

七芯及十九芯大模场少模光纤的特性研究和 比对分析*

林桢^{1)2)†} 郑斯文¹⁾²⁾ 任国斌¹⁾²⁾ 简水生¹⁾²⁾

1) (北京交通大学, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

2) (北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

(2012 年 8 月 30 日收到; 2012 年 10 月 19 日收到修改稿)

提出了一种新型的多芯大模场少模光纤. 包含缺失空气孔的特殊结构使其具有独特的少模特性, 仅传输 HE_{11} 模和 HE_{21} 模. 分析表明七芯大模场少模光纤能维持稳定的双模式运转, 且基模有效面积可达 $866.54 \mu m^2$. 系统研究了光纤结构参数影响模式特性和基模有效面积的规律, 并分析了纤芯数目增加带来的性能相似性和差异性——进阶的十九芯大模场少模光纤在继承少模特性的同时, 模场面积大大增加, 其基模有效面积可高达 $3617.55 \mu m^2$. 对比已报道的少模光纤, 多芯大模场少模光纤获得了更大的有效面积, 并具有良好的弯曲特性, 有望被用于更高功率的光纤放大器、光纤激光器以及高速大容量光纤传输系统中.

关键词: 少模光纤, 多芯, 大模场面积, 弯曲损耗

PACS: 42.81.-i, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.62.064214

1 引言

只支持几个空间模式的少模光纤 (few-mode fiber, FMF) ^[1], 由于其独特的光学性质近年来备受关注. 它不仅具有媲美单模光纤低模式色散和附加损耗的表现, 并且兼顾多模光纤的低非线性优势. 文献 [2—5] 用少模光纤取代普通单模光纤, 将其应用于基于模式复用技术的长距离传输系统, 大大提高了传输速率和传输容量, 展示了少模光纤巨大的潜在发展前景. 然而如何有效地减少光纤中的高阶模数量, 减小长距离传输中的传输损耗, 同时增大模场面积, 提升传输容量, 以及少模光纤本身的稳定性等问题, 都需要进一步的探索.

在包层内有多个纤芯的多芯光纤 (multi-core fiber, MCF) ^[6] 作为一种可行方案, 引起了我们的注意. 多芯光纤大体可分两类: 芯芯之间低串扰的独立型多芯光纤 ^[7,8] 和具有大模场面积的强耦合型

多芯光纤 ^[9,10]. 国外多家机构对低串扰的独立型多芯光纤进行了理论和实验研究, 低串扰需要较大的芯间距, 一般设计在 $35\text{—}60 \mu m$ 范围内 ^[11–14], 而大模场面积的强耦合型多芯光纤, 需要相对较小的芯间距来满足强耦合条件, 至今鲜见报道.

本文基于强耦合型多芯光纤, 提出一种新型的多芯大模场少模光纤 (multi-core large-mode-area few-mode fiber, MC-LMA-FMF). 该光纤独特的少模特性支持稳定的双模运转 (仅包括 HE_{11} 模和 HE_{21} 模), 二阶模式数目减少一半, 同时增大了基模场的有效面积. 对此结构的七芯和进阶的十九芯大模场少模光纤进行合理设计, 总结光纤结构参数影响模式特性和有效面积的规律, 并分析纤芯数目增加所带来的性能相似性和差异性, 为今后三十七芯甚至更多纤芯的 MC-LMA-FMF 设计奠定基础. 本文一方面给出了减少模式数量、实现少模运转的一种方法, 另一方面在少模的基础上进一步扩大有效面积, 减小非线性效应, 使少模光纤有望被用于更高

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB328206)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61275092)、国家自然科学基金 (批准号: 61178008)、教育部科学技术研究重大项目基金 (批准号: 210267) 和中央高校基本科研业务费专项资金资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: 08111024@mail.bjtu.edu.cn

功率的光纤放大器、光纤激光器以及高速大容量光纤传输系统中。

2 七芯大模场少模光纤

2.1 光纤结构

光纤为准七芯结构, 剖面结构如图 1 所示. 图中黑色部分为传统纤芯, 两个白色对称芯为缺失空气孔, 浅色区域为包层, 七芯呈六边形排布. 工作波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$. 纤芯材料折射率 n_{co} , 包层材料折射率 $n_{\text{cl}} = 1.444$, 空气孔折射率为 1, 定义芯包相对折射率差 $\Delta n = n_{\text{co}} - n_{\text{cl}}$. 纤芯直径 d , 空气孔直径与之相等, 包层直径为 $125 \mu\text{m}$. 芯间距 Λ , 定义芯径与芯间距的比值为相对孔径, 用 $f = d/\Lambda$ 表示.

2.2 模式特性

利用全矢量有限元方法, 求解域的边界条件采用完美匹配层 (PML) 吸收边界条件, 假设 $d = 4.8 \mu\text{m}$, $\Delta n = 0.3\%$, 数值计算光纤中各模式的有效折射率和模场分布.

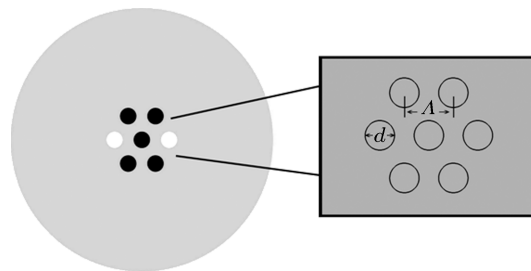


图 1 7-core-LMA-FMF 剖面结构示意图

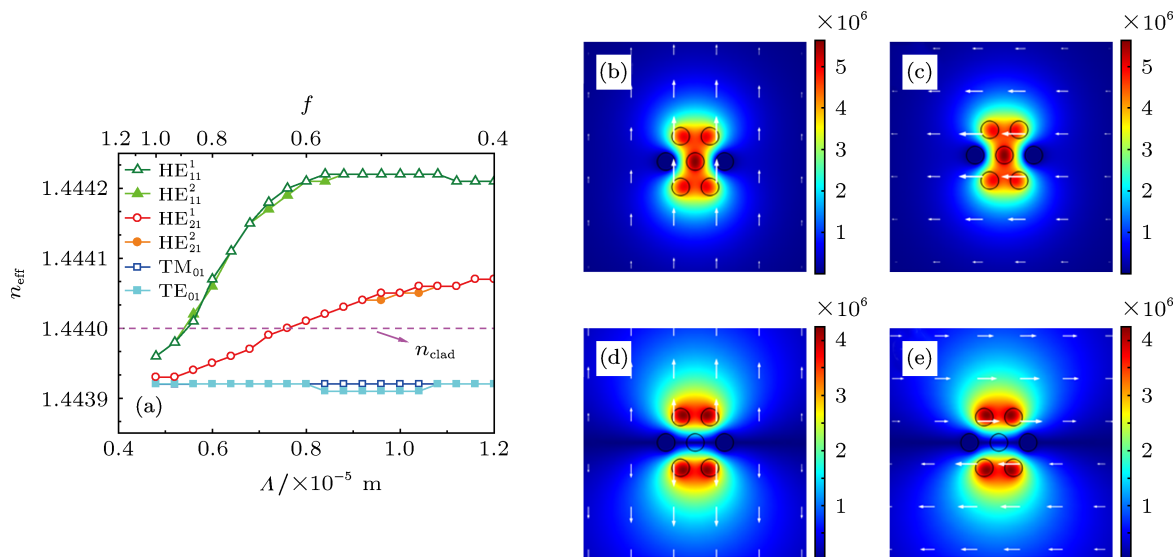


图 2 7-core-LMA-FMF (a) 六个超模的模式特性; (b), (c) HE_{11} 模的模场和二维电矢量分布; (d), (e) HE_{21} 模的模场和二维电矢量

由于各芯之间的耦合很强, 各芯的模场叠加起来形成超模. 图 2(a) 为六个超模的有效折射率随芯间距的变化. 六个超模包括两个简并的基模以及四个两两简并的二阶模. 光纤中导模需满足传导条件: $n_{\text{cl}} < n_{\text{eff}} < n_{\text{co}}$, 有效折射率低于包层材料折射率的模式截止. 可以看出: 有两个简并的二阶模被完全抑制, 在很大范围内光纤稳定的传输四个模式 (包括两个简并的基模和两个简并的二阶模). 取 $\Lambda = 12 \mu\text{m}$, $f = 0.4$, 图 2(b)—(e) 给出了四个导模的模场和二维电矢量分布. 基模两个偏振模式图 2(b), (c) 的电矢量分布与阶跃光纤中 HE_{11} 模类似, 我们称之为 HE_{11} 模. 二阶模图 2(d), (e) 与阶跃光纤中

HE_{21} 模类似, 称之为 HE_{21} 模. 正常情况下二阶模 TM_{01} 模和 TE_{01} 模的电矢量呈圆对称分布, 通过引入缺失空气孔, 破坏了光纤的圆对称结构, 相当于打开了一条 TM_{01} 模和 TE_{01} 模的泄漏通道, 增大了泄漏损耗, 从而达到减少高阶模数量的目的. 此时光纤维持稳定的双模运转, 仅传输 HE_{11} 模和 HE_{21} 模, 二阶模数目减少一半.

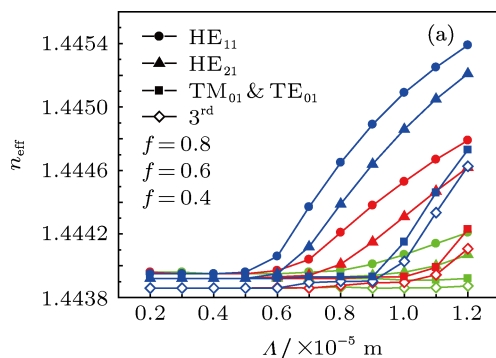
2.3 结构参数对 7-core-LMA-FMF 特性的影响

为了明确双模运转的条件, 同时尽可能增大有效面积, 研究各结构参数对七芯光纤各模式有效折

射率 n_{eff} 和基模有效面积 A_{eff} 的影响.

2.3.1 芯间距和相对孔径的影响

假设 $\Delta n = 0.3\%$, 计算 $f = 0.4, 0.6, 0.8$ 时, 各模式 n_{eff} 随 Λ 的变化, 如图 3(a) 所示. 为了便于辨认, 图中简并模式不再分开表示, 圆标代表 HE_{11} 模, 三角标代表 HE_{21} 模, 方标代表 TM_{01} 模和 TE_{01} 模, 空心菱形标代表三阶模. 三阶模的模式折射率总小于 TM_{01} 和 TE_{01} 模, 因此当 TM_{01} 和 TE_{01} 模被抑制时, 能保证更高阶的模式被抑制. 文章后续模式折射率变化图中均给出三阶模的曲线, 但是不再重复



讨论. 固定 f 时, 随着 Λ 增大, 当各模式的 $n_{\text{eff}} < n_{\text{cl}}$ (1.444), 模式截止, n_{eff} 变化微小, 而后各模式的 n_{eff} 不同程度增大, 当 $n_{\text{eff}} > n_{\text{cl}}$ 时形成导模, 相同 Λ 情况下, $n_{\text{eff}}(\text{HE}_{11}) > n_{\text{eff}}(\text{HE}_{21}) > n_{\text{eff}}(\text{TM}_{01} \& \text{TE}_{01})$. 对于同一导模, 固定 Λ 时, n_{eff} 随着 f 增大而增大. 这是由于随着 Λ 和 f 增大, 相当于芯区的等效尺寸增大, 芯区的等效折射率增加, 因此模式的 n_{eff} 增大. 对于不同的 f , 各模式的截止条件不同, 因此为了抑制 TM_{01} 和 TE_{01} 模, 使光纤中只传输 HE_{11} 模和 HE_{21} 模, 对不同的 f , 有不同范围的 Λ 与之匹配.

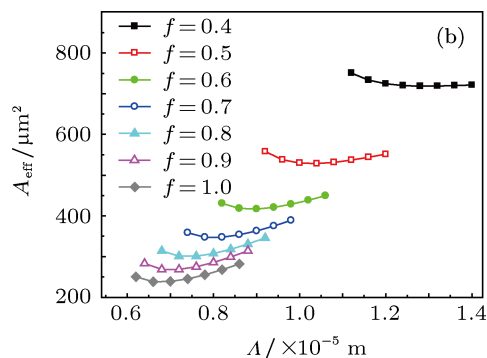


图 3 7-core-LMA-FMF (a) $f = 0.4, 0.6, 0.8$ 时各模式 n_{eff} 随 Λ 变化; (b) $f = 0.4—1$ 时基模 A_{eff} 随 Λ 变化

光纤中基模的模场分布属于近高斯型分布, 其有效面积的定义为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E(x, y)|^4 dx dy}, \quad (1)$$

其中 $E(x, y)$ 为基模的横向电场分量. 当光纤双模运转时, 假设 $\Delta n = 0.3\%$, 计算 $f = 0.4—1$ 时, 基模 A_{eff} 随 Λ 的变化, 如图 3(b) 所示. 固定 f 时, 随着 Λ 增大, A_{eff} 呈现先下降后上升的变化趋势. 先下降是因为 Λ 较小时, 基模临近截止状态, 对模场的束缚能力减弱, A_{eff} 一定程度增大. 当基模远离截止时, Λ 增大, 相当于芯区的等效尺寸增大, 所以 A_{eff} 增大. 对于不同的 f , 观察到 f 越小, A_{eff} 越大. 这是因为 f 越小, 表示纤芯的尺寸越小, 芯区的等效折射率越小, 芯区和包层的等效折射率差越小, 所以模场更多地分布到包层当中, A_{eff} 增大. 同时对于不同的 f , A_{eff} 的上升幅度不同, f 越小, A_{eff} 增长的越缓慢, 例如 $f = 0.4$ 时, 随着 Λ 的增大, A_{eff} 几乎停止增长, 而 $f = 1$ 时, A_{eff} 增长迅速. 这是由于当 f 较小且 Λ 足够大时, 芯与芯之间趋近独立, 各芯都独立地作为一个波导, 模场之间没有重叠, 已经不符合

强耦合条件, 因此即便 Λ 继续增大, A_{eff} 也几乎保持不变. 此处不考虑 $f < 0.4$ 的情况, 因为已不符合强耦合型多芯光纤的范畴, 趋近于低串扰的独立型多芯光纤.

2.3.2 芯包相对折射率差的影响

假设 $d = 4.8 \mu\text{m}$, 计算 $f = 0.4, 0.6, 0.8$ 时, 随着 Δn 从 0.1% 增加到 1% , 各模式 n_{eff} 的变化, 如图 4(a) 所示. 固定 f 时, 随着 Δn 增加, 各模式先处于截止状态, 当 $n_{\text{eff}} > n_{\text{cl}}$ 时形成导模, 相同 Δn 情况下, $n_{\text{eff}}(\text{HE}_{11}) > n_{\text{eff}}(\text{HE}_{21}) > n_{\text{eff}}(\text{TM}_{01} \& \text{TE}_{01})$. 这是由于 Δn 的增加, 导致芯区的等效折射率增加, 因此模式的 n_{eff} 增大. 对于同一导模, 固定 Δn 时, 各模式的 n_{eff} 随 f 的变化不尽相同. 例如对于 HE_{11} 模, 当 $\Delta n < 0.3\%$ 时, $n_{\text{eff}}(f = 0.4) > n_{\text{eff}}(f = 0.6) > n_{\text{eff}}(f = 0.8)$, 而当 $\Delta n > 0.5\%$ 时, $n_{\text{eff}}(f = 0.8) > n_{\text{eff}}(f = 0.6) > n_{\text{eff}}(f = 0.4)$, HE_{21} 模的变化规律与之相似, TM_{01} 和 TE_{01} 模的变化规律与之相反. 从图中直观来看, 随着 f 增大, 表征 HE_{11} 模, HE_{21} 模, TM_{01} 和 TE_{01} 模的 n_{eff} 的三条曲线从相互紧靠到渐渐远离. 这是因为固定了 d , 当 f 较小时, Λ 较大, 表示芯区中纤芯占的比例较小, 此时 Δn 的变化对芯区的等效折射率影响较小, 相反 f 较大时, Δn 变化

对芯区影响较大. 对于不同的 f , 各模式截止条件不同. 因此合理选择芯包相对折射率差, 同样能够抑制 TM_{01} 和 TE_{01} 模, 有效减少高阶模数量.

当光纤中双模运转时, 假设 $d = 4.8 \mu\text{m}$, 计算 $f = 0.4 \sim 1$ 时, 基模 A_{eff} 随 Δn 的变化, 如图 7 所示. 固定 f 时, 随着 Δn 增加, A_{eff} 先逐渐下降, 后保持稳定. 这是由于 Δn 越大, 纤芯折射率越大, 束缚模场的能力越强, 模场更多的分布在纤芯中, 因此 A_{eff} 越小. 而当 Δn 增加到一定程度, 模场几乎完全束缚在纤芯中, A_{eff} 不再变化. 对于不同的 f , 观察到 A_{eff}

保持稳定后, f 越大, A_{eff} 越小. 这是显而易见的, 因为固定了 d , f 越大, Λ 越小, 芯区的等效尺寸越小, 所以 A_{eff} 越小. 同样, 此处不考虑 $f < 0.4$ 的情况.

综上, 取 $d = 4.8 \mu\text{m}$, $\Lambda = 12 \mu\text{m}$, $f = 0.4$, $\Delta n = 0.3\%$ 时, 基模 A_{eff} 达到 $724.21 \mu\text{m}^2$, 通过合理选择光纤结构参数, A_{eff} 甚至可以达到 $866.54 \mu\text{m}^2$, 远大于靠减小光纤的数值孔径来获得大模场面积的阶跃型单模大模场光纤 [15]. 对比已报道的普通少模光纤 [2] (基模有效面积约为 $130 \mu\text{m}^2$), MC-LMA-FMF 在增大有效面积上具有明显优势.

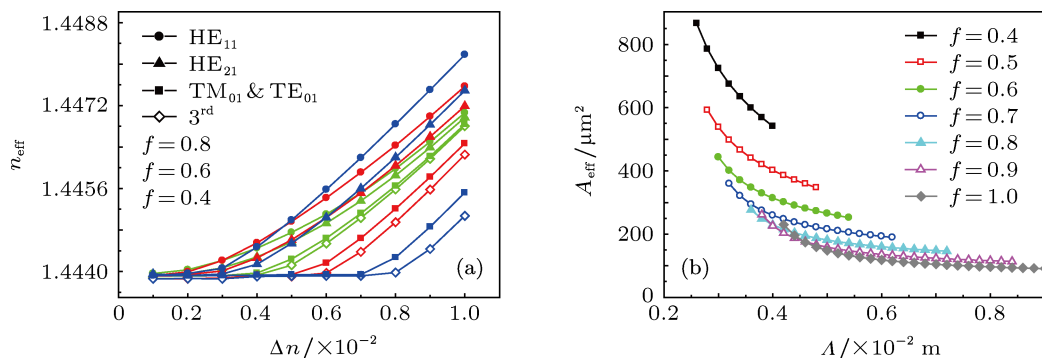


图 4 7-core-LMA-FMF (a) $f = 0.4, 0.6, 0.8$ 时各模式 n_{eff} 随 Δn 变化; (b) $f = 0.4 \sim 1$ 时基模 A_{eff} 随 Δn 变化

2.4 弯曲特性分析

光纤具有一定的易弯曲特性, 当弯曲达到一定程度导致光纤几何形变和折射率分布改变, 传输特性变化, 模场泄漏, 引发光纤弯曲损耗 [16]. 假设光纤沿 $+X$ 轴方向弯曲, R 为弯曲半径. 当光纤外涂覆层为低折射率材料时 (通常折射率为 1.36), 数值计算得到的弯曲损耗非常小, 可忽略, 因此实际制作中推荐使用低折涂覆, 既能保持大有效面积又能减小弯曲损耗. 而当光纤外涂覆层为高折射率材料时 (假设折射率为 1.5), 设 MC-LMA-FMF 的 $d = 4.8 \mu\text{m}$, $\Lambda = 12 \mu\text{m}$, $f = 0.4$, $\Delta n = 0.3\%$. 图 5 为高折涂覆时 MC-LMA-FMF 基模弯曲损耗随 R 的变化和阶跃型单模大模场光纤的比较, 用于比较的阶跃型单模大模场光纤 ($NA = 0.0333$, 纤芯直径 $20 \mu\text{m}$), 其有效面积与 MC-LMA-FMF 相近.

从图 5 中可以发现, MC-LMA-FMF 的两个偏振态具有较好的一致性, 随着 R 增大, 弯曲损耗指数下降后保持稳定. 相比单纯靠减小光纤的 NA 来获得大模场面积的阶跃型单模大模场光纤, MC-LMA-FMF 的弯曲特性有很大改善. 当 R 小于 0.6 m , MC-LMA-FMF 的弯曲损耗比阶跃型单模大模场光

纤小得多, 当 R 大于 0.4 m , MC-LMA-FMF 的弯曲损耗基本稳定在 0.03 dB/m , 同时基模 A_{eff} 能保持在 $735.99 \mu\text{m}^2$ 左右. 改善的弯曲特性归功于光纤结构中左右两侧的缺失空气孔, 它们截断了光纤基模场的泄漏通道, 一定程度上将模场限制在纤芯区域, 保证了光纤的大模场低弯曲损耗特性.

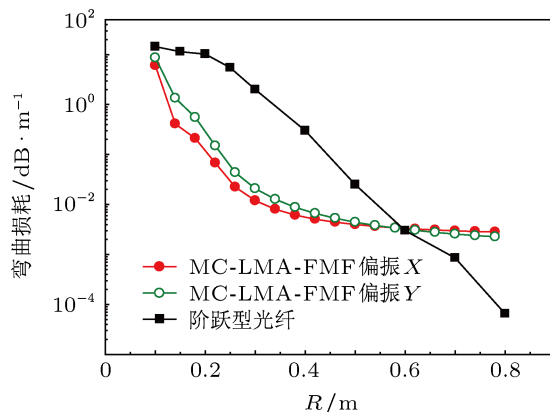


图 5 7-core-LMA-FMF 的弯曲损耗特性

3 十九芯大模场少模光纤

七芯大模场少模光纤能有效减少高阶模数量,

并且具有远大于普通少模光纤的有效面积, 但值得研究的是, 能否通过增加纤芯个数, 进一步扩大有效面积, 同时保持少模特性. 因此, 我们将大模场少模光纤的七芯结构扩展为十九芯, 研究其特性并与七芯大模场少模光纤对比分析.

3.1 光纤结构和模式特性

十九芯光纤剖面结构如图 6(a) 所示, 十九个纤

芯 (包括 11 个传统纤芯和 8 个缺失空气孔) 排列成近似七芯大模场少模光纤的结构. 假设 $d = 4 \mu\text{m}$, $\Delta n = 0.3\%$, 图 6(b) 为六个超模的有效折射率 n_{eff} 随芯间距的变化. TM_{01} 和 TE_{01} 模仍然被完全抑制, 随着 Λ 增大, 在很大范围内光纤稳定的传输 HE_{11} 模和 HE_{21} 模. 证明了与七芯光纤结构相似的十九芯光纤, 能保持与七芯光纤相似的模式特性, 实现双模运转. 与图 2(a) 相比, 十九芯光纤的 HE_{11} 模和 HE_{21} 模的 n_{eff} 更加接近.

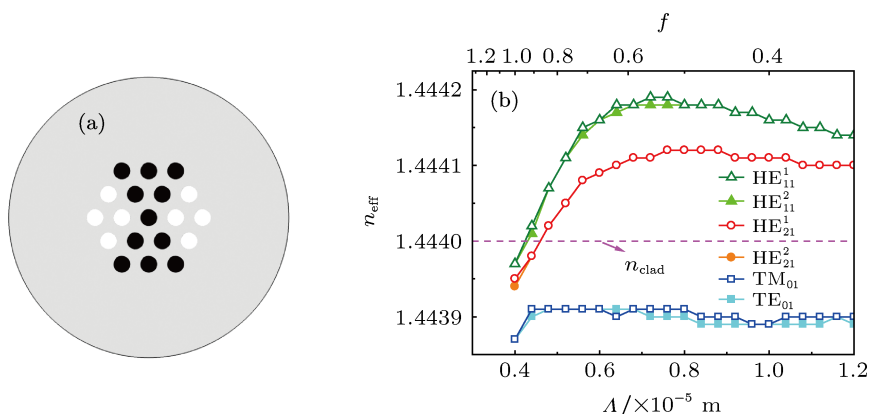


图 6 19-core-LMA-FMF (a) 剖面结构示意图; (b) 少模特性

3.2 结构参数对 19-core-LMA-FMF 特性的影响

3.2.1 芯间距和相对孔径的影响

假设 $\Delta n = 0.3\%$, $f = 0.4, 0.6, 0.8$ 时, 各模式 n_{eff} 随 Λ 的变化如图 7(a) 所示. 与图 3(a) 对比, 十九芯光纤各模式 n_{eff} 随 Λ 的变化趋势与七芯光纤基本相同. 不同的是, 十九芯光纤 HE_{11} 模和 HE_{21} 模的 n_{eff} 非常接近, 两者几近简并, 此现象在图 6(b) 中已有所体现, 在图 7(a) 中更加明显. 通过合理选择纤芯直径、芯间距和相对孔径, 十九芯光纤实现双模

运转. 当光纤中仅传输 HE_{11} 模和 HE_{21} 模时, 假设 $\Delta n = 0.3\%$, $f = 0.4—1$ 时, 基模 A_{eff} 随 Λ 的变化, 如图 7(b) 所示. 与图 3(b) 对比, 十九芯光纤基模 A_{eff} 随 Λ 的变化趋势与七芯光纤基本相同. 不同的是, 对于不同的 f , 十九芯光纤 A_{eff} 的上升幅度几乎相同, 不存在 f 越小, A_{eff} 增长越缓慢的现象. 这说明当纤芯数目增加, 芯与芯之间的耦合关系变得更加复杂, 耦合强度也更大, 简单地减小 f 或者增大 Λ , 并不能使芯与芯之间相互独立. 为此, 我们计算了 $f < 0.4$ 的情况进行验证, 如图 7(b) 右下附图所示, 当 $f < 0.2$ 和 0.3 时, A_{eff} 增长仍然没有变缓.

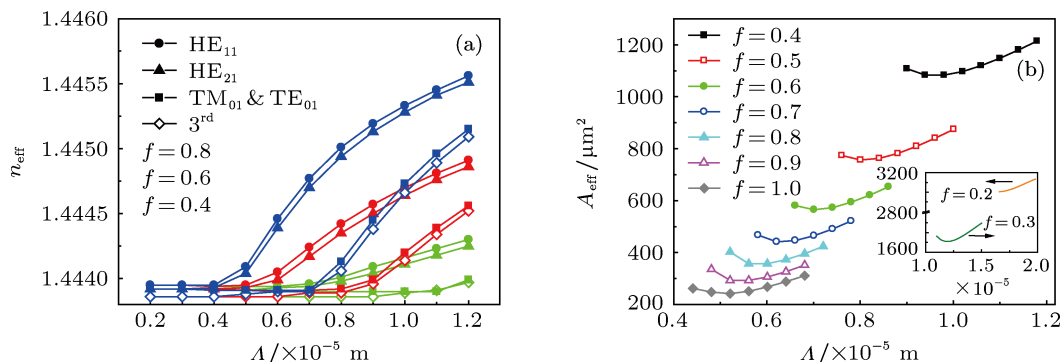


图 7 19-core-LMA-FMF (a) $f = 0.4, 0.6, 0.8$ 时各模式 n_{eff} 随 Λ 变化; (b) $f = 0.4—1$ 时基模 A_{eff} 随 Λ 变化

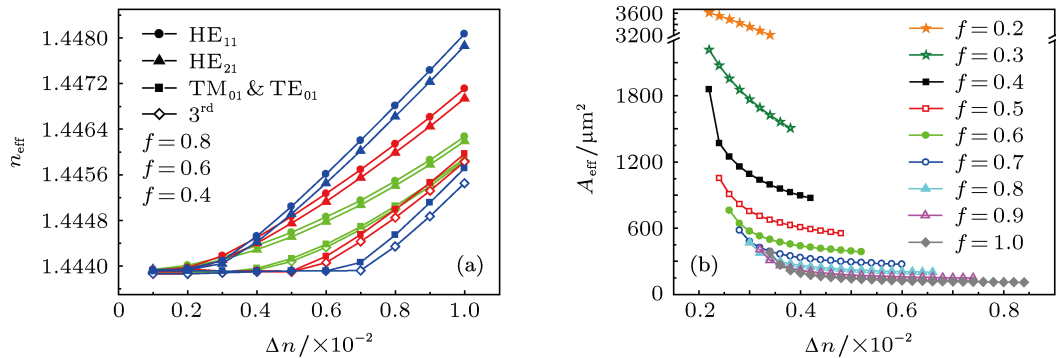


图8 19-core-LMA-FMF (a) $f = 0.4, 0.6, 0.8$ 时各模式 n_{eff} 随 Δn 变化; (b) $f = 0.2-1$ 时基模 A_{eff} 随 Δn 变化

3.2.2 芯包相对折射率差的影响

假设 $d = 4 \mu\text{m}$, $f = 0.4, 0.6, 0.8$ 时, 随着 Δn 从 0.1% 增加到 1%, 各模式 n_{eff} 的变化如图 8(a) 所示. 与图 4(a) 对比, 十九芯光纤各模式 n_{eff} 随 Δn 的变化趋势也与七芯光纤基本相同. 同样观察到, 十九芯光纤的 HE_{11} 模和 HE_{21} 模的 n_{eff} 非常接近, 两者几近简并, 与七芯光纤不同. 当光纤中仅传输 HE_{11} 模和 HE_{21} 模时, 假设 $d = 4 \mu\text{m}$, $f = 0.2-1$ 时, 基模 A_{eff} 随 Δn 的变化如图 8(b) 所示. 与图 4(b) 对比, 十九芯光纤基模 A_{eff} 随 Δn 的变化趋势与七芯光纤一致.

综上, 取 $d = 4.5 \mu\text{m}$, $\Lambda = 15 \mu\text{m}$, $f = 0.3$, $\Delta n = 0.3\%$ 时, 基模 A_{eff} 达到 $1896.79 \mu\text{m}^2$, 通过合理选择光纤结构参数, A_{eff} 甚至可以达到 $3617.55 \mu\text{m}^2$. 与七芯大模场少模光纤相比, 通过增加纤芯数目, 用相似的结构, 获得了远大于七芯光纤的有效面积. 对比多芯大模场单模光纤^[10] (基模有效面积为 $470 \mu\text{m}^2$) 和普通少模光纤^[2] (基模有效面积约为 $130 \mu\text{m}^2$), 十九芯大模场少模光纤无疑具有较大的优势.

3.3 弯曲特性分析

经数值计算, 当光纤外涂覆层为低折射率材料时 (通常折射率为 1.36), 得到的弯曲损耗同样非常小, 可忽略. 假设 $d = 4.5 \mu\text{m}$, $\Lambda = 15 \mu\text{m}$, $f = 0.3$, $\Delta n = 0.3\%$, 图 9 为高折涂覆 (假设折射率为 1.5) 时光纤基模弯曲损耗随 R 的变化. 十九芯光纤基模弯曲损耗随 R 的变化趋势也与七芯光纤基本相同. 不同的是, 随着 R 增大, 当弯曲损耗保持稳定时, 偏振 X 和 Y 方向的损耗相差大约 1.7 dB/m , 且差值也保持稳定, 说明十九芯光纤的缺失空气孔群使光纤结构的不对称性更严重. 取 Y 偏振方向, 保持 R 大于

0.4 m , 弯曲损耗小于 1 dB/m , 基模有效面积能保持在 $1902.83 \mu\text{m}^2$ 左右. 与七芯光纤对比, 基模有效面积大大提高, 而弯曲损耗却并没有成比例增加, 说明该 MC-LMA-FMF 具有良好的弯曲特性.

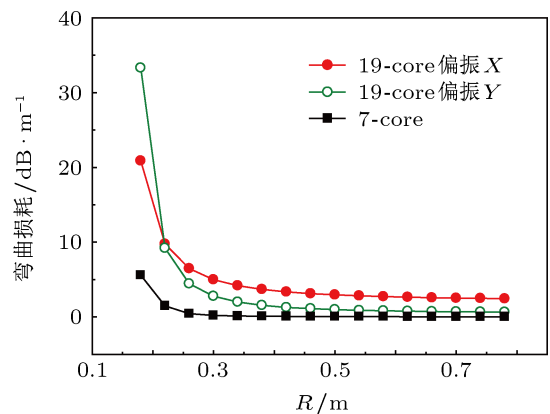


图9 19-core-LMA-FMF 的弯曲损耗特性

4 结论

本文提出了一种新型的多芯大模场少模光纤 (MC-LMA-FMF). 分析了该 MC-LMA-FMF 的模式特性和模场分布, 其包含缺失空气孔的特殊结构, 有效地抑制了高阶模式, 并使二阶模式的数量减少一半, 仅传输 HE_{11} 模和 HE_{21} 模, 同时实现了基模场的大有效面积. 对此结构的七芯光纤和进阶的十九芯光纤进行了数值设计分析, 在保持少模特性的同时, 七芯光纤的基模有效面积达到 $724.21 \mu\text{m}^2$, 光纤外层涂低折涂覆时弯曲损耗可忽略, 涂高折涂覆时, 当弯曲半径小于 0.6 m , MC-LMA-FMF 的弯曲损耗比阶跃型单模大模场光纤小得多, 当弯曲半径大于 0.4 m , MC-LMA-FMF 的弯曲损耗 0.03 dB/m , 同时基模有效面积能保持在 735.99

μm^2 左右. 进阶的十九芯光纤继承了七芯光纤的少模特性, 并进一步扩大了有效面积, 基模有效面积能达到 $1896.79 \mu\text{m}^2$, 涂低折涂覆时弯曲损耗可忽略, 涂高折涂覆时, 当弯曲半径大于 0.4 m , 弯曲损耗小于 1 dB/m , 同时基模有效面积能保持在 $1902.83 \mu\text{m}^2$ 左右. 合理地选择光纤结构参数, 基模有效面积甚至可以达到 $3617.55 \mu\text{m}^2$, 对比已报道的多芯大模场单模光纤 (基模有效面积为 $465 \mu\text{m}^2$) 和普通少模光纤 (基模有效面积为 $130 \mu\text{m}^2$), 具有较大的优势. 纤芯数目增加表现出的性能变化规律, 为

今后三十七芯甚至更多纤芯的 LMA-MC-FMF 设计提供了依据.

该多芯大模场少模光纤结构设计灵活, 适用于无源和有源光纤. 制作方法简便, 左右对称的空气孔结构使用光子晶体光纤制作工艺——管棒堆积法即可. 光纤的模场形状规则, 便于对准和熔接, 同时不需要特殊材料涂覆, 可满足今后高速大容量光纤传输系统及制作相应高功率器件的需求.

-
- [1] Garth S J, Pask C 1992 *J. Opt. Soc. Am. B* **9** 243
 - [2] Yaman F, Bai N, Huang Y K, Huang M F, Zhu B, Wang T, Li G F 2010 *Opt. Express* **18** 21342
 - [3] Yaman F, Bai N, Zhu B Y, Wang T, Li G F 2010 *Opt. Express* **18** 13250
 - [4] Bai N, Ip E, Huang Y K, Mateo E, Yaman F 2012 *Opt. Express* **20** 2668
 - [5] Randel S, Ryf R, Sierra A, Winzer P J, Gnauck A H, Bolle C A, Essiambre R J, Peckham D W, McCurdy A, Lingle R 2011 *Opt. Express* **19** 16697
 - [6] Wang C C, Zhang F, Tong Z, Ning T G, Jian S S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5035 (in Chinese) [王春灿, 张帆, 童治, 宁提纲, 简水生 2008 物理学报 **57** 5035]
 - [7] Hayashi T, Taru T, Shimakawa O, Sasaki T, Sasaoka E 2011 *Opt. Express* **19** 16576
 - [8] Fini J M, Zhu B, Taunay T F, Yan M F 2010 *Opt. Express* **18** 15122
 - [9] Fini J M 2011 *Opt. Express* **19** 4042
 - [10] Vogel M M, Abdou-Ahmed M, Voss A, Graf T 2009 *Opt. Lett.* **34** 2876
 - [11] Hayashi T, Sasaki T, Sasaoka E 2012 *Optical Fiber Communication Conference* Los Angeles, U.S.A, March 6–8, 2012 pOTu1D.4
 - [12] Takenaga K, Matsuo S, Saitoh K, Koshiba M 2012 *Optical Fiber Communication Conference* Los Angeles, U.S.A, March 6–8, 2012 pOTu1D.5
 - [13] Zhu B, Taunay T F, Yan M F, Fini J M, Fisheyn M, Monberg E M, Dimarcello F V 2010 *Opt. Express* **18** 11117
 - [14] Zhu B, Taunay T, Fisheyn M, Liu X, Chandrasekhar S, Yan M, Fini J, Monberg E, Dimarcello F 2011 *Optical Fiber Communication Conference* Los Angeles, U.S.A, March 6–8, 2012 pPDPB.7
 - [15] Richardson D J, Britton P, Taverner D 1997 *Elec. Lett.* **33** 1955
 - [16] Guo Y Y, Hou L T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4036 (in Chinese) [郭艳艳, 侯蓝田 2010 物理学报 **59** 4036]

Characterization and comparison of 7-core and 19-core large-mode-area few-mode fibers*

Lin Zhen^{1)2)†} Zheng Si-Wen¹⁾²⁾ Ren Guo-Bin¹⁾²⁾ Jian Shui-Sheng¹⁾²⁾

1) (Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of EMC, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

2) (Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 30 August 2012; revised manuscript received 19 October 2012)

Abstract

A novel multi-core large-mode-area few-mode fiber (MC-LMA-FMF) is proposed in this paper. The special structure of air holes makes it operate in few modes (HE_{11} and HE_{21} mode only). Numerical analysis shows that the 7-core-LMA-FMF can maintain a stable dual-mode operation and the effective area of the fundamental mode can reach $866.54 \mu\text{m}^2$. The regular pattern that fiber structure parameters affect mode characteristics and the effective area is investigated, and the similarities and differences brought in by increasing the number of cores is also analyzed. The advanced 19-core-LMA-FMF inherits the few-mode characteristic, meanwhile, the effective area of the fundamental mode can be as high as $3617.55 \mu\text{m}^2$. Compared with the reported few-mode fibers, MC-LMA-FMF obtains a large effective area and good bending characteristics. These advantages enable this new type of fiber to be a potential candidate for high-speed large-capacity optical fiber transmission systems or high power fiber amplifiers and lasers.

Keywords: few-mode fiber, multi-core, large-mode-area, bending loss

PACS: 42.81.-i, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.62.064214

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB328206), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61275092), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61178008), the Foundation for Key Program of Ministry of Education, China (Grant No. 210267), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China.

† Corresponding author. E-mail: 08111024@mail.bjtu.edu.cn