

## 低差分模时延 4-LP 少模光纤设计

代勇, 田凤\*, 王拥军, 顾宇

北京邮电大学电子工程学院, 信息光子学与光通信国家重点实验室, 天地互联与融合北京市重点实验室, 北京 100876

**摘要** 设计了一种基于密集空气孔辅助的低差分模时延 4-LP 少模光纤结构, 利用 COMSOL 软件仿真分析了不同结构参数对差分模时延的影响。仿真结果表明, 各个模式的差分模时延在 C+L 波段均小于 40 ps/km, 因此所提低差分模时延少模光纤结构能够改善系统性能, 降低接收端接收机的复杂度和功耗。

**关键词** 光纤光学; 空分复用; 密集空气孔; 少模光纤; 低差分模时延

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2106003

## Design of 4-LP Few-Mode Fiber with Low-Differential Mode Delay

Dai Yong, Tian Feng\*, Wang Yongjun, Gu Yu

Beijing Key Laboratory of Space-Round Interconnection and Convergence, State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communication, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

**Abstract** In this study, the structure of 4-LP few-mode fiber with low-differential mode delay is designed based on a dense air hole. The influence of different structural parameters on the differential mode delay is analyzed using the COMSOL software. The simulation results show that the differential mode delay of optical fiber is below 25 ps/km at a wavelength of C+L. Therefore, the proposed structure of few-mode fiber with low-differential mode delay can improve the system performance and reduce the complexity and power consumption of the receiver.

**Key words** fiber optics; space division multiplexing; dense air holes; few mode fiber; low differential mode delay

**OCIS codes** 060.2270; 060.2280; 060.2310; 060.2330

## 1 引言

1966 年, 高锟博士利用世界上第一条以石英玻璃为传输介质的单模光纤实现光信号传输<sup>[1]</sup>, 并预言利用光纤传输可以获得更快的传输速率和更高的传输带宽。在随后的几年里, 由于光纤的制作工艺发展, 光纤的损耗已经下降至 0.16 dB/km<sup>[2]</sup>。然而随着光网络传输的飞速发展, 人们对光纤传输容量的需求与日剧增, 传统单模光纤的容量逐渐逼近香农极限, 容量危机日益凸显。而空分复用(SDM)技术通过增加芯数和模式数两个维度可以大幅度提高光传输容量, 受到人们广泛关注。

近几年来, 研究者们提出了多种新型光纤结构用以改进光纤的性能, 如多沟槽辅助型低串扰、低损耗空心光纤, 偏振光纤等新类型的光纤<sup>[3-5]</sup>。本团队<sup>[6-7]</sup>在 2020 年 Asia Communications and Photonics (ACP)会议上报道了有关十九芯三模和七芯六模的低串扰多芯光纤设计, 主要采用多种辅助结构和异质双包层等进行了光纤的设计和新的排布方式, 包含了低折射率柱形辅助结构、双包层结构等。光通信技术的发展经历了光时分复用(OTDM)、光放大器的应用<sup>[8]</sup>, 光的波分复用(WDM)<sup>[9]</sup>、光的 SDM 等重要阶段, 使得光纤通信系统的通信容量达到了 Tbit/s 的级别。模分复用

收稿日期: 2021-03-26; 修回日期: 2021-04-23; 录用日期: 2021-05-27

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801001)、国家自然科学基金(62021005, 61875248, 61727817)

通信作者: \*tianfeng@bupt.edu.cn

技术就是在同一个核芯中传输多个模式,属于空分复用的一种。在理想的情况下,模式传播由于严格正交,模式之间不会发生能量耦合,但是在实际的应用中,光纤会发生随机的弯曲、扭转而使得不同模式之间的正交性被打破,进而导致不同模式发生耦合。由于同一个线性偏振模中的简并模传播常数比较相近,耦合很强,而不同模群之间的耦合相对来说比较弱。所以对于少模光纤来说,首先要解决的就是模式耦合的问题。解决此问题的方法通常分为两种。第一种,就是直接制作一个弱耦合少模光纤,根据相关研究结果<sup>[10]</sup>,当两个相邻模式之间的有效折射率差大于一定值时,两个模式就可以在接收端避免使用多输入多输出(MIMO)技术的前提下区分开<sup>[11]</sup>,进而降低接收端的复杂度。但是这种弱耦合少模光纤只适合短距离传输。第二种,就是设计出一种低差分模时延(DMD)少模光纤,在这种光纤中,模式之间的差分模时延可以尽可能减小,在接收端就可以使用 MIMO-数字信号处理单元(DSP)技术对复用的信号进行解码恢复。差分模时延越小,接收机的复杂度就越低,非常适合长距离传输。

对于低 DMD 少模光纤,常见的就是利用渐变型光纤折射率并增加沟槽结构来减小模式群时延。2015 年, Tu 等<sup>[12]</sup>实现了阶梯型折射率分布的 12 芯光纤(TA-MSI-FMC),使得差分模时延在 C+L 波段均小于 170 ps/km,核芯间串扰在 -30 dB@100 km 以下。2015 年, Jensen 等<sup>[13]</sup>设计了一种低 DMD 的少模光纤,核芯采用指数型渐变折射率分布并具有沟槽辅助的结构,一共可以容纳 15 个空间模式, DMD 小于 0.8 ps/km。2016 年, Sillard 等<sup>[14]</sup>报道了一种抗微弯曲的 6-LP 少模光纤,这种光纤的核芯仍然采用沟槽辅助的渐变型折射率分布,群时延为 72 ps/km。

本文提出了一种以密集空气孔辅助的 4-LP 少模光纤结构,设计了在核芯周围均匀排布三个密集空气孔的结构,密集空气孔群以大小两种不同的孔径密集排列组成。在此基础上,利用基于有限元法的 COMSOL 软件进行仿真分析,设计并优化了少模光纤结构的参数。

## 2 密集空气孔辅助的 4-LP 少模光纤设计

在分析光纤模式的传输过程时,由于光纤中各个模式在传输方式上略有差异,各自的相位常数不同,在特定的频率下传输相同的距离后会产生一定

的时延,并且这种现象会随着距离的增加逐渐严重,即随着传输距离的延长,光纤色散严重,脉冲展宽。一般情况下, DMD 总是以基模 LP<sub>01</sub> 为基准计算差值的,其中 LP<sub>uv</sub> 模式的群时延表示为

$$\tau_{uv} = \left. \frac{\partial \beta_{uv}}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{-\eta_g^{LP_{uv}}(\lambda)}{c}, \quad (1)$$

式中:  $\eta_g^{LP_{uv}}$  为群折射率;  $\beta_{uv}$  为传播常数。可以利用有限元法对研究区域进行划分,把连续问题离散化,单位处理之后再叠加,求解变微分方程转换为求解线性方程组,用 COMSOL 软件进行仿真计算,计算出有效折射率之后,将有效折射率代入到

$$\eta_g^{LP_{uv}} = \eta^{LP_{uv}} - \lambda \cdot [d\eta^{LP_{uv}}/d\lambda], \quad (2)$$

就可以得到群折射率,进一步求得 DMD。LP<sub>uv</sub> 的 DMD 即是与基模的模式群时延之差:

$$\tau_{DMD, LP_{uv}} = [\eta_g^{LP_{uv}}(\lambda) - \eta_g^{LP_{01}}(\lambda)]/c. \quad (3)$$

目前低 DMD 的少模光纤在光纤性能上虽然良好,但是所支持的模式数目较少,该方案能够在实现长距离模分复用通信传输的基础上实现 4-LP 少模传输,可以支持复用十二路信号。渐变折射率纤芯结构分布如图 1 所示,由于不同模式在光纤中传输路径不同,不同模式之间产生时延差。对于渐变折射率光纤,不同模式的光路虽然路径不同,但是路径越长的光路速率也就越快,这样就尽可能缩小了不同模式之间的时延差,(1)式所示为渐变型折射率分布表达式,图 1 中  $n_{core}$  代表核芯的折射率,  $n_{cl}$  代表包层折射率,  $r$  代表光纤横截面横坐标,  $\alpha$  代表渐变型指数因子,值为 2。

$$n(r) = \begin{cases} n_{core} \left[ 1 - 2\Delta \left( \frac{|r|}{a_{co}} \right)^\alpha \right]^{0.5}, & 0 \leq r < a_{co} \\ n_{cl}, & a_{co} \leq r \end{cases}, \quad (4)$$

$$\Delta = \frac{n_{core}^2 - n_{cl}^2}{2n_{core}^2}, \quad (5)$$

式中:  $a_{co}$  为纤芯半径。确定了纤芯结构参数之后,

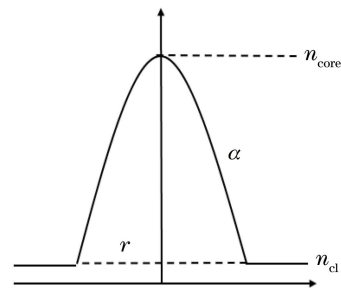


图 1 具有渐变折射率的光纤剖面图

Fig. 1 Profile of fiber with graded refractive index

进一步引入密集空气孔结构低折射率辅助结构。一般情况下,空气孔结构和孔形结构相似,但是空气孔结构的折射率更低。为了使空气孔群增加灵活性,总共设置了三个密集空气孔群,并且相互独立,如图 2(a)所示。三个空气孔密集结构均匀地分布在核芯的外围( $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ )。密集空气孔群由大小不同的两种空气孔密集排列组成,为了方便之后的仿真,把

每一个空气集群结构等效为一个低折射率槽型结构,即空气槽,可以将光纤的结构等效为如图 2(b)所示的结构。空气集群到核芯的距离为  $d_e$ ,空气集群的宽度为  $w_i$ ,核芯的半径为  $R$ 。为了保证光纤中传输 4-LP 模式,归一化频率范围规定在  $5.7 < v < 7.8$ ;规定少模光纤的归一化常数  $v = 7.01$ ,同时渐变型折射率核芯的渐变指数  $\alpha = 2$ ,以减小制作工艺的复杂度。

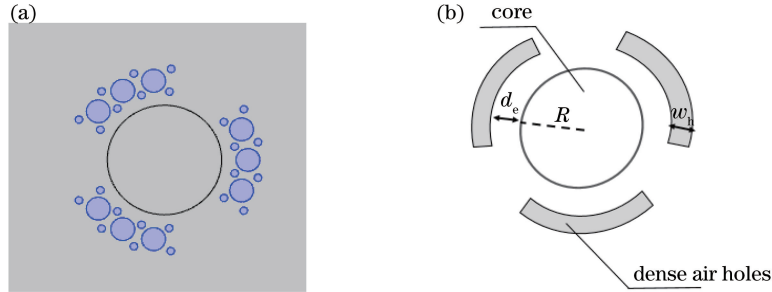


图 2 4-LP 少模光纤结构图。(a)密集空气孔辅助的 4-LP 少模光纤结构图;(b)空气槽结构示意图  
Fig. 2 Structure diagram of 4-LP few mode fiber. (a) Structure of 4-LP few mode fiber with dense air hole;  
(b) diagram of dense air holes

为了对比并确定密集空气孔的结构参数,利用有限元法(FEM)进行仿真分析。方案中的参数设定,光纤包层半径  $a_{cl}$  为  $125 \mu\text{m}$ ,核芯半径  $R$  设定为

$10.5 \mu\text{m}$ 。三个密集结构分别以固定角度分布在核芯周围,密集结构距离核芯  $d_e = 3 \mu\text{m}$ ,核芯折射率差为  $0.65\%$ ,得到如图 3 所示的 4 种线性偏振模式。



图 3 密集空气孔辅助的 4-LP 少模光纤模式图  
Fig. 3 Mode diagram of 4-LP few mode fiber assisted by dense air holes

### 3 少模光纤的性能优化

在其他结构参数都相同的情况下,对比不加空气孔集群结构的 DMD 效果。图 4 表示不加任何辅助结构的结果图,可以看出主要存在三个模式群,它们的 DMD 均为负值并且逐渐远离零点。DMD 在整个 C+L 波段都很大,高阶模式的 DMD 则更加严重,图 4 中 DMD 绝对值的最大值分别达  $1538, 986, 162.7 \text{ ps/km}$ ,这种情况下如果直接应用在模分复用系统中的话,会产生很大影响,因此需要进一步降低 DMD,以提高传输性能。

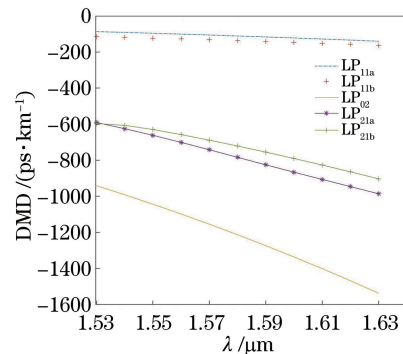


图 4 波长和 DMD 的关系(无密集空气孔辅助结构)  
Fig. 4 Relationship between wavelength and DMD without dense air holes

图 5 显示了增加三个密集空气孔结构辅助之后,经过仿真,DMD 的绝对值明显减小,在波长为  $1.58 \mu\text{m}$  处每个模式都小于  $50 \text{ ps/km}$ ,对比可以发现,空气孔辅助结构对 LP<sub>11</sub> 模式的 DMD 影响较小,但对于 LP<sub>02</sub> 和 LP<sub>21</sub> 高阶模式来说 DMD 随波

长变大改变较大。

然后,为确定合适的密集空气孔结构及其参数,固定密集空气孔到核芯的距离  $d_e = 3 \mu\text{m}$ , $d_{\text{micr}}$  表示扫描密集空气孔中的小孔半径,取值范围为  $0.5 \sim$

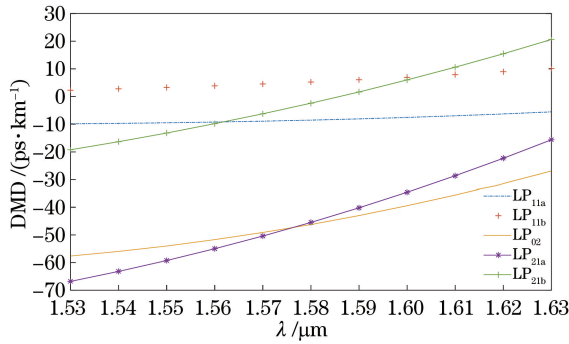


图 5 波长和 DMD 的关系(含密集空气孔辅助结构)  
Fig. 5 Relationship between wavelength and DMD with dense air holes

2.3 μm, 如图 6 所示。

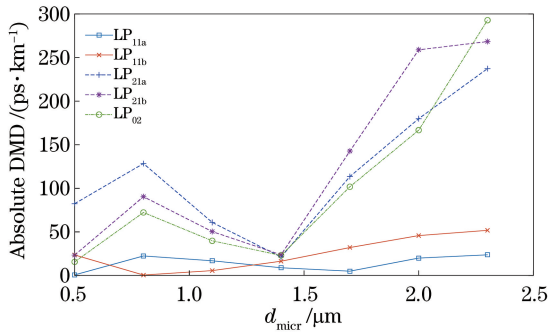


图 6 密集空气孔半径对 DMD 的影响  
Fig. 6 Effect of radius of dense air hole on DMD

根据不同的模式, 得出了如图 6 所示的变化, 波长取 1.58 μm, 因为它处在 1.53 μm 和 1.63 μm 之间, 中位数更加具有代表性。从图 6 可以看出: 随着小空气孔半径的增大, LP<sub>11</sub> 中的两个简并模的 DMD 在整个 C+L 波段都处在一个较小的值, 并且 LP<sub>21</sub> 和 LP<sub>02</sub> 两个模式会在  $d_{\text{micr}} = 1.4 \mu\text{m}$  时同时达到最低值, 达到了 30 ps/km 以下; 之后, 随着小孔直径的增大, 所有模式的 DMD 绝对值在逐渐增大, 尤其对于高阶模式来说, 增大较为明显。两种空气孔紧密排列, 只有在一定大小的情况下效果才会达到最佳, 可以理解为在这种情况下, 空气孔排列更为紧密。在仿真中发现, 模式的有效面积  $A_{\text{eff}}$  并没有发生显著变化, 可以根据 DMD 绝对值的大小来确定一个最佳的密集空气孔的大小, 所以设定密集空气孔小孔半径为 1.4 μm。

确定了密集空气孔的大小之后, 进一步仿真密集空气孔的位置对 DMD 的影响。首先规定密集空气孔与核芯的距离  $d_e$  为 2 μm, 在此基础上, 把范围调整到 1.9~2.35 μm 进行扫描, 得出的两者关系曲线如图 7 所示, 各模式的 DMD 首先会在  $d_e = 2 \mu\text{m}$  左右降低至最小值, 之后再逐渐增加。当密集

空气孔与核芯的距离变大时, 效果也会慢慢变差。同一个模群之间即偏振态之间的 DMD 很相近, 不同模群之间的 DMD 差别很大。LP<sub>11</sub> 模式的两个简并模式 DMD 相比其他偏振模式较小。所以推测对于每一个确定的密集空气孔群的规格, 都对一个最佳的  $d_e$ , 在此位置上, 可以达到最优解。

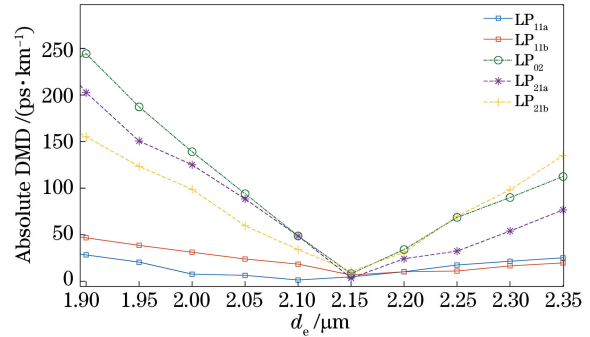


图 7  $d_e$  对 DMD 的影响  
Fig. 7 Effect of  $d_e$  on DMD

因此得到了空气孔群尺寸的最佳位置, 当  $d_{\text{micr}} = 1.4 \mu\text{m}, d_e = 2.15 \mu\text{m}$  时, 所有模式的差分模时延最小, 在此结构下, 扫描整个 C+L 波段, 发现所有模式的差分模时延均在 40 ps/km 以下, 如图 8 所示。在波长为 1.58 μm 处时, DMD 绝对值均在 15 ps/km 以下。为了充分了解光纤的性能, 在此基础上进一步探讨波长( $\lambda$ )为 1.58 μm 处时的色散、弯曲损耗和有效面积等其他光学特性, 得到优化后的光纤参数如表 1 所示, 上述参数都在合理的范围内, 其中弯曲损耗的弯曲半径为 30 mm。

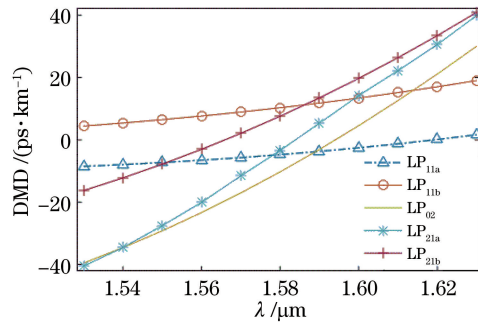


图 8 DMD 和波长的关系  
Fig. 8 Relationship between DMD and wavelength

最后关于少模光纤制作工艺的问题, 首先折射率方面, 通常通过掺杂不同的元素来达到合适的折射率, 在仿真中用到的二氧化硅的有效折射率为 1.444, 其中的核芯层为二氧化硅掺锗, 有效折射率达到了 1.478。关于拉制部分, 根据实际的制作经验, 叠画工艺(堆叠制作)是制作这种密集空气孔的方法之一, 可以使用玻璃棒和毛细玻璃管进行熔融

拉丝;另一种方式就是采用 3D 打印技术<sup>[15]</sup>,打印出二氧化硅模具和结构化毛细管的堆叠,制作预成型组件,实现精确制造。

表 1  $\lambda = 1.58 \mu\text{m}, d_e = 2.15 \mu\text{m},$

$d_{\text{micr}} = 1.4 \mu\text{m}$  时的光纤特性

Table 1 Optical fiber characteristics at  $\lambda = 1.58 \mu\text{m},$

$d_e = 2.15 \mu\text{m}, d_{\text{micr}} = 1.4 \mu\text{m}$

Parameter	Unit	Value
LP <sub>01</sub> mode field area	$\mu\text{m}^2$	111.07
LP <sub>11</sub> mode field area	$\mu\text{m}^2$	222.31
LP <sub>21</sub> mode field area	$\mu\text{m}^2$	297.18
LP <sub>02</sub> mode field area	$\mu\text{m}^2$	251.56
DMD of LP <sub>01</sub>	$\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}$	
DMD of LP <sub>11a</sub>	$\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}$	-4.457
DMD of LP <sub>11b</sub>	$\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}$	10.3
DMD of LP <sub>21a</sub>	$\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}$	7.57
DMD of LP <sub>21b</sub>	$\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}$	3.422
DMD of LP <sub>02</sub>	$\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}$	-10.29
Dispersion of LP <sub>01</sub>	$\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}$	21.3
Dispersion of LP <sub>11</sub>	$\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}$	23.07
Dispersion of LP <sub>21</sub>	$\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}$	25.23
Dispersion of LP <sub>02</sub>	$\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}$	25.91
Bending loss of LP <sub>02</sub>	dB/100 turns	$2.2 \times 10^{-3}$

(bending radius  $R_b = 30 \text{ mm}$ )

## 4 结 论

提出了一种低差分模时延少模光纤的设计方案,其在纤芯周围均匀排布三个密集空气孔结构,并且密集空气孔群由大小两种不同的孔径结构密集排列组成。仿真结果显示,该方案使光纤不同模式的差分模时延在整个 C+L 波段均低于 40 ps/km,在波长 1.58  $\mu\text{m}$  处时均小于 15 ps/km,能够支持十二路信号传输,降低了接收端信号处理的复杂度。

## 参 考 文 献

- [1] Kao K C, Hockham G A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1966, 113 (7): 1151-1158.
- [2] Li T Y. Lightwave telecommunication[J]. Physics Today, 1985, 38(5): 24-31.
- [3] Zhang J Q, Zhang M, Yin J D, et al. Design of low loss hollow-core anti-resonance fiber for 3  $\mu\text{m}$  spectral region[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1723001.
- 张家强, 张敏, 尹金德, 等. 3  $\mu\text{m}$  波段低损耗抗弯曲反谐振空芯光纤设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1723001.

- [4] 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.
- [5] Zhu F X, Chen H, Yin J D, et al. Radially polarized field fiber based on circularly symmetric radial birefringence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0101005.
- 朱方祥, 陈浩, 尹金德, 等. 基于圆对称径向双折射的径向偏振场光纤[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0101005.
- [6] Dai Y, Wang Y J, Tian F, et al. Design and optimization of heterogeneous few-mode multi-core fiber with graded-index profile and trench/rod assisted [C] // 2020 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC), October 24-27, 2020, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2020.
- [7] Zang H F, Tian F, Xin X J, et al. High spatial density 7-core 6-LP fiber for weakly-coupled mode-division-multiplexed transmission [C] // Asia Communications and Photonics Conference 2020, October 24-27, 2020, Beijing, China. Washington, D.C.: OSA, 2020: M4A.102.
- [8] Li T. The impact of optical amplifiers on long-distance lightwave telecommunications [J]. Proceedings of the IEEE, 1993, 81(11): 1568-1579.
- [9] Brackett C A. Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1990, 8(6): 948-964.
- [10] Riesen N, Love J D, Arkwright J W. Few-mode elliptical-core fiber data transmission [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(5): 344-346.
- [11] Arik S O, Kahn J M, Ho K P. MIMO signal processing for mode-division multiplexing: an overview of channel models and signal processing architectures[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(2): 25-34.
- [12] Tu J J, Saitoh K, Amma Y, et al. Design method of heterogeneous trench-assisted graded-index few-mode multi-core fiber with low differential mode delay[C] // 2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), June 28-July 2, 2015, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2015.
- [13] Jensen R V, Grüner-Nielsen L, Wong N H L, et al. Demonstration of a 9 LP-mode transmission fiber

- with low DMD and loss [C] // Optical Fiber Communication Conference, March 22-26, 2015, Los Angeles, California. Washington, D. C. : OSA, 2015: W2A.34.
- [14] Sillard P, Molin D, Bigot-Astruc M, et al. Micro-bend-resistant low-DMGD 6-LP-mode fiber [C] // Optical Fiber Communication Conference, March 20-22, 2016, Anaheim, California. Washington, D.C. : OSA, 2016: Th1J.5.
- [15] Xie Y H, Pei L, Zheng J J, et al. Impact analysis of a dense hole-assisted structure on crosstalk and bending loss in homogeneous few-mode multi-core fibers[J]. Optics Express, 2020, 28 (16): 23806-23819.