

## 低串扰大模场四芯五模微结构光纤的理论研究

梁永泽, 梁恩旺, 张函, 汪国瑞, 张继伟, 闫欣, 王方, 张学楠, 程同蕾\*

东北大学信息科学与工程学院流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004

**摘要** 为满足空分复用和模分复用系统对大容量、多通道通信光纤的需求, 提出了一种新型的沟槽“十字形”空气孔辅助型多芯少模微结构光纤。利用有限元法(FEM)计算并优化光纤结构参数。结果表明:在工作波长 1550 nm 处,该光纤实现了  $LP_{01}$ 、 $LP_{11}$ 、 $LP_{21}$ 、 $LP_{02}$ 、 $LP_{31}$  5-LP 模式的稳定传输,有效模场面积分别为 113.14、159.70、174.43、104.91、192.74  $\mu\text{m}^2$ ,且在传输距离为 10 km 的情况下,芯间串扰均小于 -40 dB,相对纤芯复用因子为 62.722。与已报道的多芯少模光纤相比,该光纤具有低串扰和大模场面积的优点,可满足未来大容量、多通道传输系统的需求。

**关键词** 光纤光学; 微结构光纤; 多芯光纤; 少模光纤; 模场面积; 芯间串扰

**中图分类号** TN913.7

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202148.1906004

## 1 引言

近年来,随着高速光纤通信的快速发展,单模光纤(SMF)通信系统的信道容量已不能满足现在大容量、多通道的传输需求<sup>[1-4]</sup>。若不及时迭代更新光纤传输信道的容量和性能,将严重制约网络和通信系统的发展。基于空分复用(SDM)和模分复用(MDM)技术的多芯光纤(MCF)<sup>[5]</sup>和少模光纤(FMF)<sup>[6-7]</sup>有望克服 SMF 的物理极限,解决 SMF 传输容量不足等问题,该类光纤的研发已经成为通讯技术发展的迫切需求。

1994 年,法国电信提出了多芯单模光纤的概念<sup>[8]</sup>,开启了 MCF 研究领域的新时代。MCF 是在单芯光纤的标准结构中植入多根纤芯制备而成的,因此纤芯间会产生串扰(XT)。过大的芯间串扰(ICXT)会导致信号传输失真和传输距离缩短,抑制 ICXT 是保证光信号在长距离、大容量条件下稳定传输的关键因素。为此,研究人员提出了不同的解决方案:方案 1 是降低纤芯周围折射率,在纤芯周围加空气孔<sup>[9-10]</sup>或者低折射率沟槽<sup>[11-12]</sup>,通过改变空气孔大小和孔间距或者调节沟槽材料掺杂浓度以降

低纤芯周围的折射率,达到抑制 ICXT 的目的;方案 2 是采用异质纤芯<sup>[13-14]</sup>,异质纤芯的传播常数存在差异,在传输过程中会使纤芯间产生相位失配,从而降低纤芯间的横向耦合,有效抑制了 ICXT。随着研究的不断深入,多种以抑制串扰为目标的新型光纤结构逐渐被提出,例如,多沟槽结构<sup>[15]</sup>、空气沟槽结构<sup>[16]</sup>、沟槽内嵌空气孔结构<sup>[17-18]</sup>及沟槽辅助异质纤芯结构<sup>[19]</sup>等。

FMF 在单个通道中传输多个模式,每个模式搭载不同的信息,从而提升传输容量。相较于 SMF,FMF 具有较大的模场面积,可以有效抑制非线性效应<sup>[20]</sup>,实现大容量高功率传输。目前已报道的有抗弯曲单芯 FMF<sup>[21]</sup>、环形芯 FMF<sup>[22]</sup>、强耦合型少模多芯光纤(FM-MCF)<sup>[23]</sup>等类型。FMF 传输多个模式时,模式间会产生 XT,模间 XT 过大会导致传输信息失真,影响信息的准确度。当相邻两个模式间的有效折射率差( $\Delta n_{\text{eff}}$ )大于  $1 \times 10^{-3}$  时,可认为该光纤是弱耦合光纤,满足弱耦合 MDM 系统的要求<sup>[24]</sup>。减小模间 XT 可保证模式在 FMF 中稳定传输。设计 FMF 时还需要考虑差分模式群时延(DMGD),如接收端采用多输入多输出(MIMO)系

**收稿日期:** 2021-06-02; **修回日期:** 2021-07-20; **录用日期:** 2021-08-05

**基金项目:** 国家自然科学基金(61775032)、国家重点研发计划(2019YFB2204001)、教育部基本科研业务费(N2104022, N180406002, N180408018, N2004021)、111 引智基地(B16009)

**通信作者:** \*chengtonglei@ise.neu.edu.cn

统,过大的 DMGD 会直接影响 MIMO 的复杂度和存储压力,进而影响系统接收端的整体性能。综上所述,FM-MCF 可以实现低串扰和大有效模场面积,使得光纤性能大幅提升,更符合大容量、多通道、长距离稳定传输的条件。

本文提出了一种具有低串扰和大模场面积的沟槽“十字形”空气孔辅助多芯少模微结构光纤(TCAH-MC-FM-MOF)。通过数值方法计算模式的截止条件,保证每个独立纤芯支持 5 个模式传输。根据功率耦合理论,合理改变 TCAH-MC-FM-MOF 的结构参数,实现了 ICXT 小于 -40 dB,有效模场面积大于  $100 \mu\text{m}^2$ ,对设计用于 SDM-MDM 的 FM-MCF 具有理论指导意义。

## 2 光纤设计与特性分析

TCAH-MC-FM-MOF 模型包括纤芯、内包层、沟槽、外包层和空气孔 5 部分,截面图如图 1(a)所示。纤芯-包层的折射率呈阶跃型分布,纤芯材料是掺  $\text{GeO}_2$  的  $\text{SiO}_2$ ,掺  $\text{GeO}_2$  摩尔分数为  $c$ ,纤芯半径为  $r_2$ ,空气孔半径为  $r_1$ ,沟槽宽度为  $d(d=b-a)$ , $a$  为沟槽内径、 $b$  为沟槽外径,空气孔间距为  $\Lambda$ ,纤芯间距为  $2K$ 。石英包层直径为  $125 \mu\text{m}$ ,折射率为  $n_{\text{clad}}$ ,纤芯材料折射率为  $n_{\text{core}}$ ,沟槽折射率为  $n_{\text{trench}}$ ,TCAH-MC-FM-MOF 的折射率分布如图 1(b)所示。根据光纤的性能要求,给出了初始结构参数,如表 1 所示。

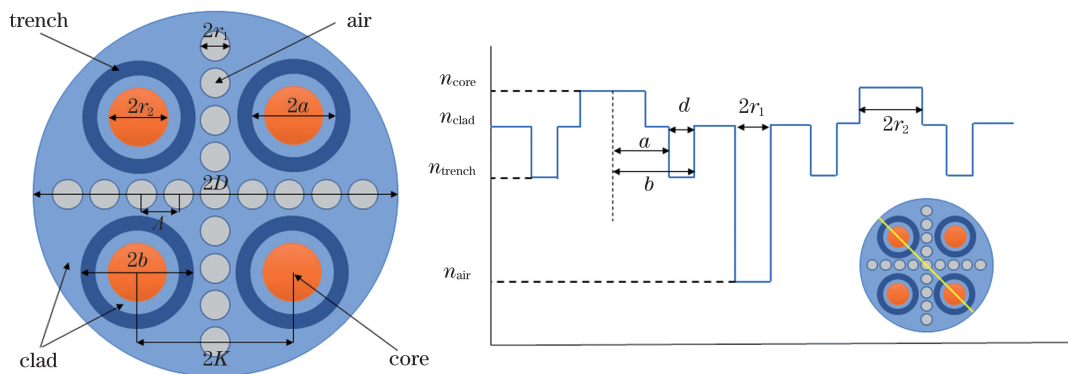


图 1 TCAH-MC-FM-MOF 结构。(a)TCAH-MC-FM-MOF 截面图;(b)TCAH-MC-FM-MOF 有效折射率分布  
Fig. 1 TCAH-MC-FM-MOF structure. (a) Cross section of TCAH-MC-FM-MOF; (b) effective refractive index distribution of TCAH-MC-FM-MOF

表 1 TCAH-MC-FM-MOF 初始化参数

Table 1 Initialization parameters of TCAH-MC-FM-MOF

Parameter	$r_1/\mu\text{m}$	$r_2/\mu\text{m}$	$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	$K/\mu\text{m}$	$\Lambda/\mu\text{m}$	$D/\mu\text{m}$	$c/\%$
Value	2.5	6.8	12	15	24	10	62.5	7.8

用于通信的 MCF 的涂覆层材料的折射率大于包层的折射率,当 optimized cladding thickness (OCT)过小时,高折射率涂覆层会引起光纤的附加损耗<sup>[25]</sup>。为实现 C 波段 5-LP 模式的稳定传输,根据 MCF 的弯曲损耗标准,LP<sub>31</sub> 在 1565 nm 波长处每 100 次转弯的弯曲损耗应小于 0.5 dB(弯曲半径  $R_b=30 \text{ mm}$ ),LP<sub>12</sub> 在 1530 nm 处的弯曲损耗应大于 1 dB/m ( $R_b=140 \text{ mm}$ )<sup>[16]</sup>。利用有限元法(FEM)计算模式的弯曲损耗(BL),得到模式的截止条件。BL 的计算公式为

$$L_{\text{BL}} = \frac{20}{\ln 10} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \text{imag}(n_{\text{eff}}), \quad (1)$$

式中:  $\text{imag}(n_{\text{eff}})$  表示有效折射率的虚部; $\lambda$  表示波长。LP<sub>31</sub> 和 LP<sub>12</sub> 模式的弯曲损耗如图 2 所示,图 2

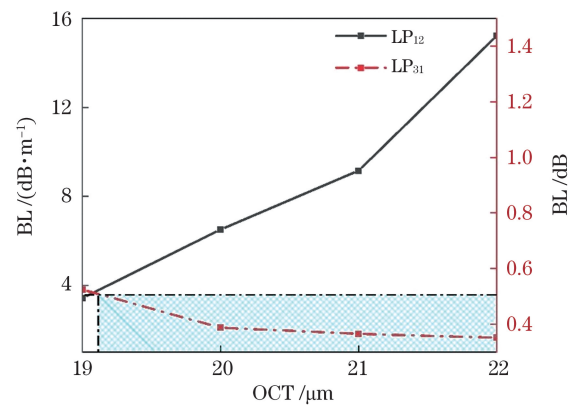


图 2 LP<sub>31</sub> 与 LP<sub>12</sub> 模式的截止条件  
Fig. 2 Cutoff conditions for LP<sub>31</sub> and LP<sub>12</sub> modes

右边纵坐标表示每 100 次转弯的弯曲损耗。图中实线表示在 1530 nm 处( $R_b=140 \text{ mm}$ )LP<sub>12</sub> 模式的弯

曲损耗,由图可知,随着 OCT 的变化,LP<sub>12</sub> 模式的弯曲损耗均大于 1 dB/m,满足截止条件。图中点划线表示在 1565 nm 处( $R_b=30$  mm)LP<sub>31</sub> 模式的弯曲损耗,当 OCT 大于 19.2  $\mu\text{m}$  时,LP<sub>31</sub> 模式的弯曲损耗满足支持传输条件。根据弯曲损耗的计算结果可知,TCAH-MC-FM-MOF 支持 5-LP 模式传输。

### 3 四芯光纤串扰特性分析

在光纤中,ICXT 是制约 MCF 长距离传输的关键因素<sup>[26]</sup>。衡量 MCF 的 ICXT 主要有两种方法:基于模式耦合理论(CMT)<sup>[27]</sup>和基于功率耦合理论(CPT)<sup>[27]</sup>。根据 CMT 分析可知,每个纤芯中的光功率在沿  $z$  方向传输时不断地进行波动性的相互耦合,但在实际铺设以及使用过程中,弯曲和应力的起伏会引起传输的不确定性。CPT 通过考虑纤芯  $m$  中的输入光功率和纤芯  $n$  在纤芯  $m$  中的耦合光功率来计算 ICXT。因此,相比 CMT,基于 CPT 分析 ICXT 的影响会更加有效、准确。CPT 的功率耦合方程<sup>[27]</sup>为

$$\frac{dP_m}{dz} = \sum_{m \neq n} h_{nm}(z) [P_n(z) - P_m(z)], \quad (2)$$

$$h_{nm} = \frac{2\kappa_{nm}^2}{\pi\sqrt{\delta^2 + \kappa_{nm}^2}}, \quad (3)$$

$$\kappa_{nm} = \frac{\omega\epsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2) \mathbf{E}_m^* \cdot \mathbf{E}_n dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{u}_z \cdot (\mathbf{E}_m^* \times \mathbf{H}_m + \mathbf{E}_m \times \mathbf{H}_m^*) dx dy}, \quad (4)$$

式中: $P_m$  和  $P_n$  分别表示纤芯  $m$  和纤芯  $n$  的平均功率, $z$  为传输方向; $h_{nm}$  表示纤芯  $m$  和纤芯  $n$  之间的功率耦合系数;纤芯  $n$  和纤芯  $m$  的传播常数差  $\delta = (\beta_n - \beta_m)/2$ ,其中  $\beta$  是传播常数; $\kappa_{nm}$  为模式耦合系数; $\omega$  是电磁场的角频率; $\epsilon_0$  是真空介电常数; $\mathbf{u}_z$  是单位矢量; $\mathbf{E}_m$  是纤芯  $m$  分布的电场能量; $\mathbf{E}_n$  是纤芯  $n$  电场能量在纤芯  $m$  的分布; $\mathbf{H}_m$  是纤芯  $m$  的磁场能量。

当 TCAH-MC-FM-MOF 的纤芯为正方形排列时,定义正方形对角线上纤芯间耦合系数为  $g$ ,其他纤芯间耦合系数为  $h$ ,有

$$\frac{dP_1}{dz} = -(2h + g)P_1 + hP_2 + gP_3 + hP_4, \quad (5)$$

$$\frac{dP_2}{dz} = \frac{dP_4}{dz} = -(2h + g)P_2 + hP_1 + hP_3 + gP_4, \quad (6)$$

$$\frac{dP_3}{dz} = -(2h + g)P_3 + hP_1 + gP_2 + hP_4. \quad (7)$$

当光在纤芯 1 传输时,即假设  $P_1(0) = 1$ ,且  $n \neq 1$  时  $P_n(0) = 0$ ,可得到在传输距离为  $z$  时纤芯 1 和其他纤芯模式功率的解析解分别为

$$P_1 = \frac{1 + 2e^{-2z(g+h)} + e^{-4hz}}{4}, \quad (8)$$

$$P_2 = P_4 = \frac{1 - e^{-4hz}}{4}, \quad (9)$$

$$P_3 = \frac{1 - 2e^{-2z(g+h)} + e^{-4hz}}{4}. \quad (10)$$

联立(8)~(10)式,可得四芯光纤 ICXT 计算公式为

$$N_{\text{XT}_{12}} = N_{\text{XT}_{14}} = 10 \log_{10} \left[ \frac{1 - e^{-4hz}}{1 + 2e^{-2z(g+h)} + e^{-4hz}} \right], \quad (11)$$

$$N_{\text{XT}_{13}} = 10 \log_{10} \left[ \frac{1 - 2e^{-2z(g+h)} + e^{-4hz}}{1 + 2e^{-2z(g+h)} + e^{-4hz}} \right]. \quad (12)$$

根据(11)、(12)式,在传输距离为 10 km 的情况下,分析了沟槽宽度  $d$ 、空气孔半径  $r_1$ 、芯间距  $K$  和纤芯掺杂摩尔分数  $c$  与 ICXT 的关系。在图 3(a)中,随着  $K$  的增大,所有模式的 ICXT 明显下降;在图 3(b)中,随着空气孔半径  $r_1$  的增大,不同模式的 ICXT 均呈下降趋势,其中 LP<sub>02</sub> 模式变化最大,下降了约 17 dB;在图 3(c)中,随着  $d$  的增大,所有模式的 ICXT 均下降,其中 LP<sub>01</sub>,LP<sub>11</sub>,LP<sub>21</sub>,LP<sub>02</sub> 均为线性下降,说明  $d$  与 ICXT 成正相关;在图 4(d)中,分析了  $c$  对 ICXT 的影响, $P$  与模式的有效模场面积  $A_{\text{eff}}$  成负相关。掺 GeO<sub>2</sub> 摩尔分数越高,纤芯折射率越高,可以将光有效束缚在纤芯内,减小了模式间的电磁场重叠,降低了 ICXT。为保证 ICXT 小于 -40 dB, $d$  应大于 4  $\mu\text{m}$ , $r_1$  应大于 3  $\mu\text{m}$ , $A$  应大于 50  $\mu\text{m}^2$ ,掺锗摩尔分数  $c$  在 8% 左右。综合上述分析可得,在 1550 nm 处,基模与高阶模的 ICXT 分别为 -129.77 dB, -113.46 dB, -88.14 dB, -75.96 dB, -40.00 dB。

模式的  $A_{\text{eff}}$  与非线性系数 ( $\gamma$ ) 二者成反比,因此具有大模场面积的光纤可有效减小光纤非线性效应带来的不利影响<sup>[20]</sup>。模式的  $A_{\text{eff}}$ <sup>[28-29]</sup> 的计算公式为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\iint |E|^2 dx dy}{\iint |E|^4 dx dy}, \quad (13)$$

式中: $E$  表示模式的电场强度分布。利用(13)式可计算不同模式的  $A_{\text{eff}}$ 。



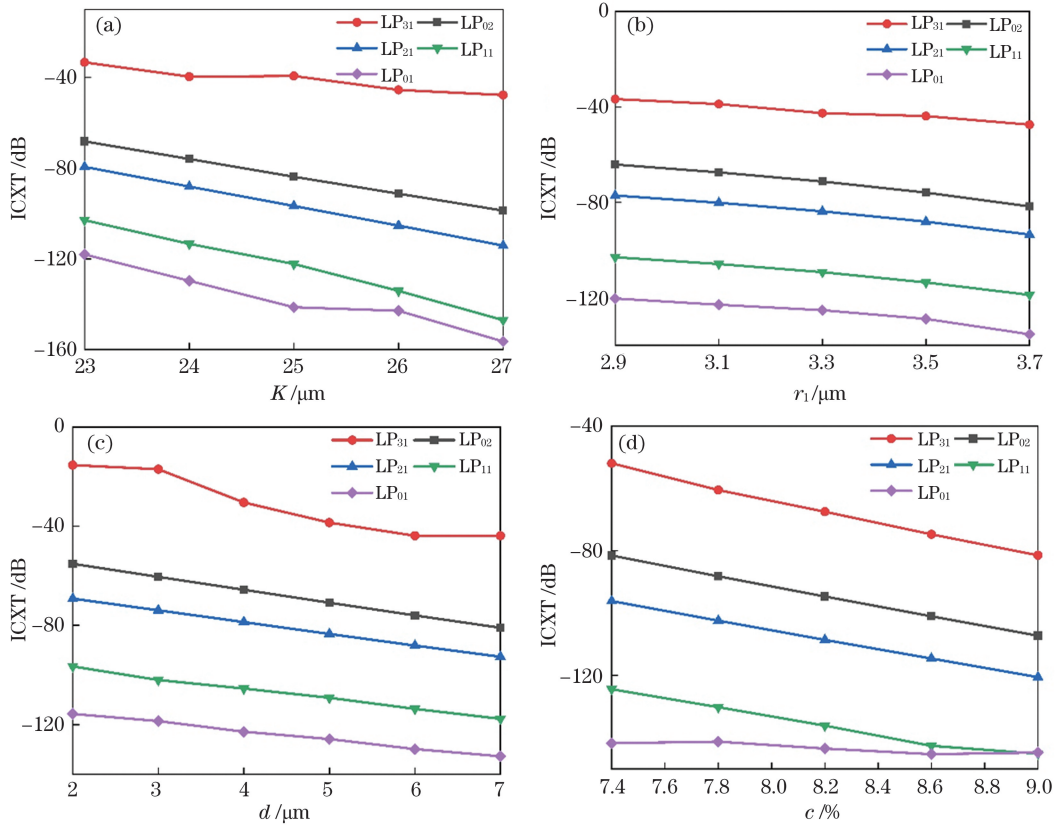


图 3 TCAH-MC-FM-MOF 的 ICXT 与结构参数的关系。(a)与  $K$  的关系；(b)与  $r_1$  的关系；(c)与  $d$  的关系；(d)与  $c$  的关系

Fig. 3 Relationship between ICXT and structural parameters of TCAH-MC-FM-MOF. (a) Relationship with  $K$ ; (b) relationship with  $r_1$ ; (c) relationship with  $d$ ; (d) relationship with  $c$

本实验组计算了在  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  时, 纤芯半径  $r_2$ 、沟槽内径  $a$ 、沟槽外径  $b$  及纤芯的掺杂摩尔分数  $c$  与  $A_{\text{eff}}$  之间的关系。从图 4(a) 中可以看出: 当  $r_2$  在  $6.8 \sim 7.5 \text{ }\mu\text{m}$  变化时, 所有模式的  $A_{\text{eff}}$  逐渐增大, 且  $\text{LP}_{02}$  模式的  $A_{\text{eff}}$  明显小于其他 4 个模式; 当  $r_2$  较小时, 光束被集中在较小的芯径区域, 模式的模场直径相对较小, 即  $A_{\text{eff}}$  较小; 当  $r_2$  增大时, 光束被约束在较大纤芯区域, 模场直径会随  $r_2$  的增大而增大, 因而模式的  $A_{\text{eff}}$  会随之增大。从图 4(b) 中可以看出, 当  $a$  在  $9 \sim 14 \text{ }\mu\text{m}$  变化时, 不同模式的  $A_{\text{eff}}$  与  $a$  呈正比关系, 均呈现增大趋势。从图 4(c) 中可以看出, 在一定范围内, 模式泄露的范围有限, 泄露的模式电磁场大小变化会引起有效模场面积的变化, 但在超出一定范围后, 改变沟槽外径  $b$  对模式电磁场大小的影响并不明显, 因此沟槽外径  $b$  的变化对有效模场面积的影响可以忽略。纤芯中掺入  $\text{GeO}_2$  可有效提升纤芯的有效折射率, 有利于束缚光束在纤芯中传播, 因此在保证 5-LP 模式传输的前提下, 选择合适的掺杂摩尔分数  $c$  可以获得更大  $A_{\text{eff}}$ 。从图 4(d) 中可以看出, 所有模式的  $A_{\text{eff}}$

均随着  $c$  的增大而减小, 原因是当  $c$  增大时, 泄露到包层的光束减少,  $A_{\text{eff}}$  随之减小。综上所述, 根据大模场面积的 TCAH-MC-FM-MOF 设计目标, 当  $r_2 = 7.2 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $a = 12 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $b = 18 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $c = 8\%$  时, 5 个模式的  $A_{\text{eff}}$  分别为  $113.14, 159.70, 174.43, 104.91, 192.74 \text{ }\mu\text{m}^2$ 。

DMGD 是 FMF 中有效折射率不同的模式在光纤中以不同的传播速度传输一段距离后形成的模式间的时延<sup>[30-31]</sup>。相较于小 DMGD 的 FMF, 具有大 DMGD 的 FMF 的模间串扰要低一些, 因此可以通过增大 DMGD 来降低模间串扰造成的信号失真。DMGD<sup>[32]</sup> 的计算公式为

$$\tau = \frac{1}{v_g} = \frac{1}{c'} \cdot \frac{d\beta}{dk_0} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c'} \cdot \frac{d\beta}{d\lambda}, \quad (14)$$

式中:  $v_g$  为群速度;  $c'$  为真空中的光速; 传播常数  $\beta = n_{\text{eff}} \cdot k_0$ ,  $n_{\text{eff}}$  为模式的有效折射率,  $k_0$  是自由空间中的光波波数。由于不同模式在光纤中传输相同距离所需的时间不同, 高阶模与基模之间的 DMGD 差 ( $\Delta\tau$ ) 的表达式为

$$\Delta\tau = \tau(\text{LP}_{m_i}) - \tau(\text{LP}_{01}). \quad (15)$$

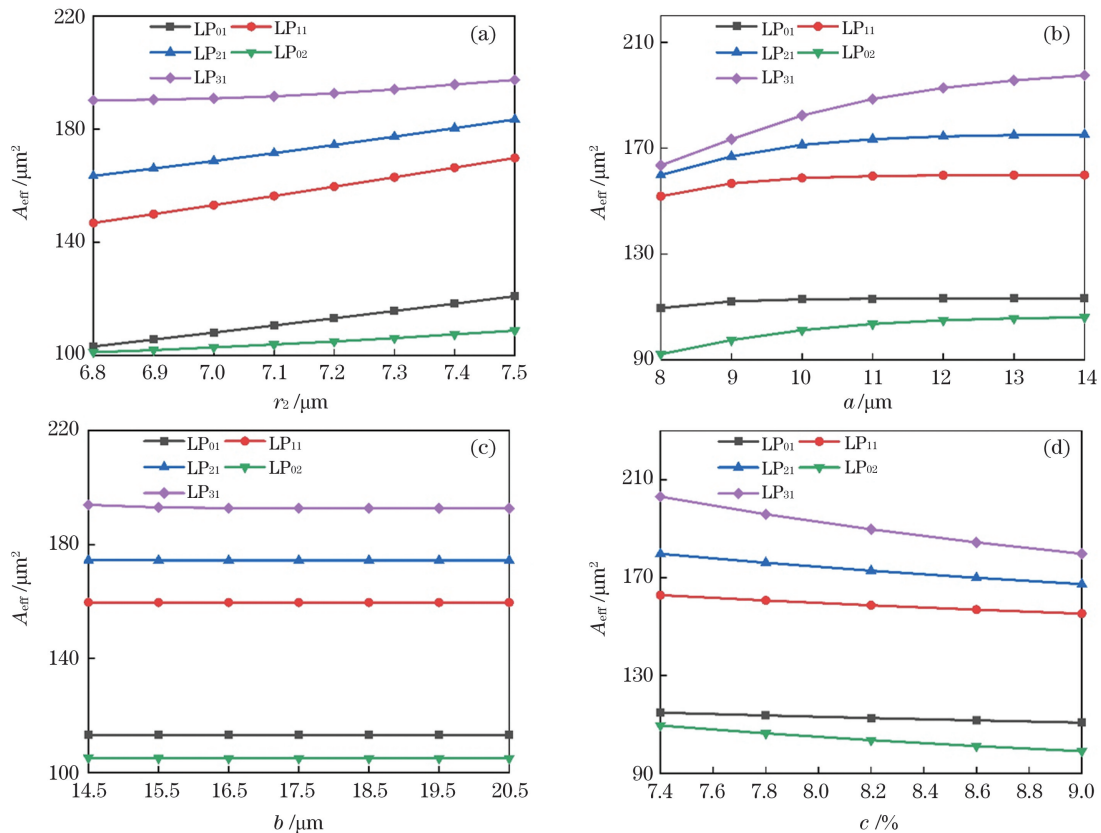


图 4 5-LP 模式  $A_{eff}$  与结构参数的关系。(a)与  $r_2$  的关系;(b)与  $a$  的关系;(c)与  $b$  的关系;(d)与  $c$  的关系  
Fig. 4 Relationship between  $A_{eff}$  of 5-LP modes and structural parameters. (a) Relationship with  $r_2$ ; (b) relationship with  $a$ ; (c) relationship with  $b$ ; (d) relationship with  $c$

图 5 为在 1310~1625 nm 内高阶模与基模之间的  $\Delta\tau$ 。由图可知,随着波长的增大,模间的  $\Delta\tau$  逐渐增大,且  $LP_{31}$  与  $LP_{01}$  之间的  $\Delta\tau$  最大。在 1550 nm 处,高阶模与基模之间的  $\Delta\tau$  分别为 5, 17, 10, 98, 11, 24, 15, 44 ps · m<sup>-1</sup>。

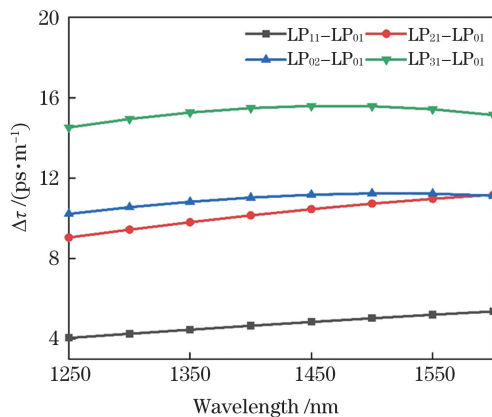


图 5 DMGD 随波长的变化曲线  
Fig. 5 DMGD versus wavelength

#### 4 光纤性能对比与制备

为验证所提 TCAH-MC-FM-MOF 的优势,对传统的阶跃型 FM-MCF、沟槽辅助型 FM-MCF

(TA-FM-MCF)、环形空气孔辅助的 FM-MCF(AT-FM-MCF)和所提 TCAH-MC-FM-MOF 进行了对比。图 6 为 4 种结构的光纤端面图。

图 7 为 4 种光纤结构在传输 100 km 的情况下,  $LP_{31}$  模式的 ICXT,其中  $L$  为传输距离。由图 7 可知,传统的无辅助阶跃型 FM-MCF 的 ICXT 最大,保持在 0 dB。在传统阶跃型 FM-MCF 的基础上,在纤芯周围添加沟槽或空气孔等结构,降低了包层折射率,有效降低了串扰。所提 TCAH-MC-FM-MOF 利用“十字形”空气孔辅助结构,将每个纤芯分割在独立的单元内,限制了模场的重叠,对 XT 抑制有明显的效果,其中  $LP_{31}$  模式串扰可达到 -40 dB。对比 TA-FM-MCF、AT-FM-MCF 和 TCAH-MC-FM-MOF 3 种结构的 ICXT,可表明 TCAH-MC-FM-MOF 结构对抑制串扰具有明显效果。综上所述,所提 TCAH-MC-FM-MOF 在保证芯间距相同的条件下,可实现更低的串扰,可满足未来大容量、宽带宽传输系统的要求。

根据参数分析的结果得到了一组合适的光纤结构参数,如表 2 所示。根据表 2 的结构参数计算了不同模式的有效折射率,如图 8 所示。在 1250~

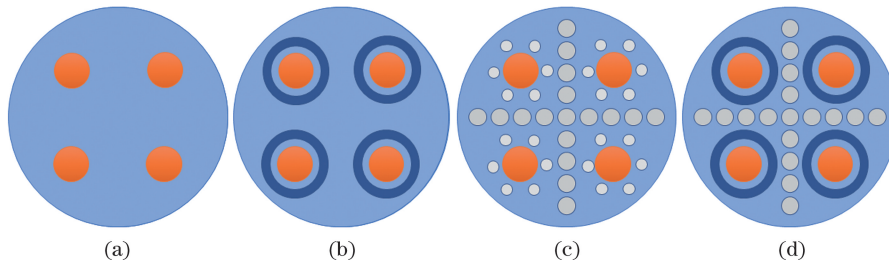


图 6 多种 FM-MCF 的截面图。(a)传统阶跃型 FM-MCF;(b)TA-FM-MCF;(c)AT-FM-MCF;(d)TCAH-MC-FM-MOF

Fig. 6 Cross section diagrams of various FM-MCF structures. (a) Traditional step-type FM-MCF; (b)TA-FM-MCF; (c)AT-FM-MCF; (d) TCAH-MC-FM-MOF

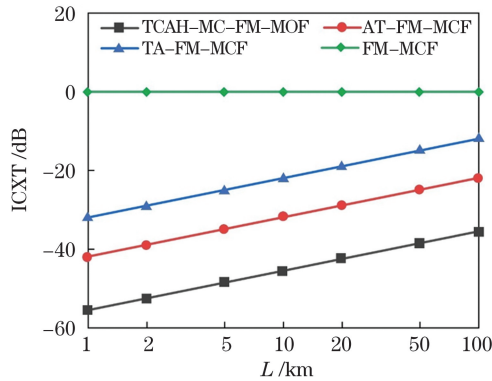


图 7 四种光纤结构 LP<sub>31</sub> 模式的 ICXT 对比

Fig. 7 ICXT comparison of LP<sub>31</sub> mode for four fiber structures

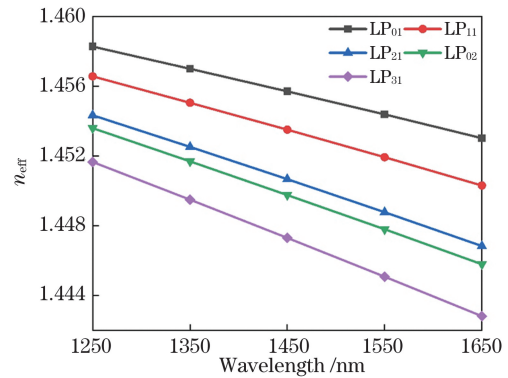


图 8 5-LP 模式的有效折射率

Fig. 8 Effective refractive index of 5-LP modes

表 2 TCAH-MC-FM-MOF 确定结构参数

Table 2 Determined structural parameters of TCAH-MC-FM-MOF

Parameter	$r_1/\mu\text{m}$	$r_2/\mu\text{m}$	$a/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	$K/\mu\text{m}$	$\Delta/\mu\text{m}$	$D/\mu\text{m}$	$c/\%$
Value	3.5	7.2	12	18	26	10	62.5	8

1650 nm 的波长范围内,5 个模式的有效折射率线性下降,且相邻模式之间有效折射率差( $\Delta n_{\text{eff}}$ )逐渐增大。图 9 给出了 COMSOL 软件仿真得到的 5-LP 模式模场图。

表 3 为 1550 nm 波长处计算出的 LP<sub>01</sub> 和高阶模的  $n_{\text{eff}}$ 。相邻两个模式的  $\Delta n_{\text{eff}}$  分别为  $2 \times 10^{-3}$ ,  $3 \times 10^{-3}$ ,  $1 \times 10^{-3}$ ,  $3 \times 10^{-3}$ , 相邻两模式间的  $\Delta n_{\text{eff}}$  大于  $1 \times 10^{-3}$ ,符合参考文献[24]中所提出的标准。因此所提 TCAH-MC-FM-MOF 满足弱耦合 MDM 的系统要求。

表 3 高阶模与 LP<sub>01</sub> 的有效折射率

Table 3 Effective refractive index of high order modes and LP<sub>01</sub>

Mode	$n_{\text{eff}}$
LP <sub>01</sub>	1.45438017361072
LP <sub>11</sub>	1.45192822989532
LP <sub>21</sub>	1.44877527047361
LP <sub>02</sub>	1.44779472625768
LP <sub>31</sub>	1.44507859480461

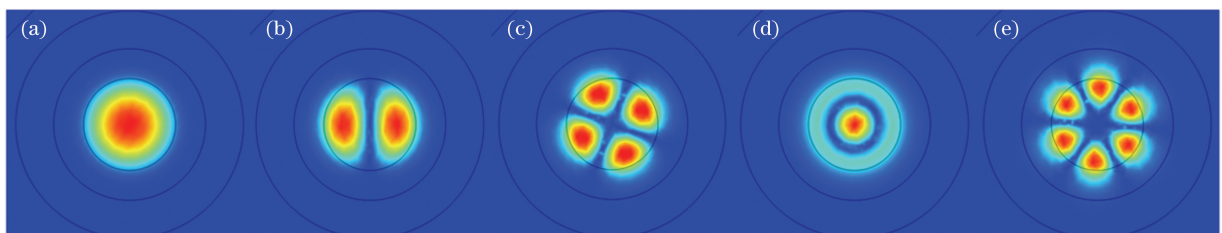


图 9 5-LP 模式模场图。(a)~(e)LP<sub>01</sub>、LP<sub>11</sub>、LP<sub>21</sub>、LP<sub>02</sub>、LP<sub>31</sub>

Fig. 9 Mode field maps of 5-LP mode. (a)~(e) LP<sub>01</sub>, LP<sub>11</sub>, LP<sub>21</sub>, LP<sub>02</sub>, LP<sub>31</sub>

在实际的应用中,光纤的铺设并非直线铺设,而是会有不同程度的弯曲。在这种情况下,必然要考虑弯曲半径对于光纤串扰的影响。图 10 为弯曲半径  $R_b$  与 ICXT 的关系曲线。由图 10 可知,随着弯曲半径的增大,ICXT 有所增大,但所有模式的变化均较小,约为 10 dB~20 dB。在弯曲条件下,ICXT 值仅变化 10 dB~20 dB,可认为该光纤对弯曲不敏感,具有良好的抗弯曲性能。

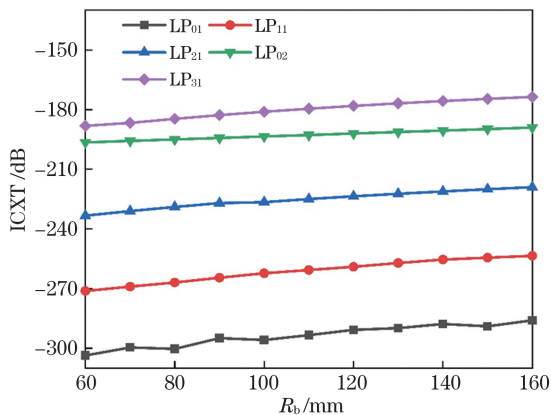


图 10 弯曲半径与 ICXT 的关系

Fig. 10 Relationship between  $R_b$  and ICXT

纤芯复用因子(CMF)是衡量 FM-MCF 的重要参数<sup>[25]</sup>。根据每个模式的  $A_{eff}$  估算纤芯复用因子,同质 MCF 的纤芯复用因子计算公式为

$$F_{CMF} = \frac{N_{core} \sum_i^j A_{eff}}{\pi(D_{cl}/2)^2}, \quad (16)$$

式中: $N_{core}$  为纤芯的数量; $i$  为每个纤芯的空间模数,所提光纤结构可支持 5 个 LP 模式,即  $i$  为 8; $j$  为常数; $D_{cl}$  为 MCF 的包层直径。

相对纤芯复用因子(RCMF)是 MCF 与  $A_{eff}$  为  $80 \mu\text{m}^2$  的单模光纤 CMF 的比值。RCMF 可表示为

$$F_{RCMF} = \frac{N_{core} \sum_i^j A_{eff}}{\pi(D_{cl}/2)^2} / \frac{80}{\pi(125/2)^2}. \quad (17)$$

所提 TCAH-MC-FM-MOF 的 CMF 和 RCMF 分别为 0.409 和 62.722,适用于大容量通信光纤应用。

TCAH-MC-FM-MOF 预制棒可以采用打孔法制备。制作沟槽辅助的纤芯部分时,可在掺锗的高折射率棒外套玻璃管作为内包层,在此基础上,叠加外套掺氟的玻璃管。在石英玻璃棒进行高精度打孔,打孔后将制备完成的沟槽辅助纤芯放入对应的孔,即制备出所提光纤预制棒,此后便可进行拉制。

## 5 结 论

设计了在 C 波段可稳定传输 5-LP 模式的 TCAH-MC-FM-MOF,利用 FEM 对光纤结构进行了仿真,分析了光纤结构参数对芯间串扰和有效模场面积的影响。在工作波长 1550 nm 处,传输 10 km 后,5-LP 模式的芯间串扰分别为  $-129.77$  dB,  $-113.46$  dB,  $-88.14$  dB,  $-75.96$  dB,  $-40.00$  dB,所有模式的串扰均低于  $-40$  dB;5-LP 模式的有效模场面积分别为  $113.14$ ,  $159.70$ ,  $174.43$ ,  $104.91$ ,  $192.74 \mu\text{m}^2$ ,所有模式的有效模场面积均超过  $100 \mu\text{m}^2$ ,有效抑制了非线性效应;高阶模式与 LP<sub>01</sub> 的  $\Delta\tau$  分别为  $5.17$ ,  $10.98$ ,  $11.24$ ,  $15.44 \text{ ps} \cdot \text{m}^{-1}$ ;高阶模与基模的有效折射率差均大于  $1 \times 10^{-3}$ ,满足忽略模间串扰的标准;相对纤芯复用因子为 62.722。该光纤结构满足低串扰、大模场面积等要求,结合 SDM 和 MDM 技术可满足未来大容量、多通道传输系统的需求。

## 参 考 文 献

- [1] Mukasa K, Imamura K, Tsuchida Y, et al. Multi-core fibers for large capacity SDM[C]//2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 6-10, 2011, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 12050335.
- [2] Li G F, Bai N, Zhao N B, et al. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication [J]. Advances in Optics and Photonics, 2014, 6(4): 413-487.
- [3] Sakaguchi J, Puttnam B J, Klaus W, et al. Large-scale space division multiplexed transmission through multi-core fiber [C] // Asia Communications and Photonics Conference 2012, November 7-10, 2012, Guangzhou, China. Washington, D. C.: OSA, 2012: AS2C.5.
- [4] Berdagu  S, Facq P. Mode division multiplexing in optical fibers [J]. Applied Optics, 1982, 21(11): 1950-1955.
- [5] Xie X Q, Tu J J, Zhou X, et al. Design and optimization of 32-core rod/trench assisted square-lattice structured single-mode multi-core fiber [J]. Optics Express, 2017, 25(5): 5119-5132.
- [6] 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.
- [7] Sillard P, Molin D. A review of few-mode fibers for



- space-division multiplexed transmissions [C] // 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013), September 22-26, 2013, London, UK. [S. l.: s. n.], 2013: 13841833.
- [8] Chanclou P, Kaczmarek C, Mouzer G, et al. Design and demonstration of a multicore single-mode fiber coupled lens device [J]. *Optics Communications*, 2004, 233(4/5/6): 333-339.
- [9] Jin W X, Ren G B, Pei L, et al. Dual-mode large-mode-area multi-core fiber with circularly arranged airhole cores [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(2): 2024210.  
靳文星, 任国斌, 裴丽, 等. 环绕空气孔结构的双模大模场面积多芯光纤的特性分析 [J]. *物理学报*, 2017, 66(2): 2024210.
- [10] Hayashi T. Multi-core fiber for high-capacity long-haul spatially-multiplexed transmission [J]. *Sei Technical Review*, 2013, 77: 14-22.
- [11] Sakamoto T, Matsui T, Saitoh K, et al. Low-loss and low-DMD 6-mode 19-core fiber with cladding diameter of less than 250  $\mu\text{m}$  [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(3): 443-449.
- [12] Sakamoto T, Saitoh K, Saitoh S, et al. Six-mode seven-core fiber for repeated dense space-division multiplexing transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(5): 1226-1232.
- [13] Kumar D, Ranjan R. Analysis of crosstalk performance and its reduction amount in single-mode homogeneous trench-assisted multicore fiber [C] // 2018 Conference on Information and Communication Technology (CICT), October 26-28, 2018, Jabalpur, India. New York: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [14] Liu C, Pei L, Xie Y H, et al. Design of low crosstalk few mode multi-core fiber based on heterogeneous structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1106004.  
刘畅, 裴丽, 解宇恒, 等. 异质结构的低串扰少模多芯光纤设计 [J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1106004.
- [15] Li Z H, Li S G, Li J S, et al. Double-trench assisted thirteen-core five-mode fibers with low crosstalk and low non-linearity [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(10): 20201825.  
李增辉, 李曙光, 李建设, 等. 一种具有低串扰低非线性双沟槽环绕型十三芯五模光纤 [J]. *物理学报*, 2021, 70(10): 20201825.
- [16] Xie Y H, Pei L, Zheng J J, et al. Low-DMD and low-crosstalk few-mode multi-core fiber with air-trench/holes assisted graded-index profile [J]. *Optics Communications*, 2020, 474: 126155.
- [17] Cheng T L, Zhang J W, Wang G R, et al. A novel dual-auxiliary multicore and minimal mode fiber with low crosstalk grooves embedded with air holes: CN112083525A [P]. 2020-12-15.  
程同蕾, 张继伟, 汪国瑞, 等. 一种低串扰沟槽内嵌空气孔双辅助型多芯少模光纤: CN112083525A [P]. 2020-12-15.
- [18] Li S G, Wang L Y, Li Z H, et al. Low crosstalk multi-core and few mode optical fiber with grooves and pores: CN112764154A [P]. 2021-05-07.  
李曙光, 王璐瑶, 李增辉, 等. 沟槽气孔叠加的低串扰多芯少模光纤: CN112764154A [P]. 2021-05-07.
- [19] Tu J J, Long K P, Saitoh K. An efficient core selection method for heterogeneous trench-assisted multi-core fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(7): 810-813.
- [20] Kong F, Saitoh K, Mcclane D, et al. Mode area scaling with all-solid photonic bandgap fibers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 26363-26372.
- [21] Cao Y, Shi W H, Xu G J, et al. Design of bend-resistant large-mode-area dual-mode photonic crystal fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 100602.  
曹原, 施伟华, 徐冠杰, 等. 抗弯曲大模场面积双模光子晶体光纤的设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 100602.
- [22] Jung Y, Kang Q Y, Zhou H Y, et al. Low-loss 25.3 km few-mode ring-core fiber for mode-division multiplexed transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(8): 1363-1368.
- [23] Zheng S W, Ren G B, Lin Z, et al. A novel four-air-hole multicore dual-mode large-mode-area fiber: Proposal and design [J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(5): 419-427.
- [24] Salsi M, Koebele C, Sperti D, et al. Mode-division multiplexing of  $2 \times 100$  Gb/s channels using an LCOS-based spatial modulator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 618-623.
- [25] 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.
- [26] Takenaga K, Arakawa Y, Tanigawa S, et al. An investigation on crosstalk in multi-core fibers by introducing random fluctuation along longitudinal direction [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2011, E94-B(2): 409-416.
- [27] 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.
- [28] Ji S Y, Gong J J, Zhu F. Calculation of mode field diameter and effective area of single-mode fiber [J].



- Modern Transmission, 2020(6): 34-37.
- 及少勇, 龚江疆, 朱丰. 单模光纤模场直径和有效面积的计算[J]. 现代传输, 2020(6): 34-37.
- [29] Lin Z, Zheng S W, Ren G B, et al. Characterization and comparison of 7-core and 19-core large-mode-area few-mode fibers[J]. Acta Physica 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比对分析[J]. 物理学报, 2013, 62(6): 064214.
- [30] Xu M N, Zhou G Y, Chen C, et al. of a novel four-mode micro-structured fiber with low-level crosstalk and high mode differential group delay [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(23): 234206.
- 徐闵喃, 周桂耀, 陈成, 等. 具有四模式的低串扰及大群时延多芯微结构光纤的设计[J]. 物理学报, 2015, 64(23): 234206.
- [31] Zhang W, Chen H M. Design and analysis of high MDGD micro-structured few-mode fiber [J]. Study on Optical Communications, 2017(4): 26-29.
- 张伟, 陈鹤鸣. 大 MDGD 微结构少模光纤的设计与性能分析[J]. 光通信研究, 2017(4): 26-29.
- [32] Liu D M, Sun J Q, Lu P. Optical fiber optics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2008: 73-93.
- 刘德明, 孙军强, 鲁平. 光纤光学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2008: 73-93.

## Theoretical Study of Four-Core Five-Mode Microstructured Optical Fiber with Low Crosstalk and Large Mode Field Area

Liang Yongze, Liang Enwang, Zhang Han, Wang Guorui, Zhang Jiwei,  
Yan Xin, Wang Fang, Zhang Xuenan, Cheng Tonglei\*

*State Key Laboratory of Process Industry Integrated Automation, College of Information Science and Engineering,  
Northeast University, Shenyang, Liaoning 110004, China*

### Abstract

**Objective** This paper proposes a novel trench and crosses airhole-assisted multicore few-mode microstructured optical fiber (TCAH-MC-FM-MOF) to meet the demand for space-division multiplexing system and mode-division multiplexing system for large-capacity, multichannel communication fibers, the structural parameters of which are optimized using the finite element method (FEM). After optimization, the designed fiber can support the stable transmission of  $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ ,  $LP_{02}$ , and  $LP_{31}$  modes at the operating wavelength of 1550 nm, and the effective mode fields are 113.14, 159.70, 174.43, 104.91 and 192.74  $\mu\text{m}^2$ , respectively. The intercore crosstalk of these five modes is less than -40 dB, and the relative core multiplexing factor is 62.722. Compared with its existing counterparts, this fiber has lower crosstalk and a larger mode effective field area. It is expected to meet the needs of large-capacity and multichannel transmission of the communication systems.

**Methods** This paper proposes TCAH-MC-FM-MOF as a good candidate for large-capacity, multichannel communication fibers. The cross-section and refractive index profile are shown in Fig. 1. The FEM optimizes the fiber structure to achieve the best performance based on the mode and power coupling theory. The intercore crosstalk formula of the four-core optical fiber is derived via theoretical analysis for a more accurate crosstalk calculation. The relationship between multiple structural parameters and fiber performance is exploited to achieve low intercore crosstalk and large field area. The initial fiber parameters are continuously optimized, and a set of satisfactory structural parameters is listed in Table 2. To demonstrate the advantages of TCAH-MC-FM-MOF designed in this paper, the performance of four types of multicore and few-mode fibers with different structures is compared by evaluating the intercore crosstalk  $LP_{31}$  at the transmission distance of 100 km at 1550 nm. The results demonstrate that TACH-FM-MCF-MOF has the lowest crosstalk value and the best performance, as shown in Fig. 7.

**Results and Discussions** Achieving low crosstalk and a large mode field area in multicore and the few-mode microstructured optical fiber is critical for improving transmission capacity and overcoming nonlinear effects. The core size, core spacing, and doping concentration are adjusted to achieve the best performance under the premise of ensuring 5-LP mode transmission. Low refractive index grooves are added around the core to prevent beam leakage, and the width of the grooves is optimized to prevent crosstalk between the cores, as shown in Fig. 3 (c). As shown

in Figs. 4 (a) and 4 (d), the core size and core doping concentration are appropriately selected to achieve a large mode field area. After optimizing the structural parameters, the simulation demonstrates that the designed TCAH-MC-FM-MOF has low crosstalk, a large mode area, and good bending resistance, with a relative core reuse factor of 62.722.

**Conclusions** TCAH-MC-FM-MOF proposed in this paper exhibits the characteristics of low crosstalk, large mode field area, and good bending resistance. When transmitting 10 km at 1550 nm, the designed TCAH-MC-FM-MOF has its intercore crosstalk of all modes suppressed less than 40 dB, and the effective mode field area greater than  $100 \mu\text{m}^2$ . The effective refractive index difference of all the 5-LP modes meets the weak coupling condition, the crosstalk between modes can be ignored, and the relative core reuse factor is 62.722. Compared with other kinds of multicore few-mode fiber structures also highlights TCAH-MC-FM-MOF's advantages in suppressing interphase crosstalk and alleviating the restrictive relationship between low crosstalk and large mode field area. Combined with SDM and MDM technology, the proposed TCAH-MC-FM-MOF is expected to meet the urgent demand for large-capacity, multichannel transmission systems.

**Key words** fiber optics; microstructured optical fiber; multicore fiber; few mode fiber; area of mode field; inter-core crosstalk

**OCIS codes** 060.4005; 060.2310; 060.2330