

# C+L 波段低弯曲损耗非耦合三模组渐变折射率光纤设计

王 卓<sup>1,2</sup>, 崔明杰<sup>1,2</sup>, 余长源<sup>1,2,3</sup>

(1. 香港理工大学电机及电子工程学系, 香港 999077; 2. 香港理工大学光子研究院, 香港 999077;  
3. 香港理工大学深圳研究院, 广东深圳 518057)

**摘 要:** 光纤是现代通信网络中最为稳定的信号传输媒介, 提升光纤模式的数量是满足通信容量日益增加的有效方法. 本文设计了低弯曲损耗的非耦合三模组( $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ )渐变折射率光纤, 运用分层分析法给出了渐变折射率光纤中模组的严格截止条件. 此外, 利用有限元仿真软件求解光纤模式的有效模场面积和弯曲损耗, 得到低弯曲损耗条件下在 C+L 波段(1 530~1 625 nm)传输三模组的设计区间. 揭示了纤芯中心折射率凹陷和沟槽层共同作用可促进光纤径向高阶模式的截止. 模拟结果表明, 所设计光纤的模组间有效折射率差大于等于  $3 \times 10^{-3}$ , 弯曲半径为 30 mm 时的最大弯曲损耗为 1.3 dB/km, 符合 ITU-T 推荐的低弯曲损耗条件. 而且, 在 1 550 nm 波长下, 模组内简并模有较小的差分模式群时延 ( $\approx 176$  ps/km), 可通过 4×4 多输入多输出技术补偿简并模之间的串扰. 该光纤可适用于 C+L 波段上实现模组间非耦合的空分复用信号传输.

**关键词:** 少模光纤; 渐变折射率; 低弯曲损耗; 空分复用; 光纤通信

**基金项目:** 国家重点研发计划 (No.2018YFB1800902)

**中图分类号:** TN253

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2024)08-2659-09

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20230266

## Design of Uncoupled Three-Mode-Group Graded-Index Fiber with Low Bending Loss in C+L Band

WANG Zhuo<sup>1,2</sup>, CUI Ming-jie<sup>1,2</sup>, YU Chang-yuan<sup>1,2,3</sup>

(1. Department of Electrical and Electronic Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;

2. Photonics Research Institute, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;

3. The Hong Kong Polytechnic University Shenzhen Research Institute, Shenzhen, Guangdong 518057, China)

**Abstract:** Optical fiber is the most stable medium for signal transmission in modern communication networks. Increasing the number of fiber modes is an effective way to meet the increasing demand for communication capacity. In this paper, a kind of uncoupled three-mode-group ( $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ ) graded-index fiber with low bending loss is designed. The strict cut-off conditions of the mode groups in the graded-index optical fiber are obtained by using the stratified method. In addition, the effective mode area and bending losses are calculated by a finite element simulation software, and the design region of three-mode-group transmission in the C+L (1 530~1 625 nm) band with low bending loss is obtained. It is revealed that the combined effects of the concave refractive index at the core center and the trench layer can promote the cut-off of radial higher-order modes in the fiber. The simulation results show that the designed fiber has a large effective index difference between mode groups that is  $\geq 3 \times 10^{-3}$ , and the maximum bending loss is 1.3 dB/km when the bending radius is 30 mm, which meets the low bending loss condition recommended by ITU-T. In addition, at the wavelength of 1 550 nm, the degenerate modes in the same mode group have a relatively small differential mode group delay ( $\approx 176$  ps/km), and the crosstalk between degenerate modes can be compensated by 4×4 multi-input multi-output technique. This fiber can be used in the C+L band to realize uncoupled space-division multiplexing signal transmission.

**Key words:** few-mode fiber; graded-index; low bending loss; space-division multiplexing; optical fiber communications  
**Foundation Item(s):** National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1800902)

## 1 引言

光通信系统信号传输容量的提升一直是研究的热点问题. 目前, 面对日益增长的信息消费, 需要发展新的传输信道来提升通信容量. 空分复用 (Space-Division Multiplexing, SDM) 技术, 即并行利用不同空间信道, 为进一步提升通信容量提供新途径<sup>[1]</sup>. 因此, 发展适用于空分复用技术的光纤显得尤为重要<sup>[2]</sup>. 在光纤中, 空间信道复用可被划分为纤芯复用和模式复用两类. 纤芯复用 (Core-Division Multiplexing, CDM) 技术需要使用多芯光纤. 当相邻纤芯间光信号的串扰足够小, 每个纤芯可被视为独立信道. 通过在纤芯外围增加低折射率沟槽层和使用异质纤芯<sup>[3,4]</sup>, 在不牺牲纤芯排布密度的前提下, 有效降低芯间串扰; 另一方面, 使用同一纤芯中的不同模式传输信号被称作模式复用 (Mode-Division Multiplexing, MDM)<sup>[5]</sup>. 虽然不同阶光纤模式的数学表达式是正交的, 但实际中的制造偏差、应力和弯曲等因素会破坏模式的正交性, 产生模式间串扰<sup>[6]</sup>. 同一纤芯内不同模式的模场交叠程度远高于不同纤芯间的情况, MDM 机制下的串扰抑制会面临更多困难.

目前, 已有 3 种 MDM 方案. 第 1 种方案是利用多输入多输出 (Multi-Input Multi-Output, MIMO) 技术在接收端通过数字信号处理补偿所有模式间的串扰<sup>[7]</sup>, 这样可以减弱对低模式串扰的依赖. 但数字信号处理的能耗会随着模式数的增加而迅速上升. 而且, 模式间的最大群时延需要控制在 1 ns 内, 以降低 MIMO 操作的复杂度. 然而, 模式间的群时延对纤芯折射率分布非常敏感, 易由于外界扰动的影响而急剧变化<sup>[8]</sup>, 这个问题对全 MIMO 技术的实际应用提出了挑战; 第 2 种方案是矢量模或轨道角动量模通信 (Orbital Angular Momentum, OAM), 其核心思想是增大属于同一模组简并模间的有效折射率差 ( $\Delta n_{\text{eff}}$ ), 促使在去简并的条件下矢量模或 OAM 模间满足弱耦合条件<sup>[9,10]</sup>, 以每个矢量模或 OAM 模作为独立信道进行光传输. 其主要优点是不使用 MIMO 技术, 降低接收端信号处理的复杂度. 此方案利用环芯光纤实现<sup>[11,12]</sup>, 对简并模的分离仅限于光纤中的部分模组, 其结果将导致未被去简并的矢量模或 OAM 模无法被充分利用. 为避开以上 2 种方案所遇到的困难, 研究者提出第 3 种基于模组的非耦合空分复用传输方案<sup>[13]</sup>. 通过增大模组间的  $\Delta n_{\text{eff}}$ , 有效抑制模组间串扰, 实现模组间彼此独立非耦合传输. 与此同时, 模组内的简并模保持强耦合状态, 其串扰可通过 MIMO 技术补偿. 由于模组内模式的最大简并度为 4, 此方案可在维持较低 4×4 MIMO 复杂度情况下实现大容量的空分复用信号传输.

已有许多研究者对基于模组的非耦合少模光纤进

行了研究. 在传统阶跃折射率光纤中, 通过将光纤的归一化频率  $V_{\text{eff}}$  设定为 5.1, 可得到传输 4 个模组 ( $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ ,  $LP_{02}$ ) 的非耦合少模光纤<sup>[14]</sup>, 这种少模光纤已被用于实现基于  $LP_{11}$  模组中 2 个简并模的 100 Gps 速率, 40 km 信号传输. 然而, 在 1 550 nm 波长下,  $LP_{21}$  与  $LP_{02}$  模组间的  $\Delta n_{\text{eff}}$  仅为  $0.8 \times 10^{-3}$ , 这会导致  $LP_{21}$  与  $LP_{02}$  模组间存在较强串扰. 为去除  $LP_{02}$  模组的影响, 2014 年有人提出用环型纤芯光纤支持三模组 ( $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ ) 的非耦合传输<sup>[15]</sup>. 环型纤芯中心的折射率与包层相同, 这种折射率凹陷可有效截止  $LP_{02}$  模组, 但对  $LP_{21}$  只产生微小影响. 与此同时, 也有研究工作通过解析推导论证了环芯光纤促进径向高阶模式截止<sup>[16]</sup>, 通过调整环芯和沟槽层的掺杂率, 可实现多环芯的少模传输<sup>[17]</sup>. 然而, 环芯中心的超低折射率也会降低  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模组间的  $\Delta n_{\text{eff}}$ , 导致低阶模组间隔离度减弱. 为降低中心折射率凹陷对低阶模组的影响, 在传统阶跃纤芯上叠加环型纤芯的设计被提出<sup>[18]</sup>. 该研究发现通过调整环芯的厚度和内径可以增大  $LP_{02}$  和  $LP_{21}$  之间的  $\Delta n_{\text{eff}}$ , 同时, 维持其他模组间较大隔离度, 并给出适用于 C 波段 (1 530~1 565 nm) 的最小  $\Delta n_{\text{eff}} \geq 1.8 \times 10^{-3}$  的四模组 ( $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ ,  $LP_{02}$ ) 光纤设计.

为满足传输带宽的需求, 本文首次研究了适用于 C+L 波段 (1 530~1 625 nm) 实现模组间非耦合传输的中心折射率下凹型渐变折射率少模光纤, 并讨论了纤芯外围沟槽层对径向高阶模式的截止作用和对有效模场面积的影响. 研究者发现通过纤芯折射率凹陷和沟槽层的共同作用, 可有效抑制产生径向高阶模式, 在宽波段上实现低弯曲损耗的非耦合少模传输. 模拟结果表明所设计光纤在 C+L 波段上可实现的模组间  $\Delta n_{\text{eff}} \geq 3 \times 10^{-3}$ , 能支持低弯曲损耗 (弯曲半径为 30 mm 时, 限制损耗  $\approx 1.3$  dB/km) 的三模组 ( $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ ) 非耦合传输, 同时在 1 550 nm 波长下简并模间的最大差分模式群时延 (Differential Mode Group Delay, DMGD)  $\approx 176$  ps/km.

## 2 分层分析法

对大部分具有圆对称渐变折射率分布  $n(r)$  的光纤, 无法通过解析法求得本征模的表达式, 只能通过数值方法获得光纤模式的传输特性. 考虑到光纤的圆对称特性, 可利用沿径向建立多层阶梯环的方法近似描述纤芯的折射率分布<sup>[19]</sup>. 如图 1 所示, 将渐变折射率纤芯分割成  $N$  ( $N \geq 1$ ) 层折射率均匀的圆环, 第  $m$  层圆环的内外边界分别为  $r_{m-1}$  和  $r_m$ , 其折射率可近似表示为  $n_m = [n(r_{m-1}) + n(r_m)]/2$ . 在每层均匀圆环内, 光纤模场纵向 ( $z$  轴方向) 分量可通过求解贝塞尔方程获得. 在纤芯区域内的表达式为

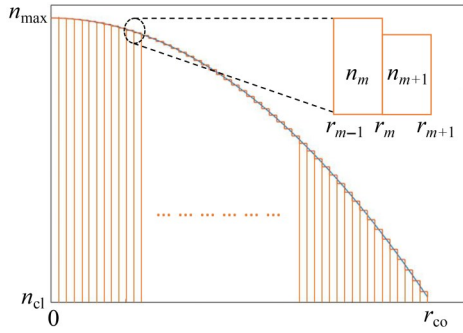


图1 分层分析法描述渐变折射率光纤的示意图

$$\begin{cases} E_{m,z} = A_m f_{m,v} \cos(v\varphi) \\ H_{m,z} = C_m f_{m,v} \sin(v\varphi) \end{cases}, (m=1) \quad (1)$$

$$\begin{cases} E_{m,z} = [A_m f_{m,v} + B_m g_{m,v}] \cos(v\varphi) \\ H_{m,z} = [C_m f_{m,v} + D_m g_{m,v}] \sin(v\varphi) \end{cases}, (1 < m \leq N) \quad (2)$$

当纤芯外围是均匀包层时,包层中的纵向模场分量表达式为

$$\begin{cases} E_{m,z} = B_m g_{m,v} \cos(v\varphi) \\ H_{m,z} = D_m g_{m,v} \sin(v\varphi) \end{cases}, (m=N+1) \quad (3)$$

其中,  $E_{m,z}$  和  $H_{m,z}$  分别为第  $m$  层中电场和磁场的纵向分量, 振幅常数  $A_m$ 、 $B_m$ 、 $C_m$  和  $D_m$  之间的关系由各层中电磁场的边界条件决定, 场分布函数的表达式如表 1 所示. 特征值  $\beta = n_{\text{eff}} k_0$  表示模式的有效传播常数,  $k_0$  表示真空中的波数, 定义模态参数  $U_m = \sqrt{n_m^2 k_0^2 - \beta^2}$ .  $J_v$  和  $Y_v$  分别表示第 1 和第 2 类贝塞尔函数, 同时,  $I_v$  和  $K_v$  分别表示第 1 和第 2 类修正贝塞尔函数,  $v$  为非负整数, 真空介电常数和真空磁导率分别用  $\epsilon_0$  和  $\mu_0$  表示. 在第  $m$  层中, 模场的角向 ( $\varphi$ ) 分量可通过纵向分量求得<sup>[20]</sup>:

$$E_{m,\varphi} = \frac{i}{k_0^2 n_m^2 - \beta^2} \left\{ \frac{\beta}{r} \frac{\partial E_{m,z}}{\partial \varphi} - \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} k_0 \frac{\partial H_{m,z}}{\partial r} \right\} \quad (4)$$

$$H_{m,\varphi} = \frac{i}{k_0^2 n_m^2 - \beta^2} \left\{ \frac{\beta}{r} \frac{\partial H_{m,z}}{\partial \varphi} + \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} k_0 n_m^2 \frac{\partial E_{m,z}}{\partial r} \right\} \quad (5)$$

表 1 场分布函数表达式

场分布函数	特征值条件	
	$\beta \leq n_m k_0$	$\beta > n_m k_0$
$f_{m,v}$	$J_v(U_m r)$	$I_v(U_m r)$
$g_{m,v}$	$Y_v(U_m r)$	$K_v(U_m r)$

因为电介质光纤中不存在自由电荷, 在各层圆环的交界处的电场与磁场满足切向分量连续边界条件:

$$\begin{bmatrix} E_{m,z}(r_m) \\ H_{m,z}(r_m) \\ E_{m,\varphi}(r_m) \\ H_{m,\varphi}(r_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{m+1,z}(r_m) \\ H_{m+1,z}(r_m) \\ E_{m+1,\varphi}(r_m) \\ H_{m+1,\varphi}(r_m) \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式(1)~(5)代入式(6)中, 通过边界条件的递推关系得到特征式(7)(详细过程见附录 A):

$$\mathbf{M}_1(r_1) \begin{bmatrix} A_1 \\ 0 \\ C_1 \\ 0 \end{bmatrix} - \mathbf{M}_2(r_1) \mathbf{M}_2^{-1}(r_2), \dots, \mathbf{M}_N(r_{N-1}) \mathbf{M}_N^{-1}(r_N) \mathbf{M}_{N+1}(r_N) \begin{bmatrix} 0 \\ B_{N+1} \\ 0 \\ D_{N+1} \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{M}_m(r_{m-1})$  和  $\mathbf{M}_m(r_m)$  分别表示在第  $m$  层圆环的 2 个径向边界  $r_{m-1}$  和  $r_m$  上电场和磁场切向分量所构成的矩阵(矩阵元素表达式见附录 A 中的表 2), 上角标“ $-$ ”表示矩阵的逆. 光纤的模式传输条件要求模场分量的振幅常数  $A_1$ 、 $B_{N+1}$ 、 $C_1$  和  $D_{N+1}$  不同时为 0, 因此, 式(7)的系数行列式必须为 0, 求得满足光纤模场条件的有效传播常数  $\beta$ .

### 3 结果与讨论

众所周知, 光纤的模场特性主要由纤芯半径  $r$  和纤芯折射率分布  $n(r)$  决定. 为了说明中心下凹的折射率分布可有效截止径向高阶模式, 实验比较了 2 种 4 次指数分布型的渐变折射率光纤在 1 530~1 625 nm 波段的模式截止条件. 光纤的纤芯折射率分布函数由方程组(8)描述:

$$\begin{cases} n = n_{\text{max}} \left[ 1 - \frac{\left(\frac{r}{r_{\text{co}}} - b\right)^2 \left(\frac{r}{r_{\text{co}}} + b\right)^2}{(1-b)^2 (1+b)^2} \Delta_{\text{co}} \right] \\ n_{\text{max}} = \frac{n_{\text{cl}}}{1 - \Delta_{\text{co}}} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $r_{\text{co}}$  表示纤芯半径,  $\Delta_{\text{co}}$  表示纤芯最大折射率位置的掺杂率, 包层折射率  $n_{\text{cl}}$  由 Sellmeier 公式描述<sup>[21]</sup>. 纤芯折射率最大值的位置由系数  $b$  决定, 如图 2(a) 所示, 当  $b=0$  时, 折射率最高点位于中心位置. 随着  $b$  逐渐增大, 折射率顶点向外层移动, 中心区域逐渐形成折射率凹陷, 如图 2(b) 所示; 另一方面, 在纤芯外围设置有低折射率沟槽层, 其与纤芯边缘的间距和自身宽度分别由  $\Delta r_1$  和  $\Delta r_2$  描述, 其下陷部分的折射率通过式(9)由掺杂率  $\Delta_{\text{tr}}$  决定.

$$n_{\text{tr}} = \frac{n_{\text{cl}}}{1 - \Delta_{\text{tr}}} \quad (9)$$

运用分层分析法, 将纤芯分割为 100 层均匀折射率环, 考虑包层和沟槽层, 总层数为 103 层, 将  $\beta \rightarrow n_{\text{cl}} k_0$  代入式(7)并令其系数行列式为 0, 得到以  $\Delta_{\text{co}}$  和  $r_{\text{co}}$  为自变量的模式截止条件. 图 2(a) 所示的折射率分布 ( $\Delta r_1 =$

$2 \mu\text{m}$ ,  $\Delta r_2=3 \mu\text{m}$ ,  $\Delta r_1=-0.5\%$ ), 其  $\text{LP}_{21}$ 、 $\text{LP}_{31}$  和  $\text{LP}_{02}$  模式的截止条件如图 2(c) 所示. 当波长为  $1530 \text{ nm}$  时, 截止条件用实线表示, 在截止线左侧, 对应的模式不能在光纤中传播. 随着  $\Delta_{\text{co}}$  或  $r_{\text{co}}$  减小,  $\text{LP}_{31}$  和  $\text{LP}_{02}$  模式先于  $\text{LP}_{21}$  模式截止; 当波长为  $1625 \text{ nm}$  时, 截止条件用虚线表示, 在图 2(c) 中, 蓝色虚线位于红色实线右上方, 这表明若要满足在  $1625 \text{ nm}$  波长下支持  $\text{LP}_{21}$  模式传输的条件, 在  $1530 \text{ nm}$  波长下必定会引入  $\text{LP}_{02}$  模式. 因此,

这种中心突起的渐变折射率光纤无法满足在  $1530 \sim 1625 \text{ nm}$  波段上支持纯净的三模式传输. 另一方面, 图 2(d) 中的结果描述了图 2(b) 所示的中心下凹型渐变折射率光纤的模式截止条件. 此时, 随着  $\Delta_{\text{co}}$  或  $r_{\text{co}}$  减小,  $\text{LP}_{02}$  模式更容易被截止. 蓝色虚线的位置处于红色实线的左下方, 这表明在阴影区域内所设计的光纤可以在  $1530 \sim 1625 \text{ nm}$  波段上维持高纯度的  $\text{LP}_{01}$ 、 $\text{LP}_{11}$  和  $\text{LP}_{21}$  三模式传输, 其余高阶模式都被截止.

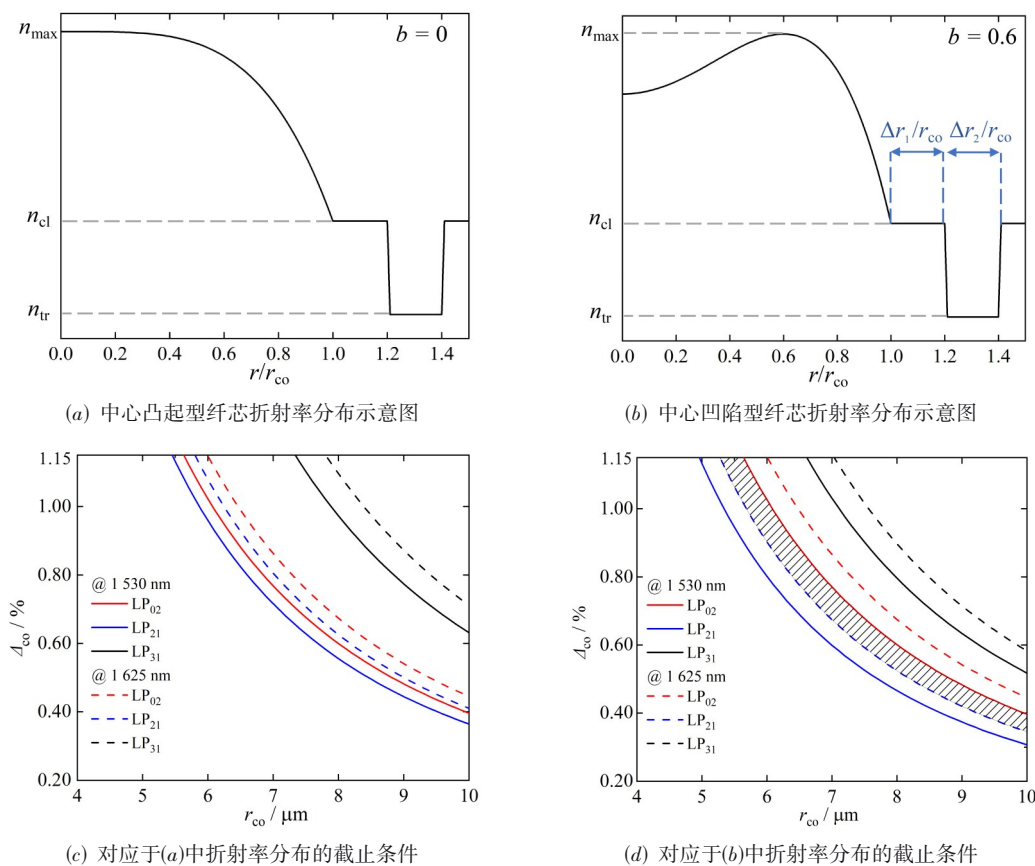


图2 光纤折射率分布和模式截止条件

为避免因掺杂率过高引入的材料损耗, 一般控制  $\Delta_{\text{co}} \leq 1\%$ . 由图 2(d) 结果可得, 当纤芯半径为  $6.5 \mu\text{m}$  时, 可在  $\Delta_{\text{co}} \leq 1\%$  的情况下实现较大设计区间. 因此, 研究选取在纤芯半径为  $6.5 \mu\text{m}$  的条件下通过调节沟槽层与纤芯的距离实现低弯曲损耗条件下的三模式传输. 所设计光纤可以通过 3 个步骤制备<sup>[22]</sup>: 首先, 用化学气相沉积法制备纤芯的折射率分布; 其次, 在纤芯预制棒外围沉积对应折射率的光纤包层; 最后, 用传统的光纤拉制工艺控制成品光纤的纤芯大小. 光纤弯曲会引入较大的模式损耗, 因此, 需要考虑所设计光纤在弯曲条件下的传输性能. 光纤弯曲模型的数值模拟可用商业有限元软件 COMSOL Multiphysics 完成, 弯曲光纤的等效折射率分布由保角变换实现<sup>[23]</sup>:

$$n_{\text{bend}} = n \left( 1 + \frac{x}{R_{\text{eff}}} \right) \quad (10)$$

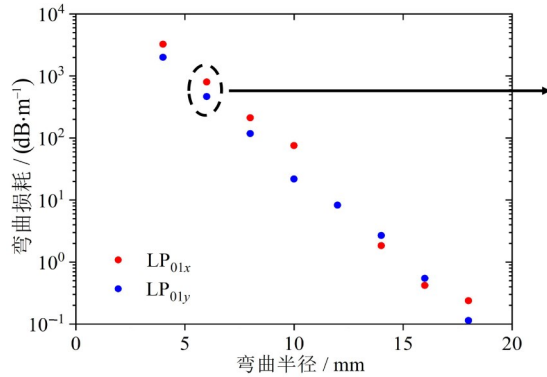
其中, 考虑石英光纤的材料弯曲应力作用, 等效弯曲半径为实际弯曲半径的 1.28 倍, 即  $R_{\text{eff}} = 1.28R$ ,  $x$  表示弯曲方向上的空间坐标. 在用有限元法建模时, 光纤的包层外围设置了 1 层厚度为  $10 \mu\text{m}$  的完美匹配层 (Perfectly Matched Layer, PML), 用于吸收模式的外溢能量, 并通过模式特征值的虚部计算出光纤在弯曲状态下的损耗:

$$\text{Loss} \approx 8.686k_0\alpha \quad (11)$$

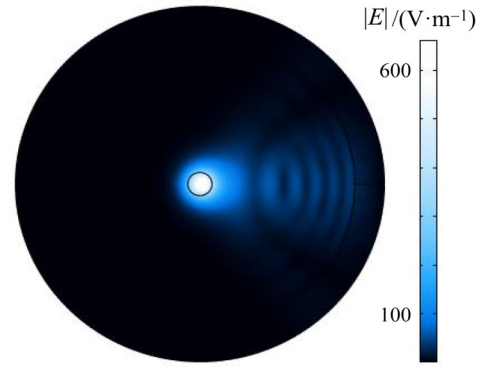
其中,  $\alpha$  表示模场的衰减系数. 为验证数值计算方法的可靠性, 首先参照文献[23]中的光纤参数进行仿真. 阶跃单模光纤的纤芯和包层半径分别为  $4.1 \mu\text{m}$  和  $52.5 \mu\text{m}$ ,

在薄层外围设置了  $10\ \mu\text{m}$  厚的 PML 区域吸收辐射能量. 在  $1\ 550\ \text{nm}$  波长下, 纤芯和包层的折射率分别约为  $1.444\ 7$  和  $1.440\ 0$ . 计算结果如图 3(a) 所示, 随着弯曲半径减小, 模式损耗急剧增大, 其数值和变化趋势与文献[23]中在  $1\ 550\ \text{nm}$  波长下的模拟实验

结果一致. 尤其是在弯曲半径非常小( $R=6\ \text{mm}$ )时, 图 3 中的模拟结果( $\approx 500\ \text{dB/m}$ )依然和文献[23]中的实验结果相符. 图 3(b)展示了弯曲半径为  $6\ \text{mm}$  时的模式电场强度分布图, 明显看到模场分布溢出纤芯.



(a) 阶跃单模光纤在  $1\ 550\ \text{nm}$  波长下的弯曲损耗随弯曲半径变化



(b) 弯曲半径为  $6\ \text{mm}$  时, 模式  $\text{LP}_{01}$  的电场强度分布图

图 3 弯曲损耗计算可靠性验证

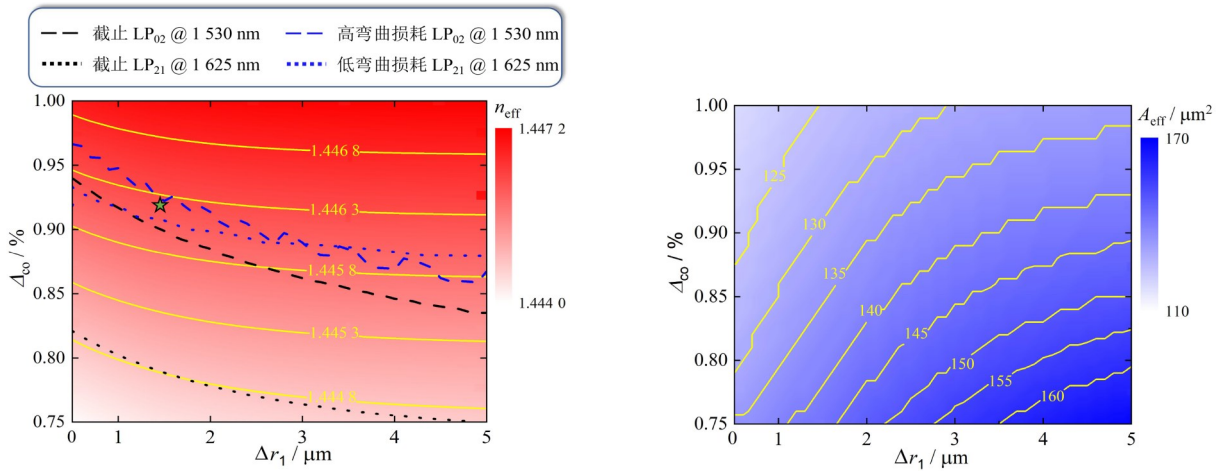
利用上述方法计算了设计光纤的弯曲损耗特性. 根据 ITU-T 推荐的 G.654 光纤标准<sup>[15]</sup>, 当弯曲半径为  $30\ \text{mm}$  时,  $1\ 625\ \text{nm}$  波长下的最高阶传导模式  $\text{LP}_{21}$  的弯曲损耗  $< 0.5\ \text{dB}/(100\ \text{圈})$ ; 另一方面, 考虑到实际应用中, 高阶模式会因为弯曲损耗被滤去, 因此,  $\text{LP}_{02}$  模式的过滤条件可以被放宽为弯曲半径为  $140\ \text{mm}$ , 在  $1\ 530\ \text{nm}$  波长下的损耗  $> 1\ \text{dB/m}$ . 图 4(a) 中蓝色虚线和蓝色点线分别表示  $\text{LP}_{02}$  模式的高弯曲损耗条件和  $\text{LP}_{21}$  模式的低弯曲损耗条件. 因此, 理想的设计区间应位于蓝色点线的上方, 低于蓝色虚线. 与严格的模式截止条件所规定的设计区间(黑色点线和黑色虚线之间的区域)相比, 低弯曲损耗条件要求纤芯具有更高的掺杂率, 保证在弯曲条件下对模式的束缚能力. 此外, 为增大  $\text{LP}_{02}$  的弯曲损耗, 实现模式过滤效果, 外围沟槽层需要紧贴纤芯. 如图 4(a) 所示, 当  $\Delta r_1 > 3\ \mu\text{m}$  时沟槽层对纤芯模式的影响较弱, 不能有效增大  $\text{LP}_{02}$  的弯曲损耗, 此时,  $\text{LP}_{02}$  的高弯曲损耗条件与  $\text{LP}_{21}$  的低弯曲损耗条件不可兼容. 而当  $\Delta r_1 < 2\ \mu\text{m}$  时, 沟槽层能快速提高  $\text{LP}_{02}$  的弯曲损耗, 对  $\text{LP}_{21}$  的影响较小, 因此, 可找到实现三模组低弯曲损耗传输的设计区间. 此外, 图 4(a) 中的等高线图描述了  $\text{LP}_{21}$  模式在  $1\ 550\ \text{nm}$  波长下的有效折射率分布, 可以看到只有当沟槽层与纤芯距离  $< 3\ \mu\text{m}$  时, 才能降低有效折射率; 另一方面, 图 4(b) 展示了  $\text{LP}_{21}$  模式在  $1\ 550\ \text{nm}$  波长下的有效模场面积  $A_{\text{eff}}$  随  $\Delta_{\text{co}}$  和  $\Delta r_1$  的变化结果. 可以发现, 通过将沟槽层向纤芯靠近能减小有效模场面积. 通过图 4(a) 结

果可预测设计光纤关于纤芯掺杂率( $\Delta_{\text{co}}$ )和沟槽层与纤芯间距( $\Delta r_1$ )的制造容差. 考虑弯曲的影响, 在 C+L 全波段上实现低损耗的三模组传输需要对  $\Delta_{\text{co}}$  和  $\Delta r_1$  进行精确控制.  $\Delta_{\text{co}}$  的取值范围随着  $\Delta r_1$  减小而增大, 因此, 需要  $\Delta r_1 < 2\ \mu\text{m}$ . 当  $\Delta r_1 = 1.5\ \mu\text{m}$  时,  $\Delta_{\text{co}}$  的设计容差为  $0.02\%$ .

综上所述, 在设计区间内选取参数  $\Delta_{\text{co}} = 0.92\%$ ,  $\Delta r_1 = 1.5\ \mu\text{m}$ ,  $r_{\text{co}} = 6.5\ \mu\text{m}$ , 如图 4(a) 中的星标位置. 通过有限元方法数值求解出 C+L 波段上 3 个模组的有效折射率, 如图 5(a) 所示. 随着波长的增加模组间的有效折射率逐渐增大, 在目标波段上各相邻模组间的有效折射率差分别为  $n_{\text{eff}}^{01} - n_{\text{eff}}^{11} \geq 3 \times 10^{-3}$  和  $n_{\text{eff}}^{11} - n_{\text{eff}}^{21} \geq 4.3 \times 10^{-3}$ , 结果可以保证 3 个模组的非耦合传输<sup>[18]</sup>. 模组的弯曲损耗随弯曲半径的变化如图 5(b) 所示, 选取弯曲损耗最大的波长  $1\ 625\ \text{nm}$  作为参考标准. 由于纤芯对低阶模场具有更好限制能力,  $\text{LP}_{01}$  和  $\text{LP}_{11}$  具有极低的弯曲损耗, 当  $R \geq 30\ \text{mm}$  时, 弯曲半径的变化几乎不对其损耗产生影响. 虽然, 当  $R \leq 50\ \text{mm}$  时光纤的弯曲会明显增加  $\text{LP}_{21}$  模式的损耗, 但是, 在  $R = 30\ \text{mm}$  条件下的弯曲损耗为  $1.3\ \text{dB/km}$ , 满足 ITU-T 推荐的低弯曲损耗标准<sup>[15]</sup>.

$$\text{DMGD} = \frac{1}{c} \left[ \Delta n_{\text{eff}} - \lambda \frac{d(\Delta n_{\text{eff}})}{d\lambda} \right] \quad (12)$$

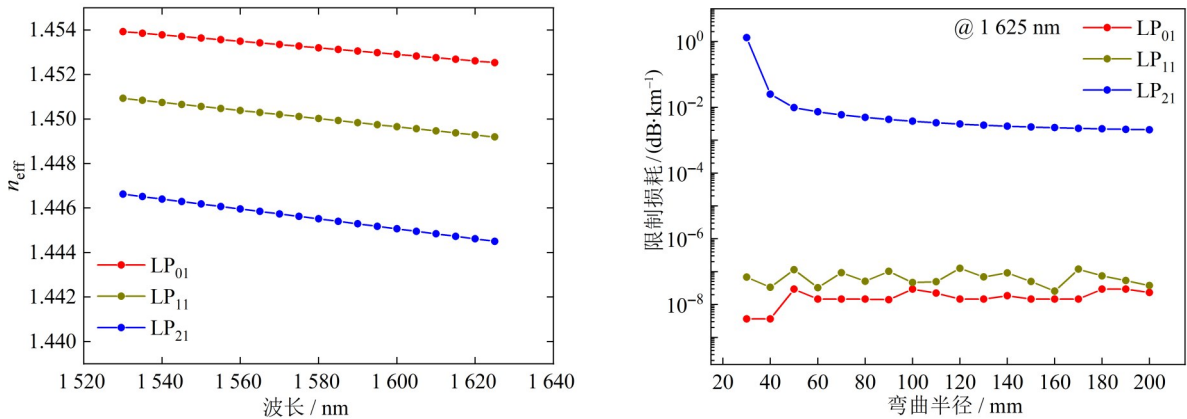
在  $1\ 550\ \text{nm}$  波长下各阶模组内矢量模之间的最大有效折射率差仅为  $2 \times 10^{-5}$ , 因此, 同一模组内矢量模之间存在强耦合关系. 矢量模会演化成 LP 模式在光纤中



(a) 1550 nm 波长下  $\text{LP}_{21}$  模组的有效折射率变化以及不同波长下  $\text{LP}_{02}$  和  $\text{LP}_{21}$  模组的截止条件

(b) 在 1550 nm 波长下  $\text{LP}_{21}$  模组的  $A_{\text{eff}}$  的变化

图4 纤芯折射率和沟槽层与纤芯间距对模式特性的影响



(a) 在 C+L 波段上光纤所支持的 3 个模组的有效折射率

(b) 在 1625 nm 波长下 3 个模组的限制损耗随光纤弯曲半径的变化

图5 所设计光纤的模组有效折射率和弯曲损耗

传输,因为 LP 模组的最大简并度为 4,最高需要  $4\times 4$  MIMO 算法来补偿组内模式间的串扰,具体数据处理过程可见参考文献[24].此外,利用式(12)计算得到各模式间的 DMGD.在 1550 nm 波长下的结果如图 6(a) 所示,各模组间存在非常大的 DMGD,这是模组间较大的  $\Delta n_{\text{eff}}$  导致,反映了模组间有较好的隔离度;另一方面,因为模组内的简并模式具有相似的有效折射率,因此,他们间的 DMGD 很小.矢量模式和 LP 模式的对应

关系如图 6(b) 所示.在  $\text{LP}_{01}$  模组中,忽略双折射效应条件下  $\text{HE}_{11}$  模式的 2 个偏振态间 DMGD 为 0.在  $\text{LP}_{11}$  模组中,最大 DMGD  $\approx 76$  ps/km,存在于  $\text{TE}_{01}$  与  $\text{HE}_{21}$  模式之间;在  $\text{LP}_{21}$  模组中,最大 DMGD  $\approx 176$  ps/km.考虑在群时延  $\leq 1$  ns 的条件下可用低复杂度的  $4\times 4$  MIMO 技术补偿简并模间的串扰,因此,该光纤可在 5 km 的距离上实现  $4\times 4$  MIMO 辅助的空分复用信号传输,空间信道数可达 10 个.

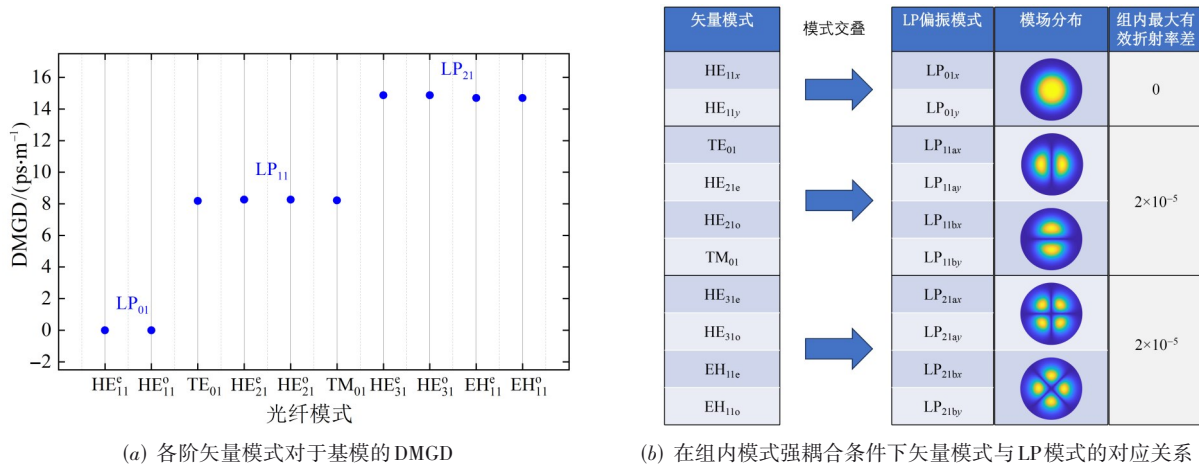


图 6 设计光纤在 1 550 nm 波长下的模拟结果

## 4 总结

本文设计了适用于非耦合传输的低损耗渐变折射率三模组光纤. 运用分层分析法, 讨论了渐变折射率光纤中的模式截止条件, 验证了中心下陷型折射率分布对径向高阶模式的抑制作用. 结合有限元数值计算方法, 讨论了纤芯外围的沟槽层对模式弯曲损耗和有效折射率的影响. 研究发现可通过减小沟槽层与纤芯的间距实现光纤弯曲条件下的径向高阶模式过滤, 得到低弯曲损耗的 C+L 波段三模组光纤设计区间. 最终, 设计的光纤在目标波段上可实现模组间  $\Delta n_{\text{eff}} \geq 3 \times 10^{-3}$ , 满足非耦合传输条件, 在弯曲半径为 30 mm 时的最大弯曲损耗  $\approx 1.3$  dB/km. 同时, 在 1 550 nm 波长下, 模组内简并模有较小的 DMGD ( $\approx 176$  ps/km), 可通过 4×4 MIMO 技术补偿简并模间的串扰. 该光纤可适用于以模组为空间信道的空分复用通信系统.

## 参考文献

- [1] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. Nature Photonics, 2013, 7: 354-362.
- [2] 涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106003.  
TU J J, LI Z H. Review of space division multiplexing fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106003. (in Chinese)
- [3] TU J J, SAITOH K, KOSHIBA M, et al. Design and analysis of large-effective-area heterogeneous trench-assisted multi-core fiber[J]. Optics Express, 2012, 20(14): 15157.
- [4] TU J J, SAITOH K, KOSHIBA M, et al. Optimized design method for bend-insensitive heterogeneous trench-assisted multi-core fiber with ultra-low crosstalk and high core density[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(15): 2590-2598.
- [5] 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.
- [6] SNYDER A W. Coupled-mode theory for optical fibers[J]. Journal of the Optical Society of America (1917-1983), 1972, 62(11): 1267.
- [7] RYF R, RANDEL S, GNAUCK A H, et al. Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 521-531.
- [8] SILLARD P. Few-mode-fiber developments and applications[C]//2018 23rd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). Piscataway: IEEE, 2018: 1-2.
- [9] RAMACHANDRAN S, KRISTENSEN P, YAN M F. Generation and propagation of radially polarized beams in optical fibers[J]. Optics Letters, 2009, 34(16): 2525-2527.
- [10] GREGG P, KRISTENSEN P, RAMACHANDRAN S. Conservation of orbital angular momentum in air-core optical fibers[J]. Optica, 2015, 2(3): 267.
- [11] BOZINOVIC N, YUE Y, REN Y X, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. Science, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [12] GREGG P, KRISTENSEN P, RAMACHANDRAN S. 13.4km OAM state propagation by recirculating fiber loop[J]. Optics Express, 2016, 24(17): 18938-18947.
- [13] ZHU G X, HU Z Y, WU X, et al. Scalable mode division multiplexed transmission over a 10-km ring-core fiber using high-order orbital angular momentum modes[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 594-604.
- [14] SILLARD P, BIGOT-ASTRUC M, BOIVIN D, et al.

Few-mode fiber for uncoupled mode-division multiplexing transmissions[C]//2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication. Piscataway: IEEE, 2011: 1-3.

- [15] KASAHARA M, SAITOH K, SAKAMOTO T, et al. Design of three-spatial-mode ring-core fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(7): 1337-1343.
- [16] BRUNET C, UNG B, BÉLANGER P A, et al. Vector mode analysis of ring-core fibers: Design tools for spatial division multiplexing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(23): 4648-4659.
- [17] WANG Z, LU Q C, TU J J, et al. Design, fabrication, and characterization of a low-index center and trench-assisted 7-ring-core 5-mode-group fiber for dense space-division multiplexing[J]. Optics Express, 2022, 30(1): 650-663.
- [18] JIANG S L, MA L, ZHANG Z P, et al. Design and characterization of ring-assisted few-mode fibers for weakly coupled mode-division multiplexing transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(23): 5547-5555.
- [19] YE H C, LINDGREN G. Computing the propagation characteristics of radially stratified fibers: An efficient meth-

od[J]. Applied Optics, 1977, 16(2): 483-493.

- [20] SNYDER A W, LOVE J D. Optical Waveguide Theory[M]. London: Chapman and Hall, 1983.
- [21] MALITSON I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica[J]. Journal of the Optical Society of America, 1965, 55(10): 1205.
- [22] BRUNET C, UNG B, WANG L X, et al. Design of a family of ring-core fibers for OAM transmission studies[J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10553-10563.
- [23] SCHERMER R T, COLE J H. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007, 43(10): 899-909.
- [24] RANDEL S, RYF R, SIERRA A, et al. 6×56-Gb/s mode-division multiplexed transmission over 33-km few-mode fiber enabled by 6×6 MIMO equalization[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16697-16707.

#### 附录 A 特征方程推导

将式(1)~(3)代入式(4)和式(5)中可求得各层中的纵向和角向电磁场分量表达式,此处以 $v \geq 1$ 为例:

$$\begin{bmatrix} E_{m,z} \\ H_{m,z} \\ E_{m,\varphi} \\ H_{m,\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^m \cos(v\varphi) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{23}^m \sin(v\varphi) & 0 \\ a_{31}^m \sin(v\varphi) & 0 & a_{33}^m \sin(v\varphi) & 0 \\ a_{41}^m \cos(v\varphi) & 0 & a_{43}^m \cos(v\varphi) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_m \\ 0 \\ C_m \\ 0 \end{bmatrix}, (m=1) \quad (\text{A1})$$

$$\begin{bmatrix} E_{m,z} \\ H_{m,z} \\ E_{m,\varphi} \\ H_{m,\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^m \cos(v\varphi) & a_{12}^m \cos(v\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{23}^m \sin(v\varphi) & a_{24}^m \sin(v\varphi) \\ a_{31}^m \sin(v\varphi) & a_{32}^m \sin(v\varphi) & a_{33}^m \sin(v\varphi) & a_{34}^m \sin(v\varphi) \\ a_{41}^m \cos(v\varphi) & a_{42}^m \cos(v\varphi) & a_{43}^m \cos(v\varphi) & a_{44}^m \cos(v\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_m \\ B_m \\ C_m \\ D_m \end{bmatrix}, (1 < m \leq N) \quad (\text{A2})$$

$$\begin{bmatrix} E_{m,z} \\ H_{m,z} \\ E_{m,\varphi} \\ H_{m,\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12}^m \cos(v\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{24}^m \sin(v\varphi) \\ 0 & a_{32}^m \sin(v\varphi) & 0 & a_{34}^m \sin(v\varphi) \\ 0 & a_{42}^m \cos(v\varphi) & 0 & a_{44}^m \cos(v\varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ B_m \\ 0 \\ D_m \end{bmatrix}, (m=N+1) \quad (\text{A3})$$

其中,各层电磁场分量矩阵的系数表达式如表 A1 所示. 在每层的交界处,电场和磁场的切向分量需要满足

连续边界条件,利用式(A1)~(A3)的结果可以推导出式(A4)~(A6):

$$\begin{bmatrix} a_{11}^1(r_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{23}^1(r_1) & 0 \\ a_{31}^1(r_1) & 0 & a_{33}^1(r_1) & 0 \\ a_{41}^1(r_1) & 0 & a_{43}^1(r_1) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ 0 \\ C_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^2(r_1) & a_{12}^2(r_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{23}^2(r_1) & a_{24}^2(r_1) \\ a_{31}^2(r_1) & a_{32}^2(r_1) & a_{33}^2(r_1) & a_{34}^2(r_1) \\ a_{41}^2(r_1) & a_{42}^2(r_1) & a_{43}^2(r_1) & a_{44}^2(r_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \\ C_2 \\ D_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A4})$$

$$\begin{bmatrix} a_{11}^m(r_m) & a_{12}^m(r_m) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{23}^m(r_m) & a_{24}^m(r_m) \\ a_{31}^m(r_m) & a_{32}^m(r_m) & a_{33}^m(r_m) & a_{34}^m(r_m) \\ a_{41}^m(r_m) & a_{42}^m(r_m) & a_{43}^m(r_m) & a_{44}^m(r_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_m \\ B_m \\ C_m \\ D_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^{m+1}(r_m) & a_{12}^{m+1}(r_m) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{23}^{m+1}(r_m) & a_{24}^{m+1}(r_m) \\ a_{31}^{m+1}(r_m) & a_{32}^{m+1}(r_m) & a_{33}^{m+1}(r_m) & a_{34}^{m+1}(r_m) \\ a_{41}^{m+1}(r_m) & a_{42}^{m+1}(r_m) & a_{43}^{m+1}(r_m) & a_{44}^{m+1}(r_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{m+1} \\ B_{m+1} \\ C_{m+1} \\ D_{m+1} \end{bmatrix} \quad (\text{A5})$$

$$\begin{bmatrix} a_{11}^N(r_N) & a_{12}^N(r_N) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{23}^N(r_N) & a_{24}^N(r_N) \\ a_{31}^N(r_N) & a_{32}^N(r_N) & a_{33}^N(r_N) & a_{34}^N(r_N) \\ a_{41}^N(r_N) & a_{42}^N(r_N) & a_{43}^N(r_N) & a_{44}^N(r_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_N \\ B_N \\ C_N \\ D_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12}^{N+1}(r_N) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{24}^{N+1}(r_N) \\ 0 & a_{32}^{N+1}(r_N) & 0 & a_{34}^{N+1}(r_N) \\ 0 & a_{42}^{N+1}(r_N) & 0 & a_{44}^{N+1}(r_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{N+1} \\ B_{N+1} \\ C_{N+1} \\ D_{N+1} \end{bmatrix} \quad (A6)$$

利用式(16)~(18)的递推关系,并且用  $M_m(r_{m-1})$  和  $M_m(r_m)$  分别表示在第  $m$  层圆环的  $r_{m-1}$  和  $r_m$  边界上的电 磁场切向分量矩阵,可以推导出光纤模式的特征方程(7).

表 A1 矩阵  $M_m(r_{m-1})$  和  $M_m(r_m)$  的矩阵元素表达式

矩阵元	特征值条件	
	$\beta \leq n_m k_0$	$\beta > n_m k_0$
$a_{11}^m$	$J_v(U_m r)$	$I_v(U_m r)$
$a_{12}^m$	$Y_v(U_m r)$	$K_v(U_m r)$
$a_{23}^m$	$J_v(U_m r)$	$I_v(U_m r)$
$a_{24}^m$	$Y_v(U_m r)$	$K_v(U_m r)$
$a_{31}^m$	$\frac{-i\beta}{2U_m} [J_{v-1}(U_m r) + J_{v+1}(U_m r)]$	$\frac{i\beta}{2U_m} [I_{v-1}(U_m r) - I_{v+1}(U_m r)]$
$a_{32}^m$	$\frac{-i\beta}{2U_m} [Y_{v-1}(U_m r) + Y_{v+1}(U_m r)]$	$\frac{-i\beta}{2U_m} [K_{v-1}(U_m r) - K_{v+1}(U_m r)]$
$a_{33}^m$	$\frac{-ik_0}{2U_m} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} [J_{v-1}(U_m r) - J_{v+1}(U_m r)]$	$\frac{ik_0}{2U_m} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} [I_{v-1}(U_m r) + I_{v+1}(U_m r)]$
$a_{34}^m$	$\frac{-ik_0}{2U_m} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} [Y_{v-1}(U_m r) - Y_{v+1}(U_m r)]$	$\frac{-ik_0}{2U_m} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} [K_{v-1}(U_m r) + K_{v+1}(U_m r)]$
$a_{41}^m$	$\frac{ik_0 n_m^2}{2U_m} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} [J_{v-1}(U_m r) - J_{v+1}(U_m r)]$	$\frac{-ik_0 n_m^2}{2U_m} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} [I_{v-1}(U_m r) + J_{v+1}(U_m r)]$
$a_{42}^m$	$\frac{ik_0 n_m^2}{2U_m} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} [Y_{v-1}(U_m r) - Y_{v+1}(U_m r)]$	$\frac{ik_0 n_m^2}{2U_m} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} [K_{v-1}(U_m r) + K_{v+1}(U_m r)]$
$a_{43}^m$	$\frac{i\beta}{2U_m} [J_{v-1}(U_m r) + J_{v+1}(U_m r)]$	$\frac{-i\beta}{2U_m} [I_{v-1}(U_m r) - I_{v+1}(U_m r)]$
$a_{44}^m$	$\frac{i\beta}{2U_m} [Y_{v-1}(U_m r) + Y_{v+1}(U_m r)]$	$\frac{i\beta}{2U_m} [K_{v-1}(U_m r) - K_{v+1}(U_m r)]$

作者简介



王 卓 男, 1991 年 8 月出生, 湖南桂阳人. 华南师范大学特聘副研究员. 主要研究方向为微纳光学、光与物质相互作用.  
E-mail: zhuowang@m.scnu.edu.cn



余长源 男, 1974 年 3 月出生, 福建福州人. 香港理工大学电机及电子工程学系终身教授. 主要研究方向为光子器件及系统、光纤通信和传感器系统、生物医学仪器.  
E-mail: changyuan.yu@polyu.edu.hk



崔明杰 男, 1994 年 7 月出生, 广东茂名 人. 香港理工大学博士生. 主要研究方向为特种光纤的设计及其应用.  
E-mail: mingjie.cui@polyu.edu.hk