 模式与外纤芯 LP_{11} 模式; (d) 中间纤芯 LP_{02} 模式与外纤芯 LP_{02} 模式; (e) 中间纤芯 LP_{31} 模式与外纤芯 LP_{31} 模式

Fig. 9. Relation curves between core spacing Λ and crosstalk: (a) LP_{01} mode of the central core and LP_{11} mode of the outer core; (b) LP_{11} mode of the central core and LP_{11} mode of the outer core; (c) LP_{21} mode of the central core and LP_{11} mode of the outer core; (d) LP_{02} mode of the central core and LP_{02} mode of the outer core; (e) LP_{31} mode of the central core and LP_{31} mode of the outer core.

从图 9(d) 和图 9(e) 可以发现, 当芯间距为 35 μm 时, 中间纤芯与外纤芯的 LP_{02} 模之间、中间纤芯与外纤芯的 LP_{31} 模式之间具有很大的串扰, 数值接近于 0. 为了实现长距离传输且每个模式独立传播, 通常要求相邻纤芯模式间串扰达到–30 dB 左右. 增大纤芯间距可以有效地减小模式串扰. 所以, 当纤芯距为 45 μm 时, 即使在 R_b = 50 mm 的小弯曲半径下, 中间纤芯与外纤芯的 LP_{31} 模式之间的串扰仍可低至–24.66 dB/100 km, 其他模式之间的串扰值更低. 因此, 设置芯间距为 45 μm 可有效地抑制相邻纤芯模式间的串扰.

从上述结果可以看出, 当工作在 50 mm 的小弯曲半径时, 中间纤芯和外纤芯各模式间的串扰仍然会偏高. 若要使光纤可以在该弯曲半径下工作, 可以通过将外纤芯与包层折射率差增大的方法来实现.

图 10 给出了弯曲半径 R_b = 50 mm 时, 光纤的模式串扰随 Δn_1 的变化曲线. 可以看出, 随着 Δn_1 的不断增大, 纤芯对模场限制能力越强, 相邻纤芯模式耦合越小, 串扰越低, 其中基模与各模式之间串扰最低, 最大值为–90.6 dB/100 km. 此外纤芯中高阶模模式阶次越高, 与相邻纤芯各模式之

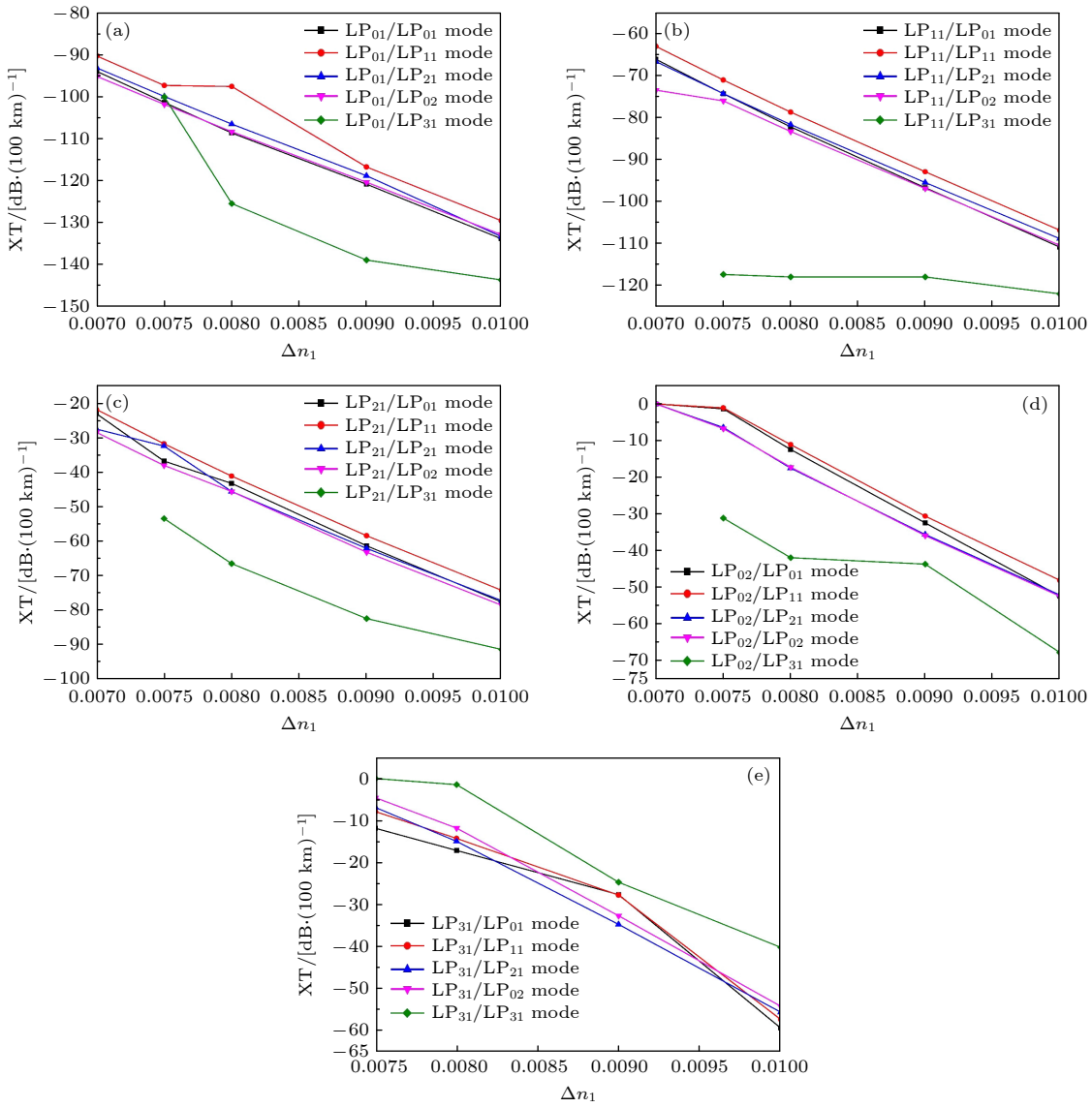

图 10 纤芯-包层折射率差与芯间串扰的关系 (a) 中间纤芯中的 LP_{01} 模和外纤芯各模式的串扰; (b) 中间纤芯中的 LP_{11} 模和外纤芯各模式的串扰; (c) 中间纤芯中的 LP_{21} 模和外纤芯各模式的串扰曲线; (d) 中间纤芯中的 LP_{02} 模和外纤芯各模式的串扰曲线; (e) 中间纤芯中的 LP_{31} 模和外纤芯的各模式之间的串扰

Fig. 10. Relationship between core-cladding refractive index difference and inter-core crosstalk: (a) LP_{01} mode in the central core and modes in the outer core; (b) LP_{11} mode in the central core and modes in the outer core; (c) LP_{21} mode in the central core and modes in the outer core; (d) LP_{02} mode in the central core and modes in the outer core; (e) LP_{31} mode in the central core and modes in the outer core.

间的串扰越大. 然而, 纤芯-包层折射率差越大意味着纤芯中掺锗比例较大, 在实际应用中拥有这种折射率差的光纤很容易破碎, 增加制作难度和成本, 因此 Δn_1 为 1.0% 不可以选择. 而当 Δn_1 =0.7% 时, 中间纤芯与外纤芯中 LP_{31} 模式并不存在, 无法完成 LP_{31} 模式传输. 而中间纤芯的 LP_{02} 模和 LP_{31} 模与外纤芯的模式间串扰较大, 原因是这两个模式阶次较高, 模场向包层扩展, 从而容易与其他纤芯模式发生耦合. 增大纤芯与包层折射率差可以解决这一问题, 当 Δn_1 =0.9% 时, 其中 n_{core} = 1.457174, n_{clad} = 1.444, 所有模式的串扰值均低于 –20 dB/100 km.

3.3 分析与讨论

表 2 列出了近年来类似的少模多芯光纤的文献报道结果[24–28], 并将本文研究的弯曲损耗、串扰等与之对比. 从表中统计的数据可以直观发现, 与近几年报道的光纤相比, 本文提出的 5 模 7 芯光纤结构中基模与高阶模均具有较低的串扰和弯曲损耗, 传输距离为 100 km 时, 串扰最大为–116 dB,

表 2 光纤性能对比

Table 2. Fiber performance comparison.

Year	Number of fiber cores	Structure of fiber core	Cladding diameter/μm	Bending radius/mm	Bending loss	Crosstalk/dB (Transmission distance)
2012[24]	7	Hole-assisted	225	140	0.242 dB/km	–60 (1 km)
2015[25]	36	Trench-assisted	200	140	0.001 dB/km	–31 (5.5 km)
2017[26]	12	Trench-assisted	230	210	0.05 dB/100 turns	–48 (500 km)
2019[27]	8	Differential inner-cladding	160	30	0.0049 dB/100 turns	<–50 (100 km)
2020[28]	7	Hole-assisted	125	80	2.20×10^{-6} dB/m	–32 (100 km)
Our design	7	Ring-core structure	180	50	2.77×10^{-8} dB/m	–116 (100 km)

且该多芯光纤具有较低的弯曲损耗, 比最新报道的光纤高出两个数量级. 因此, 在长距离传输领域具有较高的应用价值.

4 总 结

本文提出了基于环形纤芯结构低串扰的 5 模 7 芯结构光纤. 模式间具有较大的有效折射率差, 可以实现纤芯内模式间的低串扰传输. 采用有限元方法, 对光纤的模场、弯曲损耗和芯间串扰进行了理论研究. 结果表明, 当波长为 1.55 μm 时, 这种多芯光纤在弯曲半径为 50 mm 的情况下弯曲损耗极低, 可忽略, 且纤芯间模式串扰均小于–20 dB/100 km. 这种少模多芯光纤可运用于长距离光通信领域, 以实现对现有通信系统容量的升级.

参考文献

[1] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E 2013 *Nat. Photonics* **7** 354

[2] Qian D, Huang M F, Huang Y K, Shao Y, Hu J, Wang T 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 1540

[3] Chen H G, Morency S, Jin C, Gregoire N, Essiambre 2016 *Nat. Photonics* **10** 529

[4] Mukasa K, Imamura K, Sugizaki R 2012 *European Conference & Exhibition on Optical Communications* Amsterdam, Nether lands, June 9, 2012 p1

[5] Igarashi K, Souma D, Wakayama Y, Takeshima K, Suzuki M 2015 *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)* Angeles, California, USA, March 22–26, 2015 pTH5C.4

[6] Shibahara K, Lee D, Kobayashi T, Mizuno T, Takara H, Sano A 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 196

[7] Igarashi K, Soma D, Wakayama Y, Takeshima K, Kawaguchi Y, Yoshikane N, Tsuritani T, Morita I, Suzuki M 2016 *Opt. Express* **24** 10213

[8] Kumar D, Ranjan R 2018 *Opt. Fiber Technol.* **41** 95

[9] Xie Y, Pei L, Zheng J, Zhao Q, Ning T, Sun J 2019 *Appl. Opt.* **58** 4373

[10] Liu S N, Ning T G, Ma S S 2018 *Chin. J. Lasers* **45** 1206001 (in Chinese) [刘诗男, 宁提纲, 马绍朔 2018 中国激光 **45** 1206001]

[11] Chen S, Tong Y, Tian H 2020 *Appl. Opt.* **59** 4634

[12] Chen X, Li M J, Koh J, Artuso A, Nolan D A 2007 *Opt. Express* **15** 10629

[13] Zheng S W, Lin Z, Ren G B, Jian S S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044224 (in Chinese) [郑斯文, 林桢, 任国斌, 简水生 2013 物理学报 **62** 044224]

[14] Fini J M, Nicholson J W 2013 *Opt. Express* **21** 19173

[15] Tsuchida Y, Saitoh K, Koshiba M 2005 *Opt. Express* **13** 4770

[16] Zheng X, Ren G, Huang L, Li H, Zhu B, Zheng H, Cao M 2016 *Appl. Opt.* **55** 2639

[17] Dablu K, Rakesh R 2020 *Optoelectron. Lett.* **16** 126

[18] Farooque U, Singh D K, Ranjan R 2019 *Opt. Quantum Electron.* **51** 371

[19] Zheng S, Ren G, Lin Z, Jian S 2013 *Appl. Opt.* **52** 4541

[20] Ye F, Tu J, Saitoh K, Morioka T 2014 *Opt. Express* **22** 23007

[21] Jaramillo-Avila B, Torres J M, Leon-Montiel R J, Rodriguez-Lara B M 2019 *Sci. Rep.* **9** 15737

[22] Xie Y, Pei L, Zheng J 2020 *Opt. Commun.* **474** 126155

[23] Koshiba M, Saitoh K, Takenaga K 2012 *IEEE Photonics J.* **4** 1987

[24] Ce N X, Amezcua-Correa R, Bai N, Antonio-Lopez, E, Li G 2012 *IEEE PTL* **24** 1914

[25] Sakaguchi J, Klaus W, Mendinueta J M D, Puttnam B J, Kobayashi T 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 93

[26] Yusuke S A, Katsuhiro T, Shoichiro M, Kazuhiko A 2017 *Opt. Fiber Technol.* **35** 19

[27] Xie Y, Pei L, Sun J, Zheng J, Li J J 2019 *Opt. Fiber Technol.* **53** 102001

[28] Xie Y, Pei L, Zheng J, Zhao Q, Li J J 2020 *Opt. Express* **28** 23806

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

Zhang Yuan [1)] Jiang Wen-Fan [2)] Chen Ming-Yang [1)†]

1) (*Department of Optoelectronic Information Science and Engineering, School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *China*)

2) (*Department of Electrical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong, China*)

(Received 20 August 2021; revised manuscript received 27 January 2022)

Abstract

Aiming at solving the problems of coupling between modes in a core and mode coupling between cores in few-mode multi-core fiber, a fiber with seven cores each with step index is proposed, and each core can support five modes. Each core has a central low refractive index region and a high refractive index ring to ensure that there is a large refractive index difference between modes in the core, so as to reduce the problem of mode coupling. The bending loss of central core and outer core, the crosstalk characteristics between modes and the influence of core parameters on crosstalk performance are simulated and analyzed by the finite element method. The simulation results show that at a wavelength of 1.55 μm and a bending radius of 50 mm, the bending loss of the proposed multi-core fiber is much lower than its attenuation loss, and the crosstalk between the adjacent cores of the five core modes are less than –20 dB/100 km. Therefore, this multi-core fiber can realize independent transmission of the core modes with long-distance under small bending radius.

Keywords: few mode multi-core fiber, inter-core crosstalk, bending loss, mode field

PACS: 42.79.Sz, 42.81.Dp, 42.81.Uv, 42.81.–i **DOI:** 10.7498/aps.71.20211534

† Corresponding author. E-mail: miniyoung@163.com