

doi: 10.3788/gzxb20174601.0106001

# 少模多芯光纤的纤芯排布方法

涂佳静, 乔喜慧, 隆克平

(北京科技大学 计算机与通信工程学院 先进网络技术与新业务研究所, 北京 100083)

**摘 要:**提出一种 3 模 12 芯光纤的纤芯排布优化方法. 在分析芯间串扰、弯曲半径阈值和相对纤芯多重性因子等特性后, 给出了单圆形结构和方点阵结构的纤芯排布方法及优化方案. 对于单圆形结构, 在波长为 1 625 nm 的情况下很难找到合适纤芯排布以使芯间串扰小于  $-30$  dB/100km 并且使光缆截至波长小于 1 530 nm. 对于方点阵结构, 在波长为 1 625 nm, 且弯曲半径大于弯曲半径阈值时, 可使芯间串扰小于  $-30$  dB/100 km, 最大光缆截至波长不大于 1 530 nm, 纤芯多重性因子可达到  $\sim 15$ , 这表明方点阵结构是一种比单圆形结构更适合 3 模 12 芯光纤的纤芯排布结构.

**关键词:** 光纤光学; 空分复用技术; 少模多芯光纤; 纤芯排布优化; 数值仿真; 芯间串扰; 差分模式群时延

中图分类号: TN252

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)01-0106001-8

## Core Arrangement Method for Few-mode Multi-core Fibres

TU Jia-jing, QIAO Xi-hui, LONG Ke-ping

(*Institute of Advanced Network Technologies and New Services, School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** An optimizing method for the core arrangement of three-mode twelve-core fiber was proposed. After investigating the characteristics such as inter-core crosstalk, threshold value of bending radius and Relative Core Multiplicity Factor (RCMF), the optimized scheme for One-Ring Structure (ORS) and Square-Lattice Structure (SLS) were presented. For ORS, it is hard to find an appropriate core deployment to meet both requirements that crosstalk is not higher than  $-30$  dB/100 km at the wavelength of 1 625 nm and the cable cutoff wavelength is not larger than 1 530 nm. For SLS, crosstalk can be lower than  $-30$  dB/100 km after bending radius being larger than the threshold value, maximum cutoff wavelength is not larger than 1530 nm and RCMF can reach  $\sim 15$  at the wavelength of 1625 nm, which indicates that SLS is a more suitable core arrangement than ORS for the three-mode twelve-core fiber.

**Key words:** Fiber optics; Space division multiplexing; Few-mode multi-core fiber; Optimization of core arrangement; Numerical simulation; Inter-core crosstalk; Differential mode delay

**OCIS Codes:** 060.0060; 060.2270; 060.2280; 060.2310; 060.2400

## 0 引言

在光纤传输系统中,空分复用技术(Space Division Multiplexing, SDM)是突破传输容量理论极限的一个很好的解决方案<sup>[1]</sup>. 作为 SDM 的实现手段,多芯光纤(Multi-Core Fiber, MCF)和少模光纤(Few-Mode

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(No. 2012CB315905)、国家自然科学基金(No. 61501027)、中国博士后科学基金(No. 2015M570934)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(No. FRF-TP-15-031A1)资助

**第一作者:** 涂佳静(1986-),女,讲师,博士,主要研究方向为多芯光纤、少模光纤、光子晶体光纤及模式复用\解复用器等光纤波导的研究与设计. Email: tujiajing@ustb.edu.cn

**通讯作者:** 隆克平(1968-),男,教授,博士,主要研究方向为光互联网、宽带网络生存性、互联网理论与技术、无线信息网络、网络应用与安全、NGN及物联网技术、计算通信融合理论与技术等. Email: longkeping@ustb.edu.cn

**收稿日期:** 2016-07-12; **录用日期:** 2016-09-09

<http://www.photon.ac.cn>

Fiber, FMF)可以通过增加空间信道数量来增加传输容量数量级,因此成为了下一代传输系统的候选光纤<sup>[2-5]</sup>.我国在光纤的空分复用技术方面展开了许多有意义的研究工作,其中华中科技大学的研究团队提出了一种新型的少模光纤来减小模式耦合串扰问题,并提出了多输入多输出延时均衡算法<sup>[6]</sup>,后来又联合武汉光电国家实验室与长飞光纤光缆有线公司提出了一种串扰小于-45 dB且模场面积大于 $130 \mu\text{m}^2$ 的多芯光纤<sup>[7]</sup>.北京交通大学的研究团队在大纤芯密度光纤中引入新型结构,使得弯曲损耗降低<sup>[8]</sup>,又基于强耦合型多芯光纤,提出了一种新型的多芯大模场少模光纤<sup>[9]</sup>.北京邮电大学的研究团队在计算机仿真平台上搭建了 $2 \times 6$  Gbit/s的模式复用系统并进行了传输70 km的仿真实验,对系统性能进行了分析<sup>[10]</sup>,研究了模式复用系统中少模光纤的模式时延问题<sup>[11]</sup>.另外,吉林大学的光通信研究团队提出了一种用于模式复用的四模光纤,其有效面积达 $120 \mu\text{m}^2$ 且损耗小于 $0.2 \text{ dB/km}$ <sup>[12]</sup>.

对于MCF,必须在有限的包层空间内以一定的纤芯间距来排布纤芯,所以这就限制了纤芯数量的增加<sup>[13]</sup>.对于FMF,增加空间模式数量并不难,但这会引起高次模很大的弯曲损耗并使得大量模式的复用解复用过程极度复杂化.所以,如何进一步增加每根光纤的空间传输信道以达到更大的传输容量是一个十分重要的问题.为了解决这一问题,少模多芯光纤(Few-Mode Multi-Core Fiber, FM-MCF)这一新型结构被提出并受到广泛关注<sup>[14-15]</sup>.在FM-MCF中,信道数量为纤芯数量 $N$ 与单个纤芯中同时传输的模式数量 $M$ 的乘积 $(N(M))$ .为了减小接收端数字信号处理的计算复杂度,FM-MCF中每一个纤芯内必须保证足够小的模式差分群时延(Differential Mode Delay, DMD),从而可以使用多人多出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)系统来提升光通信系统的频谱效率.

最近,许多降低DMD的纤芯结构被提出,例如沟槽辅助式(此后称为“槽助式”)多阶跃折射率纤芯结构<sup>[16-17]</sup>,槽助式渐变折射率纤芯结构<sup>[5,18-19]</sup>.除了纤芯结构之外,还需要分析和设计FM-MCF的纤芯排布.与纤芯排布相关的参量包括包层直径(Cladding Diameter,  $D_{cl}$ ),包层厚度(Cladding Thickness, CT)和纤芯间距(Core-to-core distance,  $\Delta$ ).从制造工艺的角度,包层最大的 $D_{cl}$ 不应该大于 $225 \mu\text{m}$ 以使得制造失败率小于 $10^{-7}$ <sup>[13]</sup>.CT需要足够大以使高次模的宏弯损耗能够小于 $0.001 \text{ dB/km}$ <sup>[20]</sup>.同时,需要合理安排 $\Delta$ 以减小芯间串扰(XT).因此,对FM-MCF的纤芯排布需要进行更深入地分析以找出最优的设计方案.

本文将针对单圆环(One Ring Structure, ORS)和方点阵型(Square Lattice Structure, SLS)少模多芯光纤,给出这两种结构的纤芯设计方法,并通过分析光纤特性最终给出最优纤芯排布方案.

## 1 3模传输纤芯设计

### 1.1 纤芯结构

与如图1(a)的传统的阶跃折射率纤芯结构相比,图1(b)的双阶跃折射率和图1(c)的渐变折射率纤芯结构有更大的设计自由度来控制有效折射率( $n_{\text{eff}}$ ).因此,双阶跃折射率和渐变折射率纤芯结构被更多地用来获取更低的|DMD|值.在文献[18]中,作者利用如图2的槽助式渐变折射率纤芯结构使得常规波段和长波段(C+L)上的|DMD|均小于 $100 \text{ ps/km}$ ,其中沟槽相对纤芯位置( $r_2/r_1$ )为1.3,渐变折射率因子( $\alpha$ )为2.2.在图2(b)中, $r_1$ 、 $r_2$ 、 $W$ 、 $\Delta_1$ 分别表示纤芯半径,纤芯中心到沟槽内侧的距离、沟槽的厚度以及沟槽与包层的相对折射率差.渐变折射率纤芯最大的折射率与包层的相对折射率差 $\Delta$ 被定义为 $\Delta = \Delta_1 [1 - (r/r_1)^\alpha]$ ,其中 $\Delta_1$ 为纤芯折射率的最大值, $\alpha$ 是渐变折射率的形状因子, $r$ 代表纤芯中心到纤芯内目标点的辐射半径.

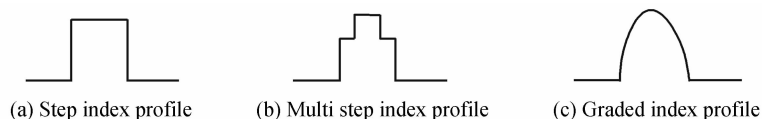


图1 不同纤芯结构

Fig. 1 Different fiber core structures

因此,本文也采用如图2的槽助式渐变折射率纤芯结构,设 $r_2/r_1$ 为1.3, $\alpha$ 为2.2且 $\Delta_1$ 为-0.7%.本文研究的目标为3模传输的少模多芯光纤,其中3模包括 $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 和 $LP_{11b}$ 模式.由于 $LP_{11a}$ 和 $LP_{11b}$ 为简并模,所以本文中的DMD被定义为 $LP_{11}$ 模与 $LP_{01}$ 模之间的群时延差.在确定好了纤芯折射率结构之后,需要通过改变 $r_1$ 、 $\Delta_1$ 和 $W/r_1$ 来确定支持3模传输且具有低|DMD|值的异质纤芯.本文中采用的异质纤芯(即纤

芯半径和折射率均不同的纤芯)可以在弯曲半径( $R$ )大于弯曲半径阈值( $R_{pk}$ )时使得芯间串扰变得对弯曲程度不敏感并且由于异质纤芯间比同质纤芯间具有更大的有效折射率差( $\Delta n_{eff}$ ),XT 得以有效地降低.此外,每个纤芯外围的低折射率沟槽可以通过抑制两个相邻纤芯电场分布的交叠从而进一步减小 XT<sup>[17-18,21]</sup>.槽助式渐变折射率异质纤芯间的 XT 在  $\Delta$  很短的情况下仍然可以很小,这就使得增大纤芯密度成为可能.

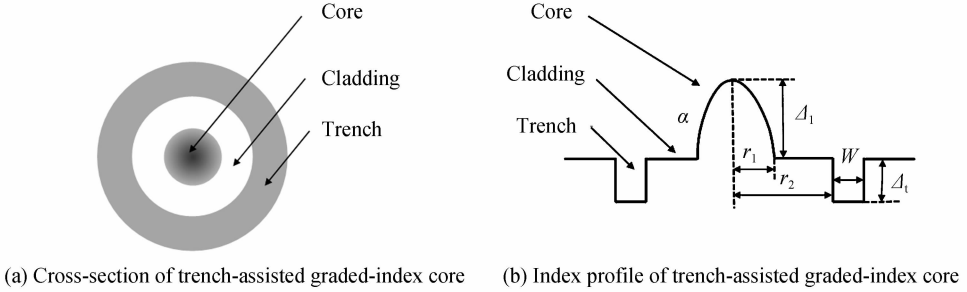


图 2 槽助式渐变折射率纤芯横截面和结构

Fig. 2 Cross-section and index profile of trench-assisted graded-index core

### 1.2 纤芯选取

图 3(a)和图 3(b)分别是单圆环结构的少模多芯光纤(ORS-FM-MCF)和方点阵结构的少模多芯光纤(SLS-FM-MCF).这两种结构可以排布的异质纤芯种类的最小数量均为 2,因此需要为 ORS 和 SLS 选取至少两个异质纤芯.其中, $D_{cl}$ 、CT 和  $\Delta$  分别表示纤芯直径、外层包层厚度和芯间距离.图 4(a)表示当  $W/r_1 = 0.71$  时,LP<sub>01</sub> 模式的有效面积( $A_{eff}$ )、LP<sub>01</sub> 模式的有效折射率( $n_{eff}$ )、DMD 对  $r_1$  和  $\Delta_1$  的依赖关系;图 4(b)表示当  $W/r_1 = 0.22$  时,LP<sub>01</sub> 模的有效面积( $A_{eff}$ )、LP<sub>01</sub> 模的有效折射率( $n_{eff}$ )、DMD 对  $r_1$  和  $\Delta_1$  的依赖关系.此处,任意选取  $W/r_1$  的值来确保两个纤芯的模式间具有足够大的有效折射率差( $\Delta n_{eff}$ )以获取相对小的弯曲半径阈值( $R_{pk}$ )<sup>[22]</sup>.在图 4(a)和图 4(b)中,实线,虚线以及点虚线分别表示 LP<sub>01</sub> 模式的  $A_{eff}$ , LP<sub>01</sub> 模式的  $n_{eff}$

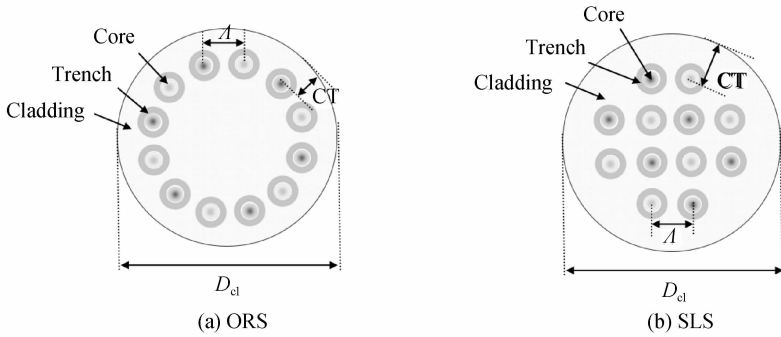


图 3 单圆和方点阵结构纤芯排布

Fig. 3 Core arrangement of ORS and SLS

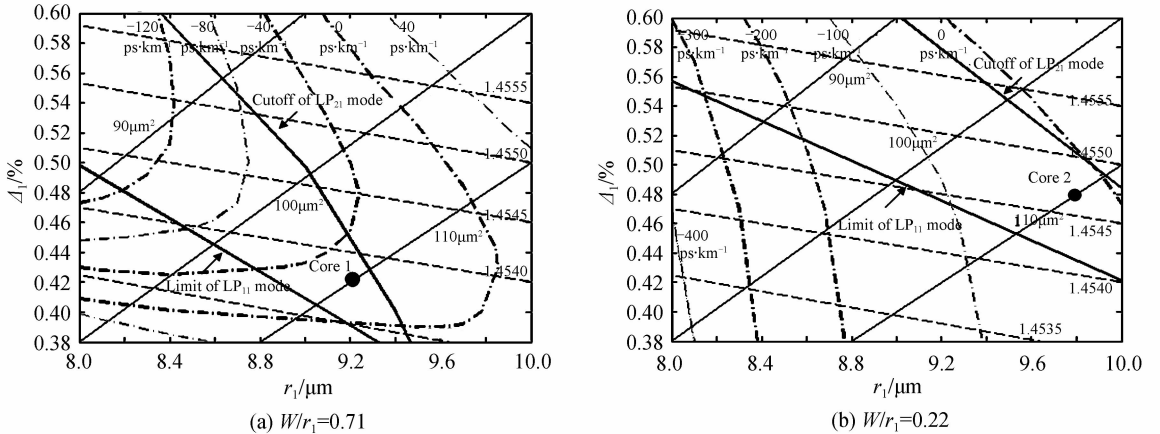


图 4  $W/r_1$  分别为 0.71 和 0.22 时,LP<sub>01</sub> 模的有效面积( $A_{eff}$ )、LP<sub>01</sub> 模的有效折射率( $n_{eff}$ )和 DMD 对于  $r_1$  和  $\Delta_1$  的依赖关系  
Fig. 4  $A_{eff}$  of LP<sub>01</sub> mode,  $n_{eff}$  of LP<sub>01</sub> mode and DMD as function of  $r_1$  and  $\Delta_1$  with  $W/r_1 = 0.7, 0.22$ , respectively

和 DMD. 其中,  $A_{\text{eff}}$  和  $n_{\text{eff}}$  的计算都是基于全矢量有限元法<sup>[23]</sup>. 在图 4(a)和 4(b)中, 上下两条加粗的实线围成的区域被称为 3 模工作区间, 因为在此区间内可以保证 LP<sub>01</sub> 模、LP<sub>11a</sub> 模和 LP<sub>11b</sub> 模的传输. 此处, 通过计算 LP<sub>21</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模的弯曲损耗(Bending Loss, BL)来定义 3 模工作区间的上下限. 根据文件 IEC 60793-1-44 中的部署配置, 在弯曲半径( $R$ )为 140 mm 且波长( $\lambda$ )为 1 530 nm 时, 如果 LP<sub>21</sub> 模的 BL > 1 dB/m, 则认为 LP<sub>21</sub> 模完全泄露到纤芯外. 根据 ITU-T G. 655 和 G. 656 标准, 在  $R=30$  mm 且  $\lambda=1625$  nm 时, 如果 LP<sub>11</sub> 模的 BL < 0.5 dB/100 turns, 则认为 LP<sub>11</sub> 模被完全地束缚在纤芯内. 因此, 图 4(a)和图 4(b)中的上下两条加粗的实线分别表示在  $W/r_1=0.71$  和  $W/r_1=0.22$  的条件下 LP<sub>21</sub> 模的截止条件——BL=1 dB/m 以及 LP<sub>11</sub> 模的下限条件——BL=0.5 dB/100turns.

另外, 从图 4(a)和图 4(b)中可以发现, 在 3 模工作区间内, 纤芯的有效面积越大, 其模式间的 DMD 越小. 因此, 我们选择  $110 \mu\text{m}^2$  作为纤芯的有效面积目标值. 当然, 也可以选择例如  $120 \mu\text{m}^2$  更大的有效面积当成设计目标值, 但是更大的有效面积意味着更大的电场分布, 这就会造成更大的芯间串扰. 因此有效面积和芯间串扰无法同时达到最优. 在 3 模工作区间内, 选取了两个具有  $110 \mu\text{m}^2$  有效面积的纤芯, 它们分别对应于图 4(a)和图 4(b)中的纤芯 1 和纤芯 2. 此处, 纤芯 1 的结构参量为  $r_1=9.22 \mu\text{m}$  和  $\Delta_1=0.420\%$ ; 纤芯 2 的结构参量为  $r_1=9.78 \mu\text{m}$  和  $\Delta_1=0.473\%$ . 图 5 表示纤芯 1 和纤芯 2 的 DMD 对波长的依赖关系. 从图 5 中可以发现纤芯 1 和纤芯 2 在 C+L 波段都可以保证 |DMD| 值小于 100 ps/km.

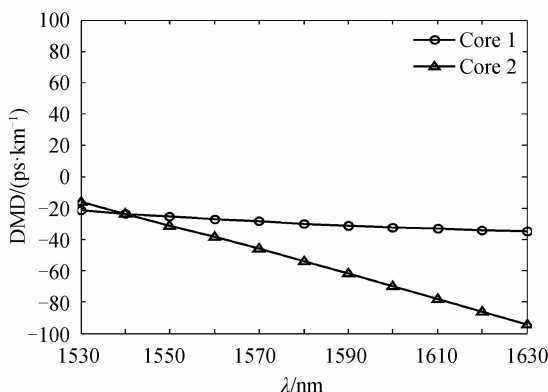


图 5 纤芯 1 和纤芯 2 的 DMD 对于波长的依赖关系  
Fig. 5 Dependence of DMD in Core 1 and Core 2 on the wavelength

### 1.3 纤芯排布

分析纤芯排布需要考虑 3 个参量, 分别为  $D_{\text{cl}}$ 、CT 和  $\Delta$ . 为了在包层中容纳更多的纤芯, 我们把  $D_{\text{cl}}$  设置为最大上限值  $225 \mu\text{m}$  以使得光纤制备时的失败率不大于  $10^{-7}$ <sup>[13]</sup>. 为了抑制宏弯损耗, 需要设计合适的 CT 值. 图 6 表示在  $R=140$  mm 且  $\lambda=1 625$  nm 条件下纤芯 1 和纤芯 2 中 LP<sub>11</sub> 模的弯曲损耗 BL 对 CT 的依赖关系. 如果当  $\lambda=1 625$  nm 时 BL < 0.001 dB/km, 则认为在 C+L 波段上 BL < 0.001 dB/km. 从图 6 中可以

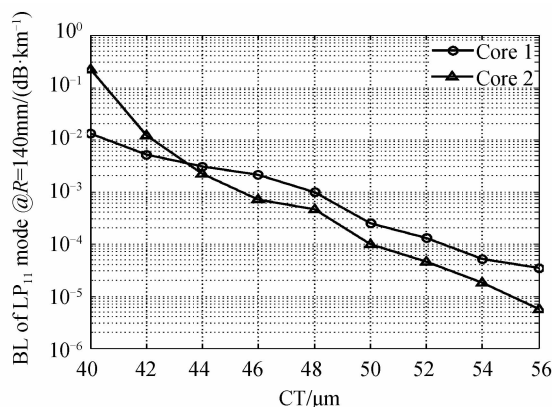


图 6 在  $R=140$  mm 且  $\lambda=1 625$  nm 条件下纤芯 1 和纤芯 2 中 LP<sub>11</sub> 模的弯曲损耗对 CT 的依赖关系  
Fig. 6 Dependence of bending loss of LP<sub>11</sub> mode in Core 1 and Core 2 on CT under the condition that  $R=140$  mm and  $\lambda=1 625$  nm

发现对于纤芯 1 和纤芯 2, CT 需要分别大于  $48.0 \mu\text{m}$  和  $45.3 \mu\text{m}$  以使 BL 小于上限值  $0.001 \text{ dB/km}^{[20]}$ . 所以对于 ORS 和 SLS, CT 至少应该为  $48.0 \mu\text{m}$ .

式(1)和式(2)分别是 ORS 和 SLS 的  $D_{\text{cl}}$  关于 CT 和  $\Lambda$  的表达式.

$$D_{\text{cl}} = \frac{\Lambda}{\sin(\pi/N_{\text{core}})} + 2CT \quad (1)$$

$$D_{\text{cl}} = \sqrt{10}\Lambda + 2CT \quad (2)$$

式中,  $N_{\text{core}}$  表示纤芯数量. 根据式(1)和式(2)所示的  $D_{\text{cl}}$ 、CT 和  $\Lambda$  三者的关系,  $D_{\text{cl}}$  上限值和 CT 下限值, 可以得知 ORS 和 SLS 的  $\Lambda$  最大值分别为  $33.4 \mu\text{m}$  和  $40.8 \mu\text{m}$ . 另外, 因为在纤芯中有两个非简并模式  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模传输, 所以芯间模式串扰需要考虑 3 种情况, 分别为  $LP_{01}$  模间的串扰( $XT_{01-01}$ )、 $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模间的串扰( $XT_{01-11}$ )以及  $LP_{11}$  模间的串扰( $XT_{11-11}$ ). 因为  $LP_{11}$  模比  $LP_{01}$  模的电场分布更大, 所以  $XT_{11-11}$  在上述 3 种串扰中具有最大值<sup>[14]</sup>.

图 7(a)和图 7(b)分别表示 ORS 在  $\Lambda = 33.4 \mu\text{m}$  和 SLS 在  $\Lambda = 40.8 \mu\text{m}$  的条件下, 芯间串扰  $XT_{11-11}$  对  $R$  的依赖性. 对于图 7(a)中所示的 ORS-FM-MCF, 当  $R > R_{\text{pk}}$  时  $XT_{11-11} \leq -30 \text{ dB/100km}$  且  $R_{\text{pk}} > 5 \text{ cm}$ . 对于图 7(b)中的 SLS-FM-MCF, 当  $R > R_{\text{pk}}$  时,  $XT_{11-11} \leq -40 \text{ dB/100km}$  且  $R_{\text{pk}} < 10 \text{ cm}$ . ORS 和 SLS 排布的 FM-MCF 的相对纤芯多重性因子(RCMF)均为 15.28.

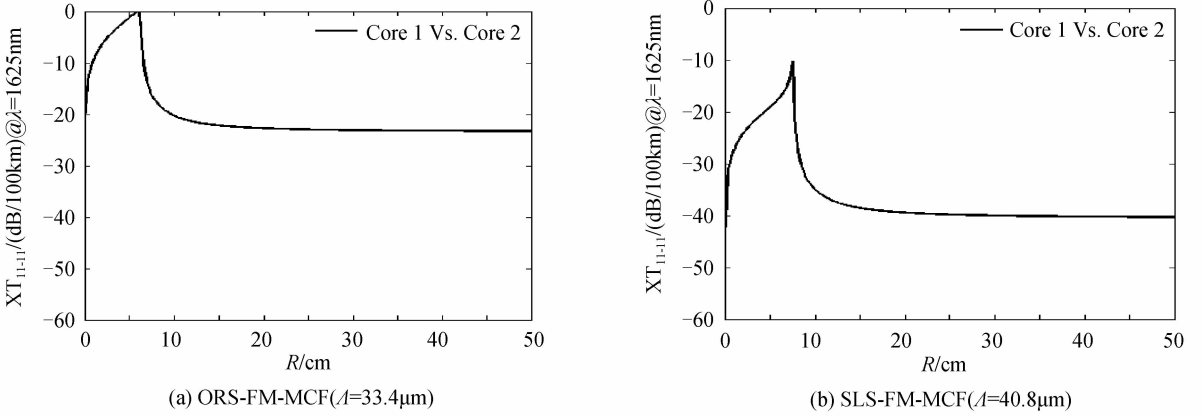


图 7 当  $\lambda = 1625 \text{ nm}$  时, ORS-FM-MCF 和 SLS-FM-MCF 的  $XT_{11-11}$  对  $R$  的依赖关系

Fig. 7 Dependence of  $XT_{11-11}$  of ORS-FM-MCF and SLS-FM-MCF on  $R$  when  $\lambda = 1625 \text{ nm}$ , respectively

根据 FM-MCF 的纤芯多重性因子(CMF)的定义<sup>[20]</sup>, ORS 和 SLS 的 CMF 如式(3), 即

$$\text{CMF} = \frac{\sum_{p=1}^n (N_p \sum_{m=1}^l A_{\text{eff-}p-m})}{(\pi/4)D_{\text{cl}}^2} \quad (3)$$

式中,  $N_p$  是  $p$  型光纤的数量,  $n$  是纤芯种类数量,  $A_{\text{eff-}p-m}$  是  $p$  型光纤中  $m$  阶模的有效面积,  $l$  是模式数量.

式(4)表示的 RCMF 是所设计光纤与标准单芯单模光纤的 CMF 比值. 其中, 标准单芯单模光纤的  $A_{\text{eff}}$  在  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  条件下为  $80 \mu\text{m}^2$  且  $D_{\text{cl}} = 125 \mu\text{m}^{[20]}$ .

$$\text{RCMF} = \text{CMF} / \frac{80}{(\pi/4)125^2} \quad (4)$$

## 2 少模多芯光纤性能优化

将  $XT_{11-11}$  和  $\lambda_{\text{cc}}$  作为优化对象. 为在传输  $100 \text{ km}$  时使用 64AQM 高阶调制格式, 串扰需要小于  $-50 \text{ dB/km}^{[24]}$ , 因此传输  $100 \text{ km}$  后的串扰需要小于  $-30 \text{ dB}$ . 另外, 为保证 C+L 波段的传输,  $LP_{21}$  模的  $\lambda_{\text{cc}}$  需要不大于  $1530 \text{ nm}$ .

对于 ORS,  $XT_{11-11}$  大于  $-30 \text{ dB/100 km}$  且  $LP_{21}$  模的  $\lambda_{\text{cc}}$  的最大值为  $1610 \text{ nm}$ , 均未达到参量的目标值. 如果要在不改变有效面积的条件下降低串扰, 需要增大  $r_1$  和  $\Delta_1$  或者增加  $W/r_1$  以扩大低折射率沟槽厚度来抑制纤芯间电场交叠. 然而, 由于 ORS 在  $D_{\text{cl}}$  的限制下对  $\Lambda$  没有很大的扩展空间, 所以很难通过增加  $r_1$  和  $\Delta_1$  或者增加  $W/r_1$  的方法找到合适纤芯使得  $XT_{11-11}$  小于  $-30 \text{ dB/100km}$ . 从图 8(a)可以发现如果将纤芯 1 和

纤芯 2 间的  $\Delta$  增加到  $36 \mu\text{m}$ ,  $\text{XT}_{11-11}$  可以达到  $-30 \text{ dB}/100 \text{ km}$ . 但是此时  $D_{\text{cl}}$  已达到  $235 \mu\text{m}$  并且  $\text{LP}_{21}$  模的  $\lambda_{\text{cc}}$  依然长于  $1530 \text{ nm}$ .

对于 SLS,  $\text{XT}_{11-11}$  比  $-30 \text{ dB}/100 \text{ km}$  小很多, 所以可以通过牺牲一些串扰来缩短  $\text{LP}_{21}$  模的  $\lambda_{\text{cc}}$ . 第一个缩短  $\lambda_{\text{cc}}$  的方法是减小  $r_1$  和  $\Delta_1$  以降低纤芯对模式的束缚程度. 然而, 外侧纤芯在减小  $r_1$  和  $\Delta_1$  后需要更大的 CT 来保证足够小的 BL, 所以  $\Delta$  会被压缩到更小. 相反地, 更小的  $\Delta$  会使得低折射率沟槽靠得更近从而造成  $\text{LP}_{21}$  模的  $\lambda_{\text{cc}}$  更长. 因此, 通过减小  $r_1$  和  $\Delta_1$  并不能达到缩短  $\lambda_{\text{cc}}$  的目的. 第二个缩短  $\lambda_{\text{cc}}$  的方法是增加  $r_1$  和  $\Delta_1$  以减小 CT 从而增加  $\Delta$ . 在纤芯 1 基础上增加  $r_1$  和  $\Delta_1$  从而获得新的纤芯  $1'$ . 对于纤芯  $1'$ ,  $r_1 = 9.55 \mu\text{m}$ ,  $\Delta_1 = 0.452\%$ ,  $W/r_1 = 0.42$ . 纤芯  $1'$  与纤芯 2 具有相同的 CT 值  $-45.3 \mu\text{m}$ , 此时  $\Delta = 42.5 \mu\text{m}$ . 所以选择纤芯  $1'$  和纤芯 2 作为被优化的 SLS-FM-MCF 的两个纤芯, 此时  $\text{LP}_{21}$  模的  $\lambda_{\text{cc}}$  最大值为  $1530 \text{ nm}$ . 如图 8(b), 被优化的 SLS-FM-MCF 的  $\text{XT}_{11-11}$  为  $-31 \text{ dB}/100 \text{ km}$  且  $R_{\text{pk}}$  为  $\sim 20 \text{ cm}$ .

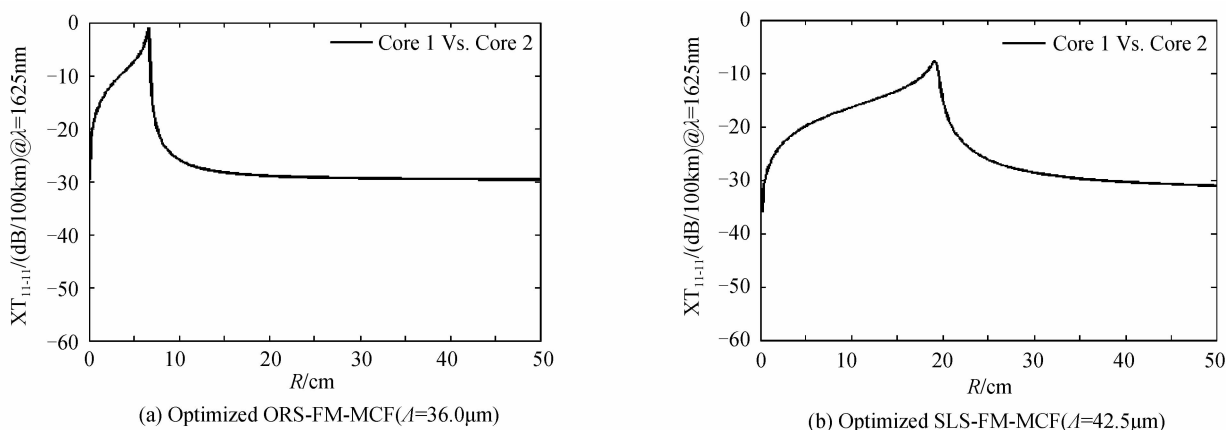


图 8 当  $\lambda = 1625 \text{ nm}$  时, 优化后的 ORS-FM-MCF 和 SLS-FM-MCF 的  $\text{XT}_{11-11}$  对  $R$  的依赖关系

Fig. 8 Dependence of  $\text{XT}_{11-11}$  of optimized ORS-FM-MCF and SLS-FM-MCF on  $R$  when  $\lambda = 1625 \text{ nm}$ , respectively

### 3 ORS-FM-MCF 与 SLS-FM-MCF 的性能对比

表 1 在  $\text{XT}_{11-11}$ ,  $\lambda_{\text{cc}}$ ,  $R_{\text{pk}}$  和 RCMF 四个方面对 ORS 和 SLS 结构进行了对比分析. 从表 1 可以知道, 优化后的 ORS (ORS\*) 可以使  $\text{XT}_{11-11}$  从  $-23 \text{ dB}/100 \text{ km}$  降低至  $-30 \text{ dB}/100 \text{ km}$ , 但是  $\text{LP}_{21}$  模的  $\lambda_{\text{cc}}$  依然比  $1530 \text{ nm}$  大. 与 ORS 相比, SLS 可以获得更低的  $\text{XT}_{11-11}$  和更小的  $R_{\text{pk}}$ , 但是内层的纤芯中  $\text{LP}_{21}$  模的  $\lambda_{\text{cc}}$  还是长于  $1530 \text{ nm}$ . 优化后的 SLS (SLS\*) 可以使得  $\lambda_{\text{cc}}$  不大于  $1530 \text{ nm}$ . 因此, SLS 比 ORS 更适合 3 模 FM-MCF.

表 1 ORS-FM-MCF 与 SLS-FM-MCF 的性能对比

Table 1 Characteristics comparison between ORS-FM-MCF and SLS-FM-MCF

Core arrangement	Core	$\text{XT}_{11-11}$	$\lambda_{\text{cc}}$	$R_{\text{pk}}$	RCMF
	—	dB/100 km	nm	cm	—
ORS	1,2	-23	1610	6.14	15.28
ORS*	1,2	-30	1597	6.62	14.00
SLS	1,2	-40	1630	7.51	15.28
SLS*	1',2	-31	1530	19.31	15.26

### 4 结论

本文针对 3 模 12 芯光纤分析了单圆环纤芯排布结构 (ORS) 和方点阵式纤芯排布结构 (SLS). 少模多芯光纤的设计目标为: 在波长为  $1625 \text{ nm}$  的条件下,  $\text{XT} \leq -30 \text{ dB}/100 \text{ km}$ ,  $\text{LP}_{21}$  模的  $\lambda_{\text{cc}} \leq 1530 \text{ nm}$ , 从而保证信号能以高级调制格式在 C+L 波段上传输. 研究发现对于 ORS 很难使得  $\text{XT}_{11-11}$  和  $\lambda_{\text{cc}}$  同时达到目标要求. 然而, 经过优化后的 SLS 结构可以使得 FM-MCF 的  $\text{XT}_{11-11}$  在  $R$  大于阈值后达到  $-31 \text{ dB}/100 \text{ km}$  且 RCMF 为 15.26. 此时,  $\lambda_{\text{cc}}$  也能保证不大于  $1530 \text{ nm}$ . 因此, 本文证明 SLS 比 ORS 更适合 3 模 12 芯光纤的纤芯排布.

## 参考文献

- [1] MORIOKA T. New generation optical infrastructure technologies; ‘EXACT initiative’ towards 2020 and beyond[C]. Optoelectronics and Communications Conference (OECC), 2009; FT4.
- [2] SAKAGUCHI J, PUTTNAM B J, KLAUS W, *et al.* 19-core fiber transmission of 19x100x172-Gb/s SDM-WDM-PDMQPSK signals at 305 Tb/s[C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2012; PDP5C.1.
- [3] TAKARA H, SANO A, KOBAYASHI T, *et al.* 1. 01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregate spectral efficiency [C]. European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), 2012; Th. 3. C. 1.
- [4] MATSUO S, SASAKI Y, ISHIDA I, *et al.* Recent progress on multi-core fiber and few mode fiber[C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013; OM3I. 3.
- [5] SATO K, MARUYAMA R, KUWAKI N, *et al.* Optimized graded index two-mode optical fiber with low DMD, large  $A_{\text{eff}}$  and low bending loss[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(14): 16231-16238.
- [6] YAO Shu-chang, FU Song-nian, ZHANG Min-ming, *et al.* Demodulation and multi-input multi-output equalization for mode division multiplexing system using a novel few-mode fiber[J]. *Acta Physical Sinica*, 2013, **62**(14): 144215.  
姚殊畅,付松年,张敏明,等. 基于少模光纤的模式复用系统多输入多输出均衡与解调[J]. 物理学报, 2013, **62**(14): 144215.
- [7] YANG Fang, TANG Ming, LI Bo-rui, *et al.* Design and optimization of multi-core fibers with low crosstalk and large effective area[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(1): 0106005.  
杨芳,唐明,李博睿,等. 低串扰大模场面积多芯光纤的设计与优化[J]. 光学学报, 2014, **34**(1): 0106005.
- [8] LIN Zhen, ZHENG Si-wen, REN Guo-bin, *et al.* Characterization and comparison of 7-core and 19-core large-mode-area few mode fibers[J]. *Acta Physical Sinica*, 2013, **62**(6): 064214.  
林桢,郑斯文,任国斌,等. 七芯及十九芯大模场少模光纤的特性研究和对比分析[J]. 物理学报, 2013, **62**(6): 064214.
- [9] ZHENG Si-wen, LIN Zhen, REN Guo-bin, *et al.* Design and analysis of novel multi-core dual-mode large-mode-area optical fiber[J]. *Acta Physical Sinica*, 2013, **62**(4): 044224.  
郑斯文,林桢,任国斌,等. 一种新型多芯-双模-大模场面积光纤的设计和分析[J]. 物理学报, 2013, **62**(4): 044224.
- [10] HAN J, ZHANG J, ZHAO Y, *et al.* Numerical demonstration of mode-division multiplexing transmission over dual-mode photonic crystal fiber enabled by fiber couplers[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, **124**: 1287-1289.
- [11] MUNIR A, XIN X, LIU B, *et al.* Numerical analysis of intermodal delay in few-mode fibers for mode division multiplexing in optical fiber communication systems[J]. *Optoelectronics Letters*, 2012, **8**: 138-141.
- [12] XIAO Jian, HU Gui-jun, DU Yang, *et al.* Design and characteristic analysis of few-mode fiber used for mode division multiplexing[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, **34**(5): 830-837.  
肖健,胡贵军,杜洋,等. 用于模式复用的少模光纤设计及特性分析[J]. 半导体光电, 2013, **34**(5): 830-837.
- [13] MATSUO S, TAKENAGA K, ARAKAWA Y, *et al.* Large-effective-area ten-core fiber with cladding diameter of about 200  $\mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(23): 4626-4628.
- [14] TAKENAGA K, SASAKI Y, GUAN N, *et al.* Large effective-area few-mode multicore fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(21): 1941-1944.
- [15] XIA C, AMEZCUA-COREA R, BAI N, *et al.* Low-crosstalk few-mode multi-core fiber for high-mode-density space-division multiplexing[C]. European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), 2012; Mo. 1. F. 5.
- [16] SAKAMOTO T, MORI T, YAMAMOTO T, *et al.* Differential mode delay managed transmission line for WDM-MIMO system using multi-step index fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(17): 2783-2787.
- [17] TU J, SAITOH K, TAKENAGA K, *et al.* Heterogeneous trench-assisted few-mode multi-core fiber with low differential mode delay[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(4): 4329-4341.
- [18] TU J, SAITOH K, AMMA Y, *et al.* Heterogeneous trench-assisted few-mode multi-core fiber with graded-index profile and square-lattice layout for low differential mode delay[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(12): 17783-17792.
- [19] SILLARD P, BIGOT-ASTRUC M, MOLIN D, *et al.* Few-mode fibers for mode-division multiplexed systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(16): 2824-2829.
- [20] TAKENAGA K, ARAKAWA Y, SASAKI Y, *et al.* A large effective area multi-core fiber with an optimized cladding thickness[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(26): B543-B550.
- [21] TU 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): 15157-15170.
- [22] HAYASHI T, TARU T, SHIMAKAWA O, *et al.* Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(17): 16576-16592.
- [23] SAITOH K, KOSHIBA M. Full-vectorial imaginary-distance beam propagation method based on a finite element scheme: Application to photonic crystal fibers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, **38**(7): 927-933.
- [24] SAITOH K, MATSUO S. Multicore fiber technology[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(1): 55-66.