

## 面向模分复用的沟槽-纳米孔辅助双包层弱耦合少模光纤

雷晓<sup>1</sup>, 任芳<sup>1,2\*</sup>, 张艺赢<sup>1</sup>, 张金玉<sup>1</sup>, 牛晶晶<sup>1</sup>, 张燕飞<sup>1</sup>, 崔馥洁<sup>1</sup><sup>1</sup>北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083;<sup>2</sup>北京市融合网络与泛在业务工程技术研究中心, 北京 100083

**摘要** 为了降低相邻线偏振(LP)模式耦合导致的串扰,提出了一种沟槽和纳米孔辅助的双包层弱耦合少模光纤。首先,利用有限元方法分析了光纤参数对相邻 LP 模式间最小有效折射率差( $\Delta n_{\text{eff}}$ )的影响。然后,对光纤进行优化,使光纤支持 14 个 LP 模式并满足弱耦合条件。最后,分析了光纤的弯曲损耗、有效模场面积、差分模式群时延。仿真结果表明,在纤芯中心位置添加半径为 253 nm 的纳米孔,可使 C+L 波段上所有 LP 模式间的最小  $\Delta n_{\text{eff}}$  大于  $6 \times 10^{-4}$ ;添加的沟槽辅助结构能使弯曲损耗从  $10^{-3}$  dB/m 降低到  $10^{-5}$  dB/m,具有较好的抗弯曲性能。该光纤具有良好的传输性能,在短距离大容量模分复用系统中具有较大的应用潜力。

**关键词** 光纤光学; 光纤通信; 少模光纤; 模式耦合; 纳米孔辅助

中图分类号 TN252

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2306003

## Trench-Nanopore Assisted Double-Clad Weakly Coupled Few-Mode Fiber for Mode Division Multiplexing

Lei Xiao<sup>1</sup>, Ren Fang<sup>1,2\*</sup>, Zhang Yiyi<sup>1</sup>, Zhang Jinyu<sup>1</sup>, Niu Jingjing<sup>1</sup>,  
Zhang Yanfei<sup>1</sup>, Cui Fujie<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Computer & Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing,  
Beijing 100083, China;

<sup>2</sup> Beijing Engineering and Technology Research Center for Convergence Networks and Ubiquitous Services,  
Beijing 100083, China

**Abstract** We proposed a trench-nanopore assisted double-clad weakly coupled few-mode fiber to alleviate the crosstalk caused by the coupling of adjacent linearly polarized (LP) modes. First, the finite element method was employed to analyze the effects of the fiber parameters on the minimum effective refractive index difference ( $\Delta n_{\text{eff}}$ ) between adjacent LP modes. Then, the fiber was optimized to support 14 LP modes and satisfy the weak coupling conditions. Finally, we analyzed the bending loss, effective mode field area, and differential mode group delay of the optical fiber. Simulation results show that a minimum  $\Delta n_{\text{eff}}$  of larger than  $6 \times 10^{-4}$  among all LP modes over the C+L band can be achieved by introducing a nanopore with a 253 nm radius in the center of the fiber core. Meanwhile, the trench assistance structure added reduces the bending loss from  $10^{-3}$  dB/m to  $10^{-5}$  dB/m, thereby providing the fiber with favorable bending resistance. The fiber, with good transmission performance, has great application potential in short-distance large-capacity mode division multiplexing systems.

**Key words** fiber optics; optical fiber communication; few-mode fiber; mode coupling; nanopore-assisted

**OCIS codes** 060.2310; 060.2280; 060.2410

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-05-29; 录用日期: 2021-06-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-BD-20-11A)

通信作者: \*renfang@ustb.edu.cn

# 1 引言

随着物联网、大数据、人工智能等新兴技术的涌现,光纤通信系统的容量需求与日剧增<sup>[1]</sup>。波分复用、频分复用等技术的发展与应用,使传统以单模光纤(SMF)为介质的通信系统传输容量不断提升,并逐渐接近 Shannon 极限<sup>[2]</sup>。为了解决单模光纤容量接近理论极限的问题,基于少模或多芯光纤的空分复用(SDM)技术得到了人们的广泛研究<sup>[3-4]</sup>。少模光纤(FMF)主要通过增加纤芯中的传输模式数量提高通信容量,多芯光纤(MCF)则通过增大包层中的纤芯数量提高通信容量<sup>[5]</sup>。通常情况下,FMF 的结构比较简单、易于集成<sup>[6]</sup>,且相比 MCF 不存在芯间串扰的问题,但 FMF 模组间存在一定的模式串扰。解决模式间串扰的方法主要有两种,第一种方法是用多输入多输出(MIMO)数字信号处理技术减轻传输中的随机模式耦合,但同时也会增加短距离通信系统的复杂度和功耗<sup>[7-8]</sup>。第二种方法是根据模式耦合理论及功率耦合理论增大相邻模式间的有效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}$ ,即模式耦合系数和  $\Delta n_{\text{eff}}$  成反比,模式耦合系数随  $\Delta n_{\text{eff}}$  的增大而减小<sup>[9]</sup>。

为了分离相邻模式,降低模式间串扰,人们提出了许多新型光纤结构。如 Jiang 等<sup>[10]</sup>提出的低折射率环辅助 4 模光纤的最小  $\Delta n_{\text{eff}}$  为  $1.8 \times 10^{-3}$ ; Xie 等<sup>[11]</sup>提出了纳米孔辅助 6-LP 的 FMF,其 6 个模式的最小  $\Delta n_{\text{eff}}$  为  $1.8 \times 10^{-3}$ ; Chen 等<sup>[12]</sup>提出了一种

插入交叉排列的不同折射率侧孔辅助 FMF,将 10 个模式的最小  $\Delta n_{\text{eff}}$  从  $1.1 \times 10^{-5}$  提高到  $1.31 \times 10^{-4}$ 。研究表明,模式间的串扰随模式数的增加而增大,添加环形及空气孔辅助都可以改善模式耦合问题<sup>[13-15]</sup>。相比环形辅助等结构,在纤芯中增加纳米级气孔,可在对原有结构施加微小改变的条件有效改善模式耦合问题,并降低光纤的传输损耗。

本文提出了一种支持 14 个 LP 模式的沟槽和纳米孔辅助双包层 FMF。通过有限元方法(FEM)进行数值模拟,在阶跃折射率光纤中心位置添加半径为 253 nm 的纳米孔,使 C+L 波段 14 个 LP 模式的最小  $\Delta n_{\text{eff}}$  大于  $6 \times 10^{-4}$ ,从而降低模式耦合。同时研究了弯曲损耗及有效面积对光纤参数的依赖关系,结果表明,该 FMF 具有较小的弯曲损耗及较大的有效面积,在短距离大容量 MIMO 的 SDM 系统中具有广阔的应用前景。

# 2 光纤设计

传统沟槽辅助阶跃折射率光纤的横截面及折射率分布分别如图 1(a)和图 1(b)所示。其中,  $r_1$  为纤芯半径,  $W$  为沟槽的宽度,  $D$  为沟槽和纤芯的距离,  $\Delta = (n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cladding}}^2) / 2n_{\text{core}}^2$  为纤芯和包层的相对折射率差,  $\Delta_1$  为沟槽和包层的相对折射率差,  $n_{\text{core}}$  为纤芯的折射率,  $n_{\text{cladding}}$  为包层(材料为  $\text{SiO}_2$ )的折射率,可表示为<sup>[15]</sup>

$$n_{\text{cladding}} = \sqrt{\frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2} + 1}, \quad (1)$$

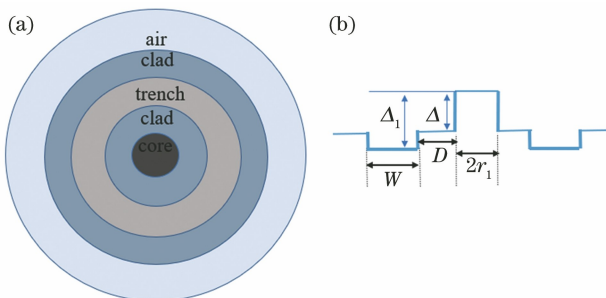


图 1 阶跃折射率光纤的结构。(a)横截面;  
(b)横截面的折射率分布

Fig. 1 Schematic of the step-index fiber structure.  
(a) Cross section; (b) refractive index distribution of cross section

式中,  $\lambda$  为波长,计算得到 1550 nm 波长下的包层折

射率为 1.444。

一般情况下,光纤模式的数量随纤芯半径的增大而增加,未添加纳米孔的光纤结构有效折射率  $n_{\text{eff}}$  和纤芯半径  $r_1$  的关系如图 2 所示。可以发现,  $\text{LP}_{21}$  和  $\text{LP}_{02}$  模式的有效折射率差较小,  $\text{LP}_{51}$  和  $\text{LP}_{03}$  模式的有效折射率差几乎为 0,存在严重的模式耦合问题。

理论上可通过调整 LP 模式最大功率区域的位置控制 LP 模式的  $n_{\text{eff}}$ <sup>[16]</sup>。为了降低模式耦合,仿真了传统阶跃型折射率 FMF 中 14 个模式的功率分布,结果如图 3 所示。可以发现,  $\text{LP}_{01}$ 、 $\text{LP}_{02}$  及  $\text{LP}_{03}$  模式的功率区域在纤芯的中心位置,其他模式的功率区域则在纤芯的中间区域,这表明改变

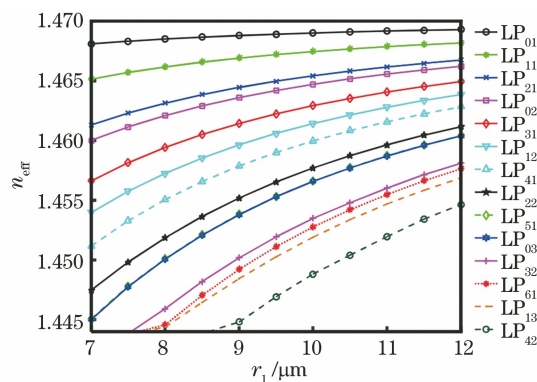


图 2  $\lambda=1550\text{ nm}$  时  $n_{\text{eff}}$  随纤芯半径  $r_1$  的变化

Fig. 2 Variation of the  $n_{\text{eff}}$  with  $r_1$  at the  $\lambda=1550\text{ nm}$

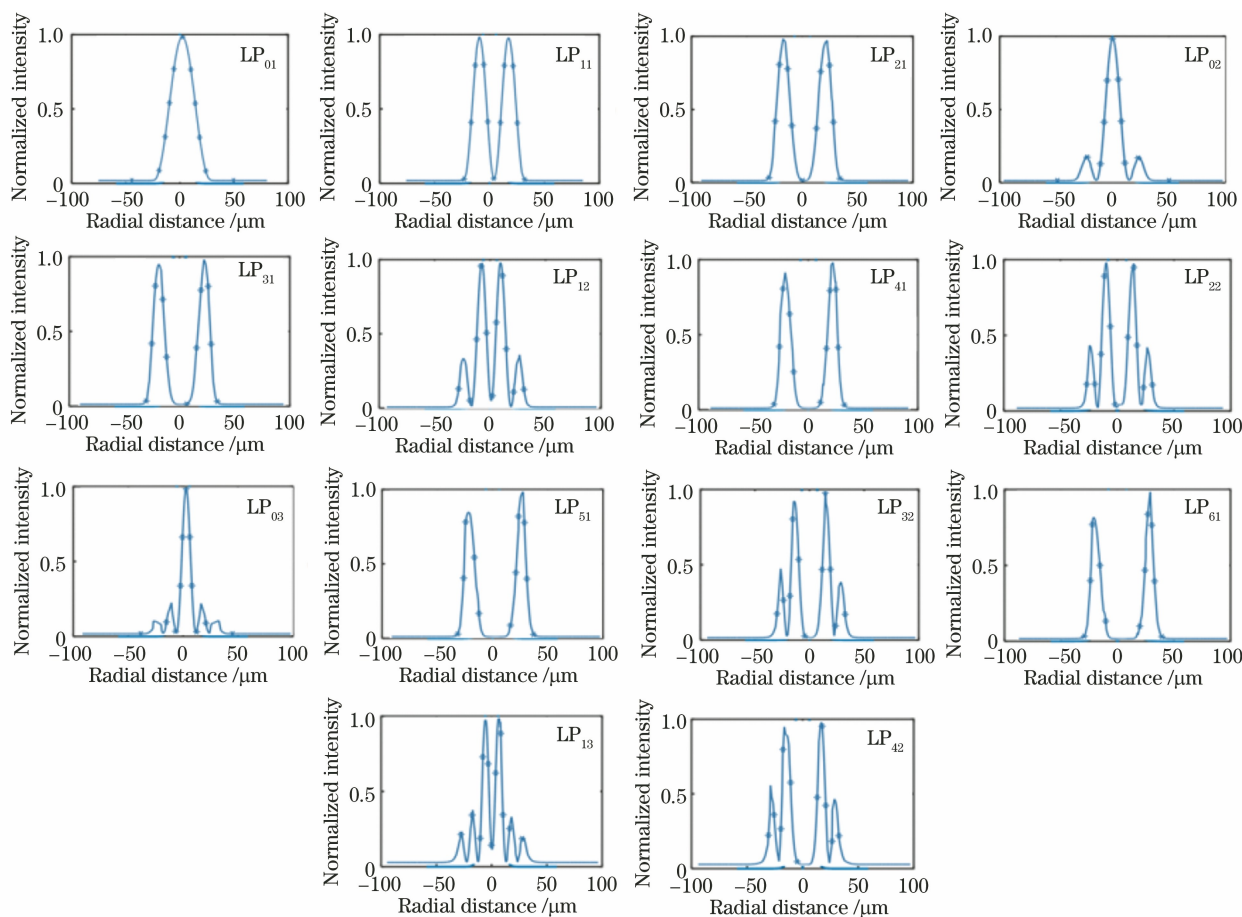


图 3 FMF 中 14 个模式的功率分布

Fig. 3 Power distribution of 14 modes of the FMF

纤芯半径和相对折射率差的大小都会影响光纤支持的模式数量及相邻 LP 模式间的最小  $\Delta n_{\text{eff}}$ 。在纳米孔半径  $d=220\text{ nm}$  时仿真得到纤芯半径  $r_1$ 、 $\Delta$  与相邻模式间最小  $\Delta n_{\text{eff}}$  的关系,结果如图 5 所示。其中,实线和虚线分别为  $LP_{42}$  以及  $LP_{71}$  模式的截止线,光纤参数取值在两条截止线中间区域时可支持 14 个 LP 模式。从图 5(a)可以发现,最小  $\Delta n_{\text{eff}}$  随纤芯半径及相对折射率差的增大而增大。为了使

$LP_{01}$ 、 $LP_{02}$  及  $LP_{03}$  模式的  $n_{\text{eff}}$  对其他模式  $n_{\text{eff}}$  的影响不大。因此,在纤芯中心处添加低折射率纳米孔,可以降低  $LP_{02}$  和  $LP_{03}$  模式的  $n_{\text{eff}}$ ,进而增大  $LP_{21}$  和  $LP_{02}$ 、 $LP_{51}$  和  $LP_{03}$  模式的  $\Delta n_{\text{eff}}$ ,改善模式耦合问题。

纳米孔和沟槽辅助双层 FFMF 的横截面及对应的折射率分布如图 4(a)和图 4(b)所示。其中, $d$  为纳米孔的半径, $W$  为沟槽的宽度, $D$  为沟槽和纤芯的距离,纤芯和包层的相对折射率差为  $\Delta$ , $\Delta_1$  为沟槽和包层的相对折射率差,纳米孔的折射率为 1,包层半径为  $62.5\ \mu\text{m}$ 。

光纤支持 14 个模式且最小  $\Delta n_{\text{eff}}$  达到  $10^{-4}$ , $r_1$  的取值范围为  $9\sim 9.4\ \mu\text{m}$ , $\Delta$  的取值范围为  $1.67\%\sim 1.75\%$ 。为了进一步分离空间模式,对图 5(a)中满足条件的区域进行处理,计算结果如图 5(b)所示。可以发现, $\Delta$  越接近  $1.75\%$ ,最小  $\Delta n_{\text{eff}}$  越大。为了降低光纤制造的难度,取  $\Delta=1.7\%$ , $r_1=9.2\ \mu\text{m}$ ,此时的最小  $\Delta n_{\text{eff}}$  为  $4.8\times 10^{-4}$ 。

为了分析纳米孔对模式耦合的影响,仿真了  $n_{\text{eff}}$ 、

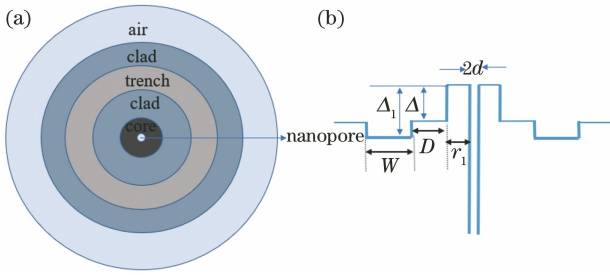


图 4 双包层 FMF 的结构。(a)横截面;(b)横截面的折射率分布  
Fig. 4 Structure of double-clad FMF. (a) Cross section; (b) refractive index distribution of cross section

$\Delta n_{\text{eff}}$  和  $d/r_1$  的关系,结果如图 6 所示。可以发现,  $LP_{01}$ 、 $LP_{02}$  以及  $LP_{03}$  模式的  $n_{\text{eff}}$  随纳米孔半径的增加逐渐减小,且随着  $d/r_1$  的增大有显著减小。当  $d/r_1$  大于 0.04 时,  $LP_{02}$  模式的  $n_{\text{eff}}$  急剧接近  $LP_{31}$ ,  $LP_{03}$  和  $LP_{32}$  模式间的  $\Delta n_{\text{eff}}$  急剧减小。为了尽可能地增大所有模式之间的  $\Delta n_{\text{eff}}$ , 取  $0.01 \leq d/r_1 \leq 0.04$ 。在该范围内仿真了纳米孔辅助纤芯  $\Delta n_{\text{eff}}$  和  $d/r_1$  的关系, 结果如图 6(b) 所示。可以发现, 阴影区域内的最小  $\Delta n_{\text{eff}}$  大于  $6 \times 10^{-4}$ , 此时,  $0.025 \leq d/r_1 \leq 0.03$ , 考虑到设计误差, 最终确定的  $d/r_1 = 0.0275$ ,  $d = 253 \text{ nm}$ 。

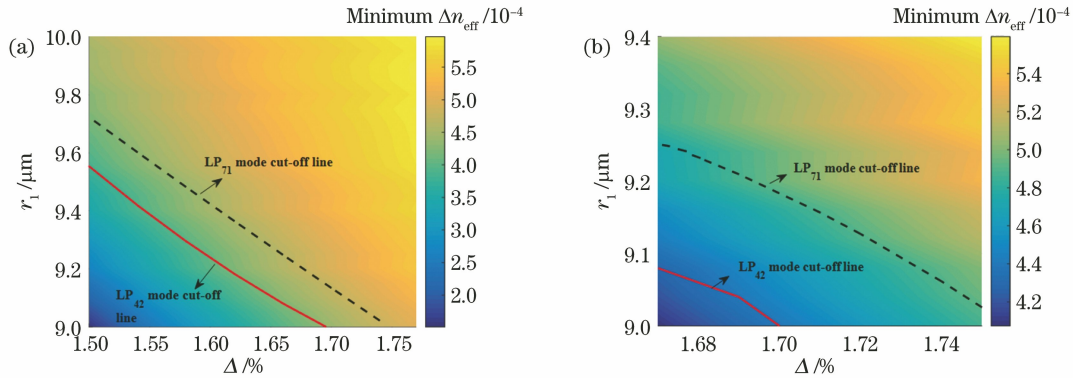


图 5 最小  $\Delta n_{\text{eff}}$  随纤芯半径  $r_1$  和相对折射率差  $\Delta$  的变化。(a)  $r_1 = 9 \sim 10 \mu\text{m}$ ,  $\Delta = 1.5\% \sim 1.75\%$ ;  
(b)  $r_1 = 9 \sim 9.4 \mu\text{m}$ ,  $\Delta = 1.67\% \sim 1.75\%$

Fig. 5 Minimum  $\Delta n_{\text{eff}}$  versus the core radius  $r_1$  and relative refractive index difference  $\Delta$ . (a)  $r_1 = 9 \sim 10 \mu\text{m}$ ,  $\Delta = 1.5\% \sim 1.75\%$ ;  
(b)  $r_1 = 9 \sim 9.4 \mu\text{m}$ ,  $\Delta = 1.67\% \sim 1.75\%$

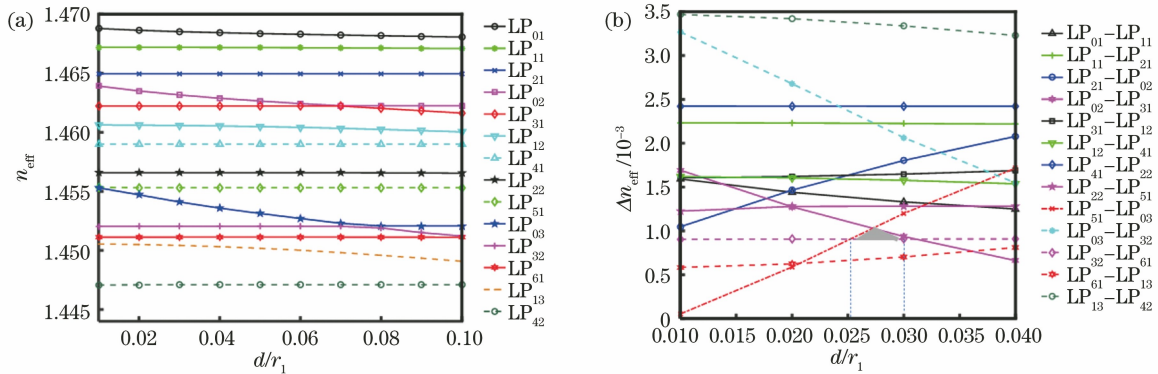


图 6  $n_{\text{eff}}$  和  $\Delta n_{\text{eff}}$  在  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  处随  $d/r_1$  的变化。(a)  $n_{\text{eff}}$ ; (b)  $\Delta n_{\text{eff}}$

Fig. 6 Variation of the  $n_{\text{eff}}$  and  $\Delta n_{\text{eff}}$  with  $d/r_1$  at the  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ . (a)  $n_{\text{eff}}$ ; (b)  $\Delta n_{\text{eff}}$

在添加半径为 253 nm 纳米孔时仿真分析了光纤 14 个 LP 模式的模式场分布,结果如图 7 所示。可以发现,纳米孔位于  $LP_{01}$ 、 $LP_{02}$  以及  $LP_{03}$  模式的最大功率区域。图 8 为纳米孔辅助光纤的功率分布图,可以发现,添加纳米孔后光纤 LP 模式 ( $LP_{01}$ 、 $LP_{02}$ 、 $LP_{03}$  模式除外) 的功率几乎没有发生变化,而  $LP_{01}$ 、 $LP_{02}$ 、 $LP_{03}$  模式的最大功率区域逐渐远离纤芯中心。研究结果表明,添加纳米孔只会明显影响  $LP_{0n}$  模式的横向中心场分布,从而分离  $LP_{0n}$  模式

与临近模式,增大模式间的  $\Delta n_{\text{eff}}$ 。

在 C+L 波段中仿真了传统阶跃折射率 FMF 和纳米孔辅助光纤  $n_{\text{eff}}$  及  $\Delta n_{\text{eff}}$  对波长的依赖性,结果如图 9 所示。图 9(a) 和图 9(b) 为阶跃折射率纤芯的  $n_{\text{eff}}$  及  $\Delta n_{\text{eff}}$  和波长的对应关系。可以发现,  $LP_{03}$  和  $LP_{51}$  模式间的有效折射率差过小,无法满足模式耦合的要求。图 9(c) 和图 9(d) 为添加纳米孔辅助纤芯  $n_{\text{eff}}$  及  $\Delta n_{\text{eff}}$  和波长的对应关系,可以发现,  $LP_{03}$  和  $LP_{51}$ 、 $LP_{02}$  和  $LP_{21}$  模式间的  $\Delta n_{\text{eff}}$  相对未

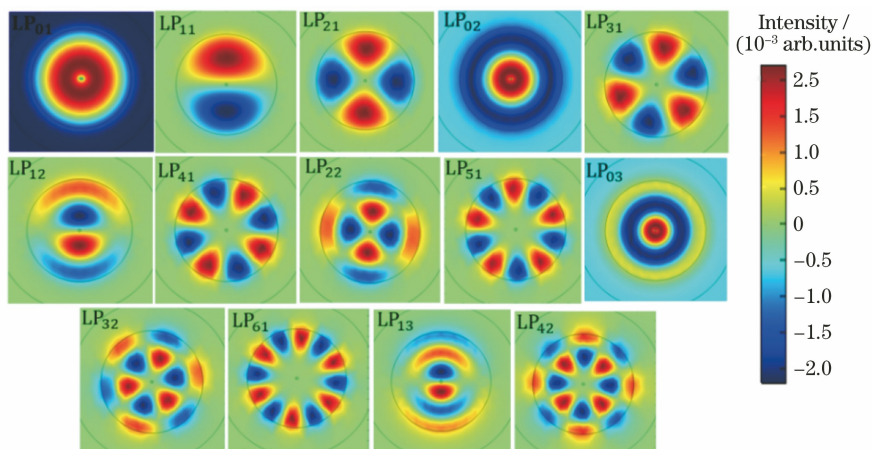


图 7  $d=253\text{ nm}$  时 14 个模式的模场分布

Fig. 7 Mode field distribution of 14 modes at  $d=253\text{ nm}$

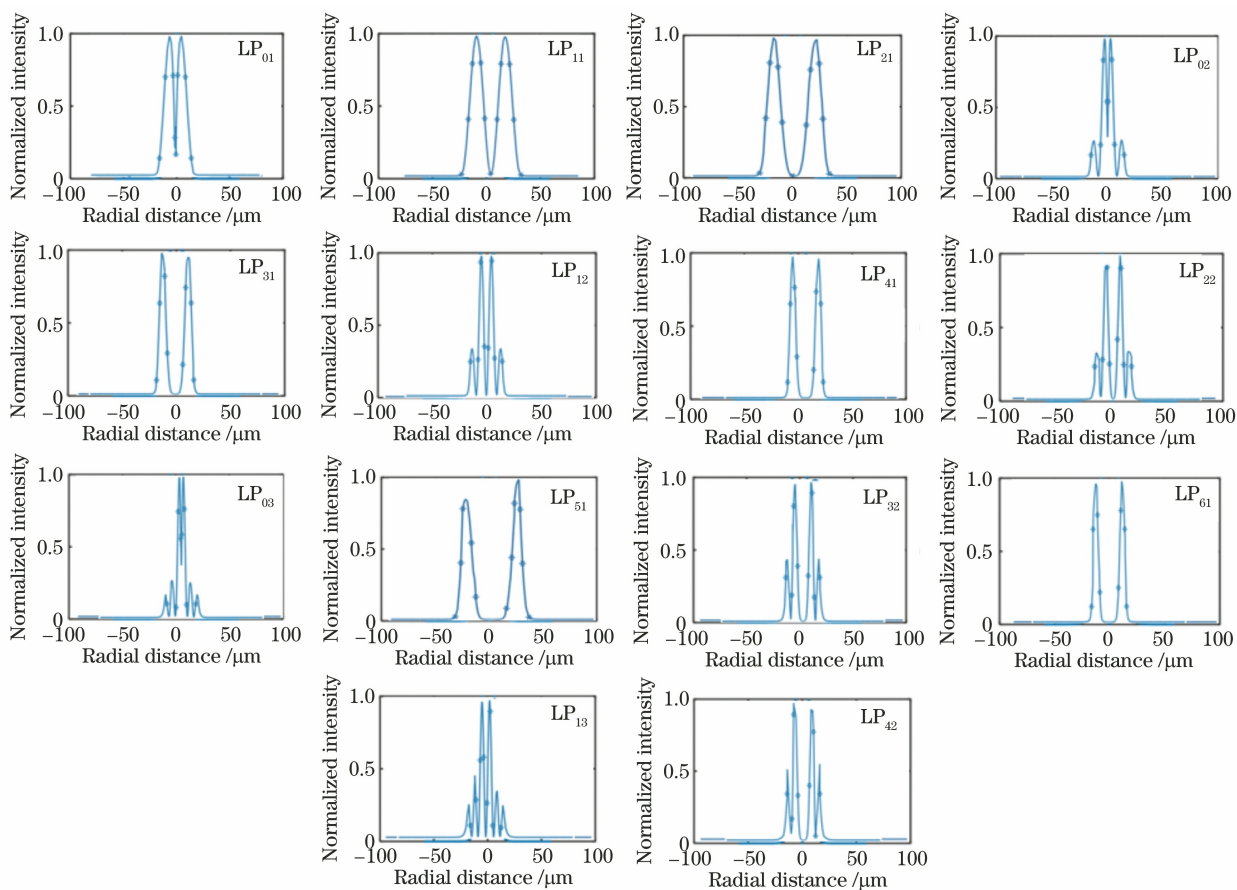


图 8 纳米孔辅助 FMF 的 14 个模式的功率分布

Fig. 8 Power distribution of 14 modes of nanopore-assisted FMF

添加纳米孔的光纤结构增大了  $1 \times 10^{-3}$ 。这表明加入纳米孔可以有效分离  $LP_{03}$  和  $LP_{51}$ 、 $LP_{02}$  和  $LP_{21}$ ，且所有模式间的最小有效折射率差大于  $6 \times 10^{-4}$ ，可以有效改善模式耦合问题。

### 3 弯曲损耗

在分析弯曲损耗时,通常采用等效折射率法将

弯曲的光纤等效成一个折射率变化的直光纤<sup>[16-17]</sup>,因此,分析时还需考虑弯曲半径和方向。实验中设计的光纤是圆对称结构,仿真模拟时只选择沿  $x$  轴的左弯曲方向,弯曲损耗(BL)可表示为<sup>[18]</sup>

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

式中,  $X_{\text{imag}}(n_{\text{eff}})$  为  $n_{\text{eff}}$  的虚部。

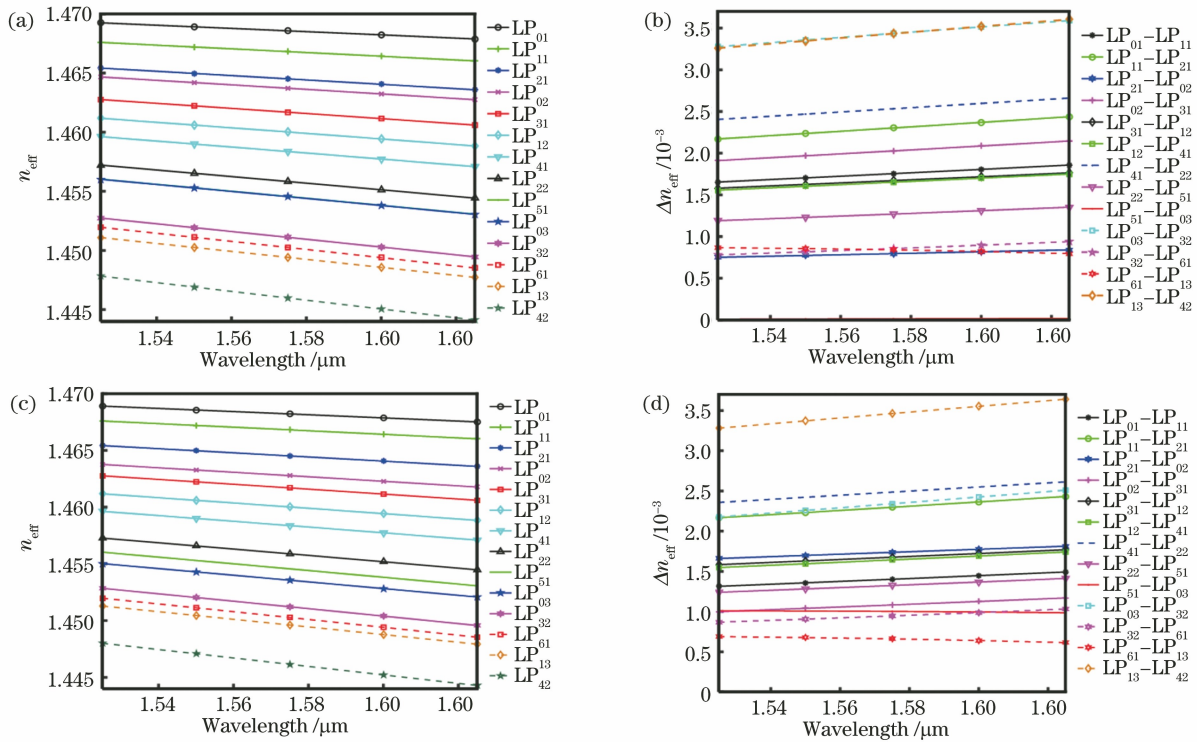


图 9 传统阶跃折射率光纤和纳米孔辅助光纤的  $n_{\text{eff}}$  和  $\Delta n_{\text{eff}}$  对波长的依赖性。(a)传统阶跃折射率光纤的  $n_{\text{eff}}$  对波长的依赖性;(b)传统阶跃折射率光纤的  $\Delta n_{\text{eff}}$  对波长的依赖性;(c)纳米孔辅助光纤的  $n_{\text{eff}}$  对波长的依赖性;(d)纳米孔辅助光纤的  $\Delta n_{\text{eff}}$  对波长的依赖性

Fig. 9 Wavelength dependence of  $n_{\text{eff}}$  and  $\Delta n_{\text{eff}}$  of traditional step index fiber and nanohole-assisted fiber. (a) Wavelength dependence of  $n_{\text{eff}}$  of the traditional step index fiber; (b) wavelength dependence of  $\Delta n_{\text{eff}}$  of the traditional step index fiber; (c) wavelength dependence of  $n_{\text{eff}}$  of the nanohole-assisted fiber; (d) wavelength dependence of  $\Delta n_{\text{eff}}$  of the nanohole-assisted fiber

添加纳米孔可能会改变光纤弯曲时的光纤敏感性,在包层中添加低折射率结构可减小弯曲损耗,实验设计的光纤在包层中添加沟槽辅助结构。因此,在确定光纤的半径和纳米孔参数后,为了不影响传输模式的  $n_{\text{eff}}$ ,只需要考虑沟槽相关参数(沟槽宽度  $W$ 、相对折射率差  $\Delta_1$ 、沟槽与纤芯的距离  $D$ )在抗弯曲损耗方面的作用。根据所需弯曲损耗的大小调整

沟槽的宽度和位置。图 10(a)、图 10(b)和图 10(c)分别为弯曲半径  $R = 12 \text{ mm}$  时各模式弯曲损耗和  $W$ 、 $\Delta_1$  及  $D$  的关系,可以发现,只有  $LP_{42}$  模式存在较大损耗,其他模式的损耗可以忽略不计。为了获得更小的弯曲损耗,沟槽应与纤芯保持一定的距离,在  $D = 22 \mu\text{m}$ 、 $W = 30 \mu\text{m}$ 、 $\Delta_1 = 0.6\%$  时弯曲损耗较小,为  $3.8 \times 10^{-5} \text{ dB/m}$ 。

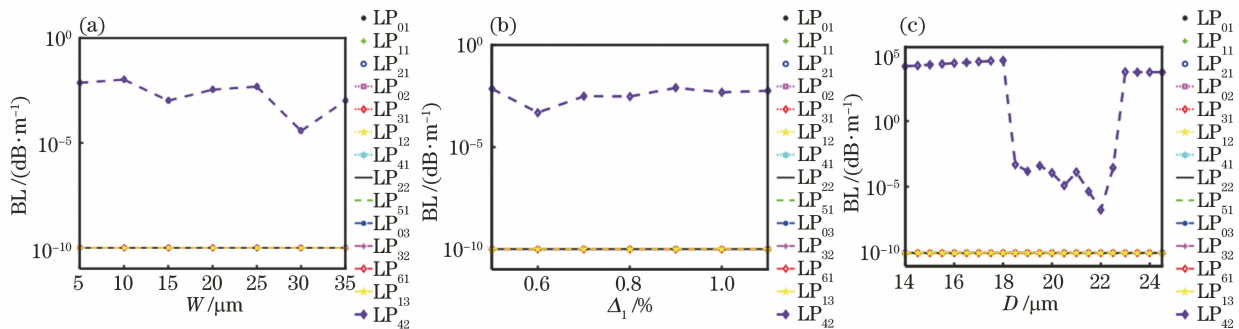


图 10 弯曲损耗对双包层参数的依赖性。(a)弯曲损耗对  $W$  的依赖性;(b)弯曲损耗对  $\Delta_1$  的依赖性;(c)弯曲损耗对  $D$  的依赖性  
Fig. 10 Dependence of bending loss on double-cladding parameters. (a) Dependence of bending loss on  $W$ ; (b) dependence of bending loss on  $\Delta_1$ ; (c) dependence of bending loss on  $D$

图 11 为不同弯曲半径下弯曲损耗的变化曲线, 可以发现, 弯曲损耗随弯曲半径的增大而减小, 且高阶模式的弯曲损耗明显高于低阶模式。图 11(a) 为弯曲半径达到 12 mm 时, 未添加沟槽的光纤弯曲损耗。可以发现, 前 13 个模式的弯曲损耗可达到  $10^{-10}$  dB/m, 可以忽略不计; 当弯曲半径达到

24 mm 时, 高阶模式  $LP_{42}$  的弯曲损耗为  $10^{-3}$  dB/m; 图 11(b) 为纳米孔和沟槽辅助光纤的弯曲损耗, 可以发现, 弯曲半径为 12 mm 时仅  $LP_{42}$  模式存在弯曲损耗, 为  $10^{-5}$  dB/m, 这表明沟槽辅助型光纤具有更好的抗弯性。

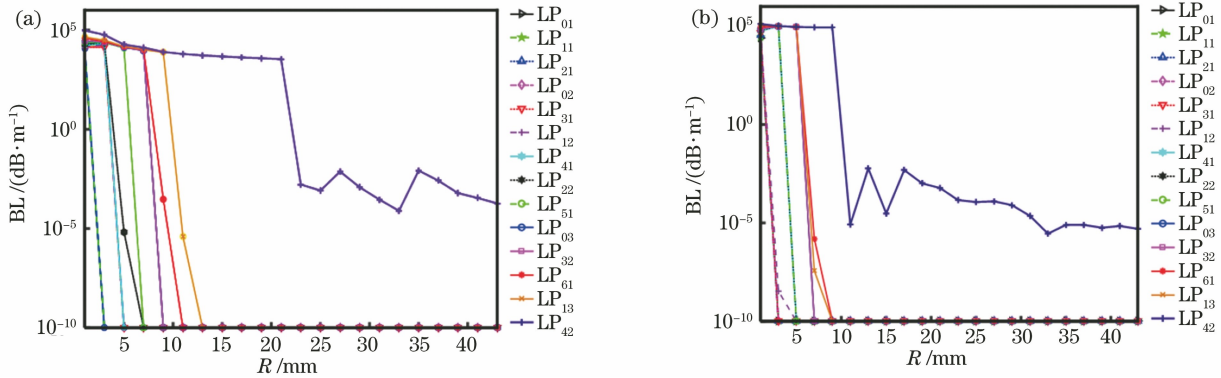


图 11 弯曲损耗随弯曲半径的变化曲线。(a)未添加沟槽的光纤;(b)添加沟槽的光纤

Fig. 11 Variation curve of bending loss versus bending radius. (a) Fiber without grooves; (b) fiber with grooves

### 4 模场的有效面积

较大的模场有效面积  $A_{\text{eff}}$  (单位为  $\mu\text{m}^2$ ) 可以抑制非线性效应, 是设计 FMF 时必须考虑的一个参数, 可表示为<sup>[19]</sup>

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[ \int_{-\infty}^{+\infty} |E|^2 dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} |E|^4 dx dy}, \quad (3)$$

式中,  $E$  为光纤横截面的模场功率分布。图 12(a) 和图 12(b) 分别为纳米孔辅助双包层 FMF 的  $A_{\text{eff}}$  和双包层参数之间的关系。可以发现, 无论  $W$  和  $\Delta_1$  如何发生变化, 各个模式的  $A_{\text{eff}}$  几乎恒定, 且均大于  $100 \mu\text{m}^2$ 。

### 5 差分群时延

差分群时延(DMD)特性对于降低 MIMO 系统的复杂度及功率损耗具有重要意义。模式 1 和模式 2 之间的差分群时延可表示为<sup>[20]</sup>

$$X_{\text{DMD}} = \tau_2 - \tau_1 = n_{g2} - n_{g1} = \frac{n_{\text{eff}2} - n_{\text{eff}1}}{c} - \frac{\lambda}{c} \left( \frac{\partial n_{\text{eff}2}}{\partial \lambda} - \frac{\partial n_{\text{eff}1}}{\partial \lambda} \right), \quad (4)$$

式中,  $n_{g2}$  和  $n_{g1}$  分别为模式 2 和模式 1 的群折射率,  $c$  为光在真空中的传输速度。图 13 为双包层光纤 DMD 对波长的依赖性, 可以发现, DMD 的值在  $-10 \sim 6$  ns/km 之间。

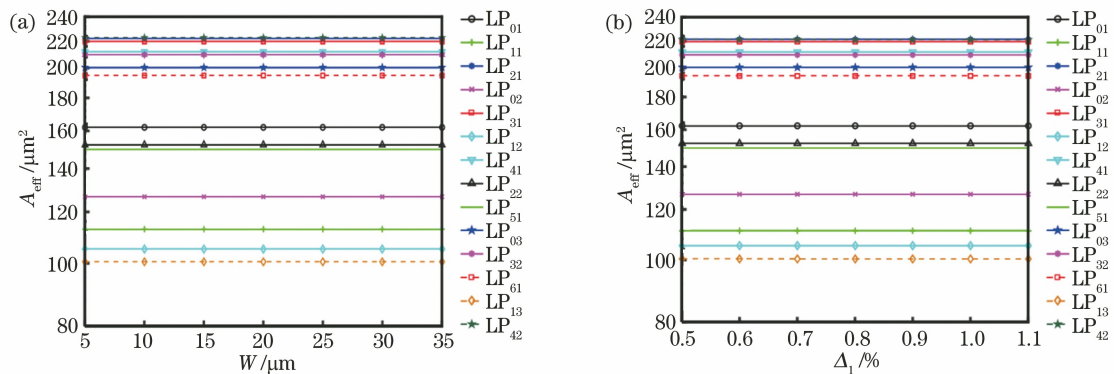


图 12 有效模场面积对双包层参数的依赖性。(a)有效模场面积对  $W$  的依赖性;(b)有效模场面积对  $\Delta_1$  的依赖性

Fig. 12 Effective mode field area dependence on the parameters of double-clad. (a) Dependence of the effective mode field area on  $W$ ; (b) dependence of the effective mode field area on  $\Delta_1$

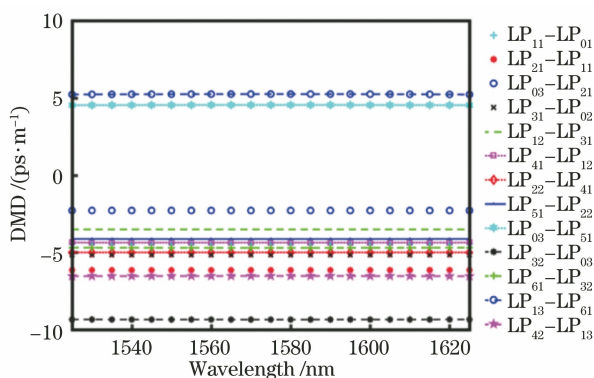


图 13 光纤的 DMD 对波长的依赖性

Fig. 13 Dependence of the DMD of the optical fiber on the wavelength

## 6 色散

光纤结构对于色散的影响是需要考虑的一个参数,光纤的色散可表示为材料色散和波导色散的总和<sup>[21]</sup>,即

$$D = D_m + D_w, \quad (5)$$

式中,  $D_m$  为材料色散,  $D_w$  为波导色散。对于  $\text{SiO}_2$  材料,其  $D_m$  和  $D_w$  可表示为

$$D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}, \quad (6)$$

$$D_w = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2}. \quad (7)$$

为了分析光纤结构对色散的影响,仿真了 C+L 波段中色散与波长的关系,结果如图 14 所示。可以发现,随着波长的增加,色散曲线从 20.5 ps/(nm·km) 开始线性增加。

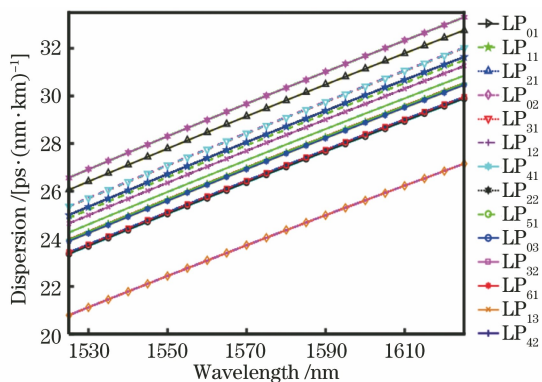


图 14 光纤色散对波长的依赖性

Fig. 14 Dependence of fiber dispersion on wavelength

## 7 结 论

研究了支持 14 个 LP 模式的沟槽和纳米孔辅助双包层 FMF,通过优化光纤参数,使 C+L 波段

内的相邻 LP 模式最小有效折射率差为  $6 \times 10^{-4}$ 。实验结果表明,该光纤结构可以有效降低模式耦合,从而简化接收端的 MIMO 系统。此外,还分析了弯曲损耗、模场面积以及差分群时延对光纤参数和结构的依赖性。数值分析结果表明,该光纤在有效改善模式耦合的同时,还可以获得大于  $100 \mu\text{m}^2$  的大模场面积以及  $10^{-5}$  dB/m 的低弯曲损耗,这表明沟槽和纳米孔辅助双包层 FMF 可以应用于低复杂度短距离的 SDM 系统中。

## 参 考 文 献

- [1] Tan Z W, Lü C. Optical fiber communication technology: present status and prospect[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 100-107.  
谈仲纬, 吕超. 光纤通信技术发展现状与展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 100-107.
- [2] Wang Y H, Wu B J, Wan F, et al. Analysis of compensation for inter-mode nonlinear phase modulation in few-mode optical fiber communication systems[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1206006.  
王瑜浩, 武保剑, 万峰, 等. 少模光纤通信系统中模间非线性相位调制的补偿分析[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1206006.
- [3] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres [J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Mori T, Sakamoto T, Wada M, et al. Few-mode fiber technology for mode division multiplexing[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 35: 37-45.
- [7] Mori T, Sakamoto T, Wada M, et al. Few-mode fibers supporting more than two LP modes for mode-division-multiplexed transmission with MIMO DSP [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(14): 2468-2479.
- [8] Parmigiani F, Jung Y, Grüner-Nielsen L, et al. Elliptical core few mode fibers for multiple-input multiple output-free space division multiplexing transmission [J]. IEEE Photonics Technology



- Letters, 2017, 29(21): 1764-1767.
- [9] Li J H, Wu Z Y, Hu T, et al. Weakly-coupled mode-division-multiplexing systems and networks supporting large quantity of independent modes[C]//2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 7-10, 2017, Wuzhen, China. New York: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [10] 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.
- [11] Xie Y H, Pei L, Zheng J J, et al. Design and characterization of nanopore-assisted weakly-coupled few-mode fiber for simpler MIMO space division multiplexing [J]. IEEE Access, 2020, 8: 76173-76181.
- [12] Chen S, Tong Y, Tian H P. Cross-arranged different-index-side-hole-assisted asymmetric few-mode fiber for mode spacing improvement[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2019, November 2-5, 2019, Chengdu, China. Washington, D.C.: OSA, 2019: M4A.171.
- [13] Liang J, Mo Q, Fu S, et al. Design and fabrication of elliptical-core few-mode fiber for MIMO-less data transmission [J]. Optics Letters, 2016, 41 (13): 3058-3061.
- [14] Ren F, Zhangsun T W, Huang X S, et al. Design of 20-polarization-maintaining-mode "pseudo-rectangle" elliptical-core fiber for MIMO-less MDM networks [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 50: 87-94.
- [15] Xiao H, Li H S, Wu B L, et al. Elliptical hollow-core optical fibers for polarization-maintaining few-mode guidance[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 48: 7-11.
- [16] Ge D W, Li J H, Zhu J L, et al. Design of a weakly-coupled ring-core FMF and demonstration of 6-mode 10-km IM/DD transmission [C]//Optical Fiber Communication Conference 2018, March 11-15, 2018, San Diego, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2018: W4K.3.
- [17] Tsuchida Y, Saitoh K, Koshiba M. Design and characterization of single-mode holey fibers with low bending losses [J]. Optics Express, 2005, 13(12): 4770-4779.
- [18] Han J W, Gao G J, Zhao Y L, et al. Bend performance analysis of few-mode fibers with high modal multiplicity factors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(13): 2526-2534.
- [19] Wang X, Lou S Q, Lu W L, et al. Bend resistant large mode area fiber with multi-trench in the core [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(2): 117-124.
- [20] Duncan B D. Review: 'optical fiber communications' [M]. Keiser G. 2nd ed. Dayton: University of Dayton, 1992.
- [21] Medjouri A, Simohamed L M, Ziane O, et al. Design of a circular photonic crystal fiber with flattened chromatic dispersion using a defected core and selectively reduced air holes: application to supercontinuum generation at 1.55  $\mu\text{m}$  [J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2015, 16: 43-50.