

少模光纤的弯曲损耗研究

郑兴娟 任国斌 黄琳 郑鹤玲

Study on bending losses of few-mode optical fibers

Zheng Xing-Juan Ren Guo-Bin Huang Lin Zheng He-Ling

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 064208 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.064208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于包层模谐振的三包层石英特种光纤温度传感特性研究

Research on the temperature sensing characteristics of triple cladding quartz specialty fiber based on cladding mode resonance

物理学报.2016, 65(2): 024211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024211>

基于色散补偿光纤的高速光纤光栅解调方法

A demodulation method of high-speed fiber Bragg grating based on dispersion-compensating fiber

物理学报.2015, 64(23): 234207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234207>

具有四模式的低串扰及大群时延多芯微结构光纤的设计

Analysis of a novel four-mode micro-structured fiber with low-level crosstalk and high mode differential group delay

物理学报.2015, 64(23): 234206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234206>

掺Bi石英光纤的 γ 射线辐照和温度影响特性

Irradiation and temperature influence on the Bi-doped silica fiber

物理学报.2015, 64(22): 224220 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224220>

基于表面等离子体共振和定向耦合的D形光子晶体光纤折射率和温度传感器

D-shaped photonic crystal fiber refractive index and temperature sensor based on surface plasmon resonance and directional coupling

物理学报.2015, 64(22): 224221 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224221>

少模光纤的弯曲损耗研究*

郑兴娟¹⁾²⁾ 任国斌^{1)2)†} 黄琳¹⁾²⁾ 郑鹤玲³⁾

1) (北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

2) (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)

3) (国家电网山东省电力公司临沂供电公司, 临沂 276000)

(2015年10月10日收到; 2015年12月1日收到修改稿)

随着光纤通信容量的不断增加, 基于少模光纤的模分复用技术由于其多信道复用、高频谱效率及低非线性效应成为目前提高光纤通信容量的研究热点. 本文推导得到了适用于少模光纤中高阶模式弯曲损耗的计算公式, 系统研究了下陷层辅助弯曲不敏感抛物线型少模光纤的主要参数 (包括芯层半径、芯层到下陷层距离、下陷层宽度及下陷层折射率差) 对其弯曲损耗特性的影响. 研究表明: 对于少模光纤, 模式阶数越高, 光纤的弯曲敏感性越高; 随纤芯与下陷层间距离的变化, 光纤各阶模式的弯曲损耗均存在一个最小值. 本文结论对弯曲不敏感少模光纤的设计、制造及少模光纤弯曲性能优化具有指导意义.

关键词: 少模光纤, 弯曲损耗, 下陷层辅助, 弯曲不敏感

PACS: 42.81.-i, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.65.064208

1 引言

随着光纤通信网络规模不断扩展, 容量快速增长, 时分复用、偏振复用、波分复用及相干接收等技术极大地提高了单模光纤的传输容量^[1-3]. 但由于固有的非线性效应的限制, 标准单模光纤传输系统容量已经接近其物理极限^[4], 探索新的可用于大幅增加传输容量的光传输机理以及新的复用技术势在必行. 基于少模光纤的模分复用技术(mode division multiplexing, MDM)可以成倍地提高系统传输容量和频谱效率^[5], 具有很大的潜力, 成为未来高速率、大容量传输媒质的研究焦点. MDM技术利用光纤每个模式间的正交性, 将每个模式作为独立的信道, 形成多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)通道, 提高系统传输容量^[6]. 作为模分复用的传输媒质的少模光纤是指通过合理设计光纤使有限数量的模式被激励并传输. 相比于单模光纤, 基于少模光纤的

MDM技术增加复用信道数, 提高了频率效率, 扩充了光纤传输容量, 同时通过增大有效面积降低了非线性效应. 另一方面, 相比于多模光纤, 少模光纤控制了模式数量, 优化了模式色散和串扰, 成为新一代传输媒质的研究热点. 但一般而言, 少模光纤在铺设、安装时其高阶模的弯曲损耗相较于单模光纤(基模)的弯曲损耗会更为严重. 因此, 如何降低少模光纤的弯曲损耗是能否使其广泛应用的关键.

随着全球通信业的发展和人们对通信数据的需求的增长, 光纤入户(fiber to the home)得到了快速的普及. 从1976年Marcuse^[7]提出单模光纤的弯曲损耗计算方法, 到2006年ITU-T G657用于接入网的低弯曲损耗敏感单模光纤和光缆特性标准的提出, 单模光纤弯曲损耗的研究已取得了长足的进步^[8-12]. 目前抗弯损单模光纤已经商用化, 并应用于我国一级干线网、二级干线网、城域网与接入网络, 有力支撑了国家宽带信息化建设. 而对于少模光纤^[13-17], Schulze等^[14]提出适用于普通阶

* 国家自然科学基金(批准号: 61178008)和中央高校基本科研业务费专项基金(批准号: 2011RC050)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gbren@bjtu.edu.cn

跃型少模光纤弯曲损耗的方法, 但此方法不适合对复杂结构光纤的分析; Lars 等 [15] 提出了一种渐变型下陷层辅助少模光纤, 这种结构能够很好地控制少模光纤的弯曲损耗, 但未涉及光纤各阶模式的弯曲损耗的特点; Denis [16] 展示了一种基于 50 μm 芯径的梯度型少模光纤的高抗弯曲特性的传输系统, 通过改变 $n_{\text{eff}}/n_{\text{clad}}$ 可以使 1550 nm 波长光纤弯曲损耗降至 0.15 dB/10 圈; 林楨等 [17] 提出一种新型的多芯大模场少模光纤, 此光纤结构具有较大的有效面积、良好的弯曲特性, 但文中仅对基模的弯曲损耗进行了研究. 现阶段对于少模光纤中高阶模式弯曲损耗特性的研究尚处于空白.

本文主要针对下陷层辅助抛物线型少模光纤的弯曲损耗进行研究. 通过微扰法推导出各高阶模式弯曲损耗的计算公式; 系统地研究了下陷层辅助抛物线型少模光纤的四个重要结构参量(纤芯半径、纤芯与下陷层间距离、下陷层宽度及下陷层折射率差)对其弯曲特性的影响. 本文的研究对少模光纤的制造及光纤结构的优化具有指导意义.

2 少模光纤弯曲损耗理论

由于抛物型折射率纤芯少模光纤具有较低模式差分群延迟 (mode differential group delay) [5], 本文主要研究下陷层辅助抛物型折射率纤芯少模光纤的弯曲损耗特性. 图 1 为下陷层辅助弯曲不敏感抛物线型少模光纤的结构示意图. 如图所示, 设该少模光纤纤芯半径为 a , 芯层与下陷层间距离为 b , 下陷层宽度为 c , 芯层最大折射率为 n_1 , 芯层与包层间最大折射率差为 Δn_1 , 下陷层折射率差为 Δn_2 , 包层的折射率为 n_2 .

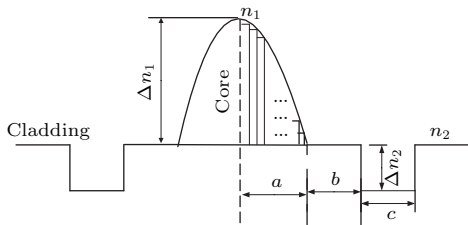


图 1 下陷层辅助弯曲不敏感抛物线型少模光纤结构示意图
Fig. 1. Diagram of trench-assisted bend-insensitive parabolic-profile FMs.

本文主要采用标量模式结合微扰法对弱导光纤高阶模的弯曲损耗进行研究 [18–23]. 首先定义抛物线型少模光纤 (parabolic-profile few mode fibers,

PPFMFs) 的芯层折射率分布为 [12]

$$n^2(r) = n_2^2[1 + 2\Delta y(r)], \quad (1)$$

其中, $\Delta = (n_1^2 - n_2^2)/(2n_2^2)$, 抛物线方程 $y(r) = 1 - (r/a)^2$. 为了研究 PPFMFs 的弯曲损耗, 我们应用近似取样计算抛物线型纤芯, 如图 1 所示, 将抛物线型纤芯等分成 q 层, 每层的折射率 n_N 用抛物线方程取样计算得到的折射率值近似 [12].

在圆光波导中, 阶跃型单模光纤在扰动条件下, 包层中的场可以表示为 $\psi(r, \theta) = K_0(\kappa r)$ [18,19], 其中 $\kappa^2 = \beta^2 - k^2 n_{\text{clad}}^2$. 对抛物线型单模光纤弯曲损耗的计算是基于阶跃型单模光纤计算原理重新定义扰动场和非扰动场 [12]. 类似地, 本文将 PPFMFs 中等分成 q 层芯层结构定义为非扰动场, 内包层、下陷层及外包层部分定义为扰动场, 此时 PPFMFs 中 LP_{mn} 模的扰动场可以用第二类变形贝塞尔函数 K_m 表示, 同时在扰动场和非扰动场边界处满足场连续的条件. 因此, LP_{mn} 模在光纤包层中的场可表示为 [20]

$$\psi(r, \theta) = K_m(\kappa r) \cos(m\theta), \quad (2)$$

其中, $\kappa^2 = \beta^2 - k^2 n_{\text{clad}}^2$, $k = 2\pi/\lambda$, n_{clad} 表示包层折射率, β 为传输常数, r 表示纤芯半径, K_m 为第二类变形贝塞尔函数. 对于弯曲下陷层辅助抛物线型少模光纤, 图 2 (a) 为光纤弯曲示意图. 如图所示, 弯曲光纤的剖面为 x - y 平面. 由 K_m 和 K_0 的微分关系, (2) 式可以表示为

$$K_m(\kappa r) \exp(im\theta) = (-1)^m \kappa^{-m} (\partial/\partial x + i\partial/\partial y)^m K_0(\kappa r). \quad (3)$$

令

$$\zeta_m = \kappa^{-m} \text{Re} \left[\left(\frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y} \right)^m \right],$$

$$\xi_m = \kappa^{-m} \text{Im} \left[\left(\frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y} \right)^m \right].$$

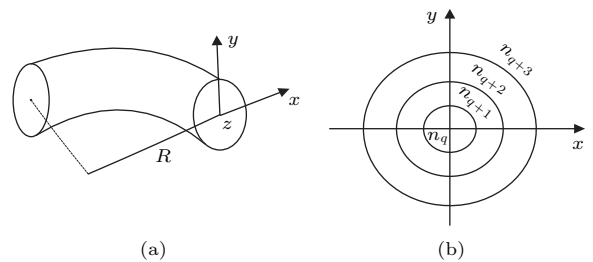


图 2 (a) 光纤弯曲示意图; (b) 多包层结构圆光纤剖面图
Fig. 2. (a) Diagram of bent fiber; (b) cross-section of multi-layer circular fiber.

图 2(b) 为弯曲光纤剖面图, n_q 表示纤芯折射率, 本文中多芯层光纤包层分为 3 层 (内包层、下陷层及外包层, 其折射率分别为 n_{q+1} , n_{q+2} 和 n_{q+3}). 由弱导近似, 对弯曲光纤包层第 t 层 ($t = q + 1, q + 2, q + 3$) 的标量场可展开为傅里叶积分^[18,19]:

$$\psi_t(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ D_t(\zeta) Bi[X_t(x, \zeta)] + H_t(\zeta) Ai[X_t(x, \zeta)] \right\} \exp(-i\zeta y) \frac{d\zeta}{2\pi}, \quad (4)$$

其中,

$$X_t(x, \zeta) = \left(\frac{R}{2k^2 n_t^2} \right)^{2/3} \times \left[\beta^2 + \zeta^2 - k^2 n_t^2 \left(1 + \frac{2x}{R} \right) \right], \quad (5)$$

ζ 为 y 的傅里叶变换形式, t 表示多包层的第 t 层, β 为未弯曲光纤传输常数^[20], Bi 表示前向倏逝场, Ai 表示后向倏逝场, n_q 为抛物线型光纤最外层纤芯折射率参数, n_t 为第 t 层包层的折射率, $k = 2\pi/l$, l 为波长, R 为弯曲半径. 光纤包层的最外层 D_{q+3} 和 H_{q+3} 有 $H_{q+3}(\zeta) = -D_{q+3}(\zeta)$. 每相邻两层之间满足连续性边界条件, 特别是在芯层与包层界面, 由场连续性条件可得^[19]: $D_{q+1}(\xi) = GH_{q+1}(\xi)$. 由包层扰动场和纤芯非扰动场之间边界处连续^[18,22]:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{q+1}(a, y) \exp(i\zeta y) dy \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} K_m \left[\gamma \sqrt{a^2 + y^2} \right] \cos(m\theta) \\ & \quad \times \exp(i\zeta y) dy \\ &= D_{q+1}(\zeta) Bi[X_{q+1}(a, \zeta)] \\ & \quad + H_{q+1}(\zeta) Ai[X_{q+1}(a, \zeta)], \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\gamma = (\beta^2 - k^2 n_2^2)^{1/2}$. 结合 (2) 和 (3) 式, 可以求得:

当 $m = 0$ 时

$$H_{q+1}(\zeta) = \frac{\pi \exp(-a(\gamma^2 + \zeta^2)^{1/2})}{\{GBi[X_{q+1}(a, \zeta)] + Ai[X_{q+1}(a, \zeta)]\}(\gamma^2 + \zeta^2)^{1/2}}; \quad (7)$$

当 $m = 1$ 时

$$H_{q+1}(\zeta) = \frac{\pi \exp(-a(\gamma^2 + \zeta^2)^{1/2})}{\gamma \{GBi[X_{q+1}(a, \zeta)] + Ai[X_{q+1}(a, \zeta)]\}}$$

$$\times \left(1 + \frac{\zeta}{(\gamma^2 + \zeta^2)^{1/2}} \right); \quad (8)$$

当 $m = 2$ 时

$$\begin{aligned} & H_{q+1}(\zeta) \\ &= \frac{\pi \exp(-a(\gamma^2 + \zeta^2)^{1/2})}{\gamma^2 \{GBi[X_{q+1}(a, \zeta)] + Ai[X_{q+1}(a, \zeta)]\}} \\ & \quad \times \left[(\gamma^2 + \zeta^2)^{1/2} + 2\zeta + \frac{\zeta^2}{(\gamma^2 + \zeta^2)^{1/2}} \right]; \end{aligned} \quad (9)$$

其中, a 表示纤芯半径. 后向倏逝场为当光纤弯曲时包层中的扰动场反射回纤芯形成的. 光纤中弯曲损耗可以由后向倏逝场在纤芯中心 (坐标原点 $x = 0, y = 0$) 的幅度计算得到^[21]:

$$\begin{aligned} \rho &= \psi_{BW}(x, y)|_{x=0, y=0} \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H_{q+1}(\zeta) Ai[x_{q+1}(x, \zeta)] \\ & \quad \times \exp(-i\zeta y) d\zeta|_{x=0, y=0}. \end{aligned} \quad (10)$$

最终光纤的弯曲损耗因子^[23,24]为

$$2\alpha = -\frac{\text{Im}(\rho)}{\beta \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{\text{unpert}}^2 ds}, \quad (11)$$

其中, ψ_{unpert} 为非扰动场. 其影响因素主要有光纤的结构、弯曲半径及波长等因素. 需要强调的是: 这种算法对计算具有复杂折射率分布的多包层光纤的弯曲损耗同样适用^[25].

通常光纤中的弯曲损耗分为微弯曲损耗和宏弯曲损耗, 本文主要针对宏弯曲损耗进行研究. 结合 (11) 式, 对于长度为 L 的光纤, 其光纤宏弯曲损耗为^[26]

$$L_s = 10 \log_{10}(\exp(2\alpha L)) = 8.686\alpha L. \quad (12)$$

为了验证我们得到的解析公式的正确性, 将其结果与 COMSOL 有限元软件计算得到弯曲损耗的结果进行了对比. 微扰算法和有限元方法 (finite element method, FEM) 的参数设定为 (除特别说明, 本文设定光纤的参数如下所示): $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\Delta n_1 = 0.004$, $\Delta n_2 = -0.005$, $n_2 = 1.444$, $a = 15 \mu\text{m}$, $b = 5 \mu\text{m}$, $c = 8 \mu\text{m}$, 设定弹光修正因子为 1.28^[26]. 微扰算法仿真模型中设定包层无限大, FEM 算法光纤包层在 $62.5 \mu\text{m}$ 处采用完美匹配层 (perfectly matched layer, PML) 以吸收向外辐射的光功率. 图 3 为 PPFMFs 的前四个模式 LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02} 模的弯曲损耗在

弯曲半径 R 在 8—20 mm 时得到的有限元结果和微扰法理论计算的结果对比. 可以看出, 有限元计算和微扰法理论计算公式针对光纤弯曲损耗计算结果能很好地符合.

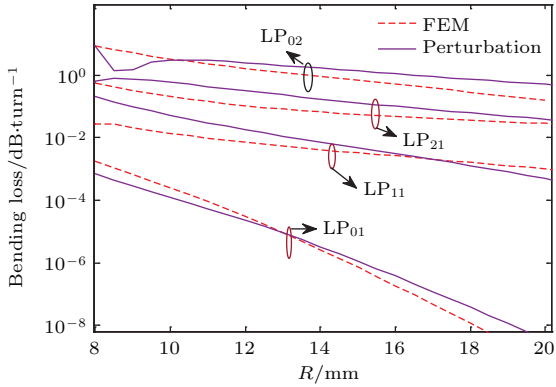


图3 (网刊彩色) 有限元和理论计算弯曲损耗对比
Fig. 3. (color online) Comparison of calculated bending losses by theoretical and FEM.

3 光纤结构参数对弯曲损耗的影响

3.1 光纤纤芯半径对弯曲损耗的影响

归一化频率 V 作为影响光纤一个重要的综合性参量, 抛物线型光纤可以定义光纤的等效归一化频率

$$V_{\text{eff}}^2 = 2k_0^2 \int_0^a (n_{\text{core}}^2(r) - n_{\text{clad}}^2) r dr, \quad (13)$$

其中, V_{eff} 为抛物线型光纤的等效归一化频率, 影响光纤的模式数量. 设定 $NA(r) = \sqrt{n_{\text{core}}^2(r) - n_{\text{clad}}^2}$. 如图 4 所示, 在不同的 V_{eff} 条件下, 抛物型光纤的 Δn_1 随光纤参数 a 在 12—16 μm 间的变化规律.

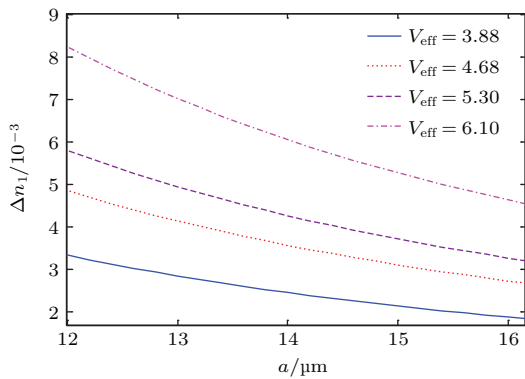


图4 (网刊彩色) 等效归一化频率 V_{eff} 取不同值时, Δn_1 与光纤参数 a 之间的变化关系
Fig. 4. (color online) Δn_1 as a function of core radius at different effective normalization frequency V_{eff} .

从图中可以看出, 在 V_{eff} 一定的条件下, Δn_1 随光纤半径 a 的增大逐渐减小. 本文中选取 $V_{\text{eff}} = 5.3$, 对少模光纤中前四个模式 LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02} 的弯曲性能进行研究. 在等效归一化频率 $V_{\text{eff}} = 5.3$ 不变的前提下, 图 4 为在 1.55 μm 波长, LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02} 模式的弯曲损耗 (图 5 (a)) 及相应模式的有效面积 (A_{eff}) (图 5 (b)) 随光纤参数 a 在 12—16 μm 间的变化规律. 此时光纤的弯曲半径为 $R = 10$ mm.

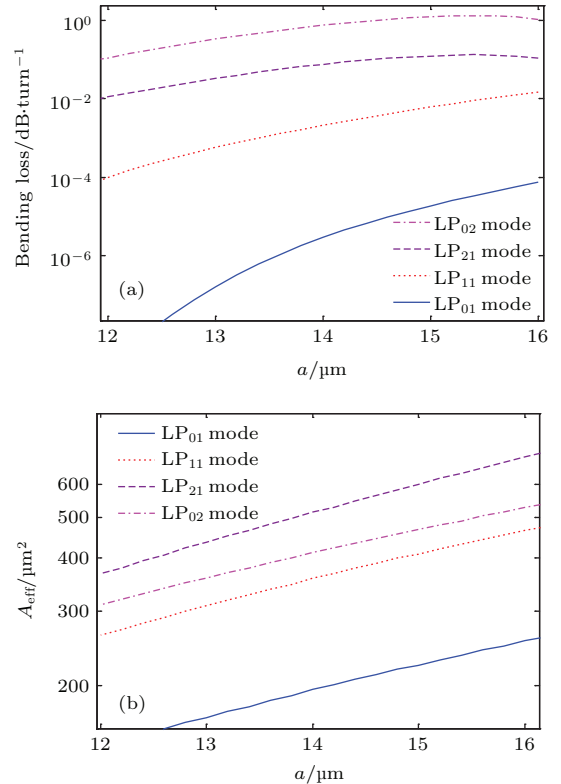


图5 (网刊彩色) 1550 nm 波长下, LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02} 模式的 (a) 弯曲损耗与 (b) 有效面积与参数 a 之间的关系

Fig. 5. (color online) (a) Bending losses and (b) A_{eff} of LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} and LP_{02} modes as a function of a at 1550 nm.

从图 5 (a) 中可以看出, 当纤芯从 12 μm 增加到 16 μm 时, 光纤各阶模式的弯曲损耗明显增加, LP_{01} 模的弯曲损耗由 7.18×10^{-9} dB/turn 增加到 2.60×10^{-3} dB/turn, LP_{11} 模弯曲损耗由 8.12×10^{-6} dB/turn 增加到 5.54×10^{-2} dB/turn, LP_{21} 模弯曲损耗由 8.44×10^{-2} dB/turn 增加到 5.79×10^{-1} dB/turn, LP_{02} 模弯曲损耗由 4.28×10^{-1} dB/turn 增加到 5.15 dB/turn; 当纤芯半径 $a = 15$ μm 时, LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02} 模的弯曲损耗分别为 1.139×10^{-6} dB/turn, $4.474 \times$

10^{-3} dB/turn, 0.132 dB/turn 和 1.353 dB/turn. 光纤的模式阶数越高, 光纤的弯曲损耗敏感性越高, 且随光纤纤芯的增加, 损耗的增加幅度越小. 这是由于随纤芯半径的增大, 光纤各模式的有效面积 (A_{eff}) 逐渐增大, 如图 5 (b) 所示, 有效归一化频率恒定条件下, 光纤中各阶模式的 A_{eff} 随芯径的增加而逐渐增加, 各阶模式中 A_{eff} 的增加使纤芯对的光场束缚能力减弱, 最终导致各阶模式的弯曲损耗的增加. 值得注意的是, LP_{02} 的 A_{eff} 小于 LP_{21} 的 A_{eff} , 而 LP_{02} 的弯曲损耗比 LP_{21} 模式的弯曲损耗要高.

3.2 光纤结构参数对弯曲损耗的影响

图 6 为波长为 1310 nm (图 6 (a)) 和 1550 nm (图 6 (b)) 时, LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02} 模式的弯曲损耗随光纤参数 b 在 0 μm 到 30 μm 间的变化规律. 随 b 值的变化, 各阶模式的弯曲损耗均存在一个最小值, 定义此最小值的位置 (或最小值优化点) 为 b_{opt} . 波长为 1310 nm 时 (图 6 (a)), 在 $b_{\text{opt}} = 16.4 \mu\text{m}$ 处, LP_{01} 到达弯曲损耗最小值 (5.617×10^{-8} dB/turn); 在 $b_{\text{opt}} = 7.8 \mu\text{m}$ 处, LP_{11} 到达弯曲损耗最小值 (1.637×10^{-4} dB/turn); 在 $b_{\text{opt}} = 4.4 \mu\text{m}$ 处, LP_{21} 到达弯曲损耗最小值 (5.067×10^{-3} dB/turn); 在 $b_{\text{opt}} = 4.2 \mu\text{m}$ 处, LP_{02} 到达弯曲损耗最小值 (2.167×10^{-2} dB/turn). 波长为 1550 nm 时 (图 6 (b)), 在 $b_{\text{opt}} = 14.8 \mu\text{m}$ 处, LP_{01} 到达弯曲损耗最小值 (6.675×10^{-6} dB/turn); 在 $b_{\text{opt}} = 6.4 \mu\text{m}$ 处, LP_{11} 到达弯曲损耗最小值 (5.658×10^{-3} dB/turn); 在 $b_{\text{opt}} = 4.2 \mu\text{m}$ 处, LP_{21} 到达弯曲损耗最小值 (2.545×10^{-2} dB/turn); 在 $b_{\text{opt}} = 4.6 \mu\text{m}$ 处, LP_{02} 到达弯曲损耗最小值 (0.264 dB/turn).

由图 6 可知, 光纤中模式越高, b_{opt} 值越小. 同时, 随着 b 值的增大, 各阶模式的弯曲损耗先逐渐减小, 到达 b_{opt} 值之后, 各阶模式的弯曲损耗会迅速增长, 到达最大值之后, 各阶模式弯曲损耗出现周期性震荡. 这表明此时光纤的各阶模式与包层模式发生了共振耦合 [24].

图 7 为波长为 1550 nm 时, LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02} 模式的 A_{eff} 随光纤参数 b 在 0—20 μm 之间的变化规律. 如图所示, 高阶模式的 A_{eff} 随 b 值的增大, 在 0—10 μm 之间 A_{eff} 逐渐增大, 在 $b > 10 \mu\text{m}$ 后, A_{eff} 基本保持不变.

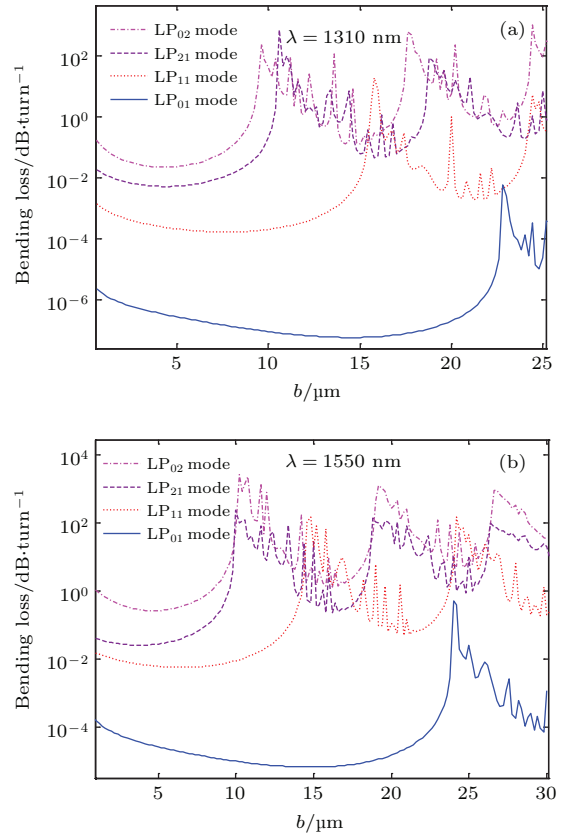


图 6 (网刊彩色) (a) 1310 nm 和 (b) 1550 nm 波长下, LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02} 模式的弯曲损耗与参数 b 之间的关系
Fig. 6. (color online) Bending losses of LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} and LP_{02} modes as a function of b at (a) 1310 nm and (b) 1550 nm.

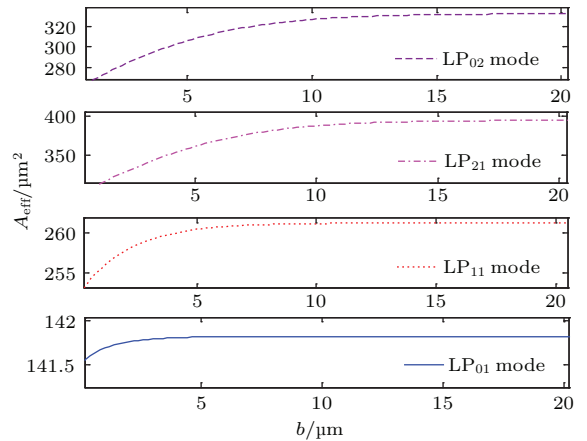


图 7 (网刊彩色) 1550 nm 波长下, LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02} 模式 A_{eff} 与参数 b 之间的关系
Fig. 7. (color online) A_{eff} of LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} and LP_{02} modes as a function of b at wavelength 1550 nm.

由图 7 可知, 当 b 值逐渐增大时, LP_{01} 的 A_{eff} 基本趋于恒定值, LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{02} 模式的 A_{eff} 先逐渐增大之后趋于恒定值, b 值的增加对高阶模式 A_{eff} 增加的幅度影响更大; LP_{02} 的 A_{eff} 小于 LP_{21}

的有效面积, 而LP₀₂的弯曲损耗高于LP₂₁弯曲损耗. 在设计优化弯曲不敏感少模光纤时, 应综合考虑 b_{opt} 位置及 A_{eff} 对弯曲损耗的影响, 同时也需避免周期震荡引起的高峰共振耦合峰的出现, 以避免由高峰共振耦合峰引起弯曲损耗的加剧.

图8为波长在1550 nm时, LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁和LP₀₂模式的弯曲损耗随光纤参数 c 在0—20 μm 之间的变化曲线. 如图所示, 随 c 的增大, 各阶模式的弯曲损耗逐渐减小; 在 c 值一定条件下, 光纤模式越高, 弯曲损耗越大. 图9为波长在1550 nm时, LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁和LP₀₂模式的弯曲损耗随光纤参数 Δn_2 在 -8×10^{-3} 到0之间的变化规律. 如图所示, 随下陷层深度的增大, 各阶模式的弯曲损耗逐渐减小; Δn_2 一定时, 光纤模式越高, 弯曲损耗越大.

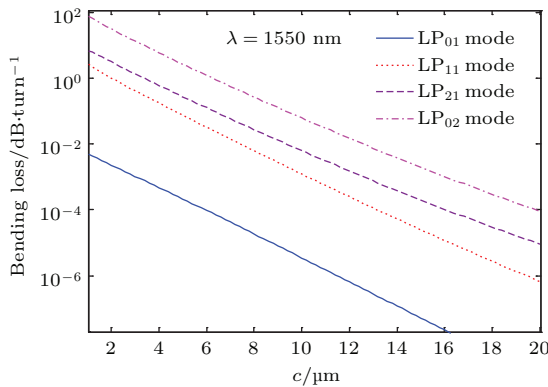


图8 (网刊彩色) 1550 nm 波长下, LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁和LP₀₂模式的弯曲损耗与光纤参数 c 之间的关系

Fig. 8. (color online) Bending losses of LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁ and LP₀₂ modes as a function of c at wavelength 1550 nm.

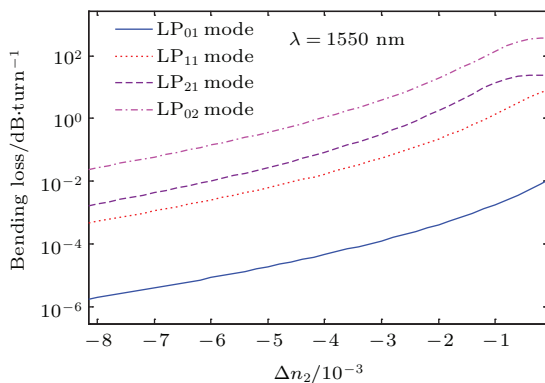


图9 (网刊彩色) 1550 nm 波长下, LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁和LP₀₂模式的弯曲损耗与光纤参数 Δn_2 之间的关系

Fig. 9. (color online) Bending losses of LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁ and LP₀₂ modes as a function of Δn_2 at wavelength 1550 nm.

由图6可知, 少模光纤各模式在波长为1550 nm时比1310 nm具有更高的弯曲敏感性. 由于各模式的 A_{eff} 在1310 nm波长条件下比1550 nm波长条件下小, 而 A_{eff} 越小对光的束缚能力越强, 对弯曲损耗的降低作用越明显. 同时波长一定的条件下, 模式越高弯曲敏感性越高. 由图8和图9可以看出, 在波长为1550 nm时, 随 c 和 Δn_2 的变化, 弯曲不敏感少模光纤的弯曲损耗单调变化. 增大光纤的下陷层宽度及下陷层折射率差都能降低弯曲损耗, 但过小 A_{eff} 会使通过光纤横截面的能量密度过大进而引起非线性效, 在实际应用中, 需合理地控制 A_{eff} 的大小, 同时下陷层折射率参数不宜过大, 由于制作工艺的限制, 下陷层宽度也不宜过大.

4 结 论

本文应用微扰法推导出弯曲不敏感少模光纤LP₀₁, LP₀₂, LP₁₁和LP₂₁模式的弯曲损耗的计算公式, 并与有限元方法得到的结果对比, 验证了方法的正确性. 研究了抛物线型弯曲不敏感少模光纤各个参数对弯曲损耗的影响, 分析了其弯曲特性. 研究表明: 光纤的模式阶数越高, 其弯曲敏感性越高; 保持光纤有效归一化频率不变的前提下, 随纤芯的增大, 弯曲损耗逐渐增大; 下陷层与纤芯之间的距离作为影响光纤弯曲损耗的特殊参数, 各阶模式随着芯层与下陷层之间距离的变化存在一个 b_{opt} , 可用于光纤结构的优化; 增大下陷层宽度及下陷层折射率差都可以有效降低弯曲损耗. 本文结论对弯曲不敏感光纤的设计、制造及光纤结构的优化具有重要意义.

参考文献

- [1] Desurvire E B 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4697
- [2] Morioka T 2009 *Proceedings of the 14th Opto-Electronics and Communications Conference* Hong Kong, China, July 13–17, 2009 p1
- [3] Yan L S, Liu X, Shieh W 2011 *IEEE Photon. J.* **3** 325
- [4] Essiambre R J, Kramer G, Winzer P, Foschini G J, Goebel B 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 662
- [5] Xie Y W, Fu S N, Zhang H L, Tang M, Shen P, Liu D M 2013 *Acta Opt. Sin.* **9** 09060101 (in Chinese) [谢意维, 付松年, 张海亮, 唐明, 沈平, 刘德明 2013 光学学报 **9** 09060101]
- [6] Yao S C, Fu S N, Zhang M M, Tang M, Shen P, Liu D M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 144215 (in Chinese) [姚殊

- 畅, 付松年, 张敏明, 唐明, 沈平, 刘德明 2013 物理学报 **62** 144215]
- [7] Marcuse D 1976 *J. Opt. Soc. Am.* **66** 311
- [8] Watekar P R, Ju S, Yoon Y S, Lee Y S, Han W T 2008 *Opt. Express* **16** 13545
- [9] Watekar P R, Ju S, Htein L, Han W T 2010 *Opt. Express* **18** 13761
- [10] Goto Y, Nakajima K, Kurashima T 2012 *Proceeding of the 17th Opto-electronics and Communications Conference (OECC)* BuSan, July 2–6, 2012 p813
- [11] Lin Z 2014 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Beijing Jiaotong University) (in Chinese) [林楨 2007 博士学位论文 (北京: 北京交通大学)]
- [12] Li H S, Ren G B, Gao Y X, Lian Y D, Cao M, Jian S S 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 1293
- [13] Jiang S S, Liu Y, Xing E J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 064212 (in Chinese) [姜姗姗, 刘艳, 邢尔军 2015 物理学报 **64** 064212]
- [14] Schulze C, Lorenz A, Flamm D, Hartung A, Schröter S, Bartelt H, Duparré M 2013 *Opt. Express* **21** 3170
- [15] Lars G N, Sun Y, Nicholson J W, Jakobsen D, Jespersen K G, Lingle R, Palsdottir B 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 3693
- [16] Denis D 2009 *Opt. Express* **17** 22081
- [17] Lin Z, Zheng S W, Ren G B, Jian S S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064214 (in Chinese) [林楨, 郑斯文, 任国斌, 简水生 2013 物理学报 **62** 064214]
- [18] Faustini L, Martini G 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 671
- [19] Wang Q, Farrell G, Feir T 2005 *Opt. Express* **13** 4476
- [20] Vassallo C 1985 *Opt. Quantum. Electron* **17** 201
- [21] Vassallo C 1985 *J. Lightwave Technol.* **LT-3** 416
- [22] Li H S, Ren G B, Yin B, Lian Y D, Bai Y L, Jian W, Jian S S 2015 *Opt. Common.* **352** 84
- [23] Hagen R 1992 *J. Lightwave Technol.* **10** 543
- [24] Ren G B, Lin Z, Zheng SW, Jian S S 2013 *Opt. Lett.* **38** 781
- [25] Zhang Z Y, Ren G B, Zhou D A, Wu J L 2014 *Laser & Opt. Electron. Prog.* **51** 78 (in Chinese) [张子阳, 任国斌, 周定安, 吴家梁 2014 激光与光电子学进展 **51** 78]
- [26] Schermer R T, Cole J H 2007 *IEEE J. Quantum. Electron* **43** 899

Study on bending losses of few-mode optical fibers*

Zheng Xing-Juan¹⁾²⁾ Ren Guo-Bin^{1)2)†} Huang Lin¹⁾²⁾ Zheng He-Ling³⁾

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

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

3) (State Grid Linyi Power Supply Company, Linyi 276000, China)

(Received 10 October 2015; revised manuscript received 1 December 2015)

Abstract

With the rapid increase of the capacity of optical fiber transmission system, the mode division multiplexing transmission system using few-mode fibers (FMFs) (which provides the multi-channel multiplexing, high efficiency of frequency spectrum, and low nonlinear effects) becomes a research focus to upgrade the capacity of the optical communication. In this paper, an analytical expression of bending loss for each high-order mode of parabolic-index FMFs is deduced based on the perturbation theory and verified by finite element method. Based on this expression, the influence of four key structure parameters of trench-assisted parabolic-index FMFs: i.e. the radius of fiber core, the distance between core and trench, the width of trench, and the refractive index difference of trench, on the bending loss performance are discussed in detail. It is found that, firstly, the sensitivity of the bending loss increases with the increase of mode order of FMFs. Secondly, the smaller the core radius, the smaller the bending loss of each mode-order is, since small core radius leads to a smaller effective mode area, which is beneficial for saving power leakage. Additionally, the effective mode area of LP_{02} mode is lower than that of LP_{21} mode, while the bending loss of LP_{02} mode is higher than that of LP_{21} mode, this observation is different from other mode-orders. Thirdly, an optimized distance between trench and core for each high-order mode is also investigated for obtaining minimum bending loss, which plays an important role in controlling the bending performance of FMFs. So the higher the mode-order, the smaller the optimized distance between core and trench is, and this observation could be used to optimize the bending loss of the fiber. With the increase of the distance between the core and trench, the effective mode area of high-order mode increases quickly at first, then it is approximately unaltered. The distance between the core and trench is a key factor that influences both the bending loss and the effective mode area of each mode. Finally, the bending loss of each mode decreases with the increase of the width of trench around the fiber core or the refractive index difference of trench. These results are helpful for understanding the mechanism of bending loss for FMFs and are of significance for designing and manufacturing of few-mode bend-insensitive fibers, especially for the optimization of the bending loss of specific high-order mode.

Keywords: few-mode fiber, bending loss, trench assisted, bend-insensitive

PACS: 42.81.-i, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.65.064208

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61178008), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (Grant No. 2011RC050).

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