

# 横向模式可切换的少模环形光纤激光器

李晓风<sup>1</sup>, 李哲<sup>2</sup>, 吴文矛<sup>2</sup>, 李巨浩<sup>1\*</sup>, 任芳<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北京大学区域光纤通信网与新型光纤通信系统国家重点实验室, 北京 100871;

<sup>2</sup>中国科学院深海科学与工程研究所, 海南 三亚 572000;

<sup>3</sup>北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083

**摘要** 设计一种基于腔内全光纤模式复用器/解复用器(MUX/DEMUX)的少模环形光纤激光器, 实现了 LP<sub>01</sub> 模、LP<sub>11</sub> 模、LP<sub>21</sub> 模及混合模式可切换的激光输出。实验结果表明, 利用低串扰的全光纤模式 MUX/DEMUX 结合 4×1 光开关, 激光器可在三个最低阶的线偏振(LP)模式及其混合模式之间进行切换, LP<sub>01</sub> 模、LP<sub>11</sub> 模、LP<sub>21</sub> 模的泵浦阈值分别为 40、60、80 mW, 斜率效率分别为 1.2%、0.82%、0.56%。对设计的少模环形光纤激光器结构进行数值模拟和参数优化, 极大地改善了波长偏移问题, 实现了小于 0.032 nm 的 3 dB 线宽。

**关键词** 光纤光学; 光纤激光器; 模式复用器/解复用器; 模式转换; 模式选择耦合器

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1406002

## Transverse-Mode Switchable Few-Mode Ring Fiber Lasers

Li Xiaofeng<sup>1</sup>, Li Zhe<sup>2</sup>, Wu Wenmao<sup>2</sup>, Li Juhao<sup>1\*</sup>, Ren Fang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,

Peking University, Beijing 100871, China;

<sup>2</sup>Institute of Deep-Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya, Hainan 572000, China;

<sup>3</sup>School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing,

Beijing 100083, China

**Abstract** A few-mode ring fiber laser based on an all-fiber mode multiplexer/demultiplexer (MUX/DEMUX) was designed, which achieved switchable lasing output in LP<sub>01</sub>, LP<sub>11</sub>, LP<sub>21</sub>, and hybrid modes. Experimental results show that the output lasing mode of the ring fiber laser can be switched between the three lowest-order linearly polarized (LP) modes and hybrid modes by employing a low mode-crosstalk all-fiber mode MUX/DEMUX and a simple 4 × 1 optical switch. Thresholds of 40, 60, and 80 mW and slope efficiencies of 1.2%, 0.82%, and 0.56% were obtained for the LP<sub>01</sub>, LP<sub>11</sub>, and LP<sub>21</sub> mode operations, respectively. Numerical simulation and parameter optimization of the designed few-mode ring fiber laser structure adequately resolved the wavelength shift problem, with a line width of 3 dB less than 0.032 nm being realized.

**Key words** fiber optics; fiber lasers; mode multiplexer/demultiplexer; mode switching; mode-selective coupler

**OCIS codes** 060.3510; 060.4230; 060.2410; 140.3560

## 1 引 言

随着大数据、云计算、移动互联网、物联网等技术的快速发展,人们对通信系统的通信容量和带宽需求越来越大,现有的光纤传输资源正在被快速消耗,逐渐逼近单模光纤(SMF)通信系统的通信容量极限<sup>[1]</sup>。为了进一步提高光纤传输系统的容量,解决带宽资源日益紧张的瓶颈,模分复用(MDM)技术

已成为一种潜在的解决方案<sup>[2]</sup>。近几年来,以不同横向模式工作的光纤激光器引起了人们的广泛关注,因为它位于模分复用系统的最前端,用于实现对模式激励的控制,产生系统所需要的模式,是实现模分复用的前提<sup>[3-4]</sup>。

国内外学者已经通过多种方法和结构实现了具有高阶横向模式输出的光纤激光器<sup>[5-10]</sup>。2012年, Sun 等<sup>[6]</sup>展示了一种使用少模光纤布拉格光栅在光

收稿日期: 2019-12-19; 修回日期: 2020-02-25; 录用日期: 2020-04-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费(FRF-TP-19-016A2)

\* E-mail: juhao\_li@pku.edu.cn

纤激光腔内进行波长选择并改善输出模式和极化纯度的全光纤集成激光器。但是受光纤布拉格光栅分辨率的限制,这种方法只能激发两个最低阶模式,而且高阶模式的激励依赖于低效的偏移拼接点,这将导致激光器无法回避偏移拼接点带来的插入损耗大、对准困难等问题。2013年,Ngcobo等<sup>[7]</sup>提出了一种允许动态腔内光束成形的数字激光器,采用软件控制的空间光调制器产生了所需的激光横向模式。但是庞大的空间光调制器不利于紧凑型全光纤激光器的集成。2016年9月,Wang等<sup>[8]</sup>展示了一种基于6对1模式选择性光子灯笼的光纤激光器,通过改变光子灯笼的输入端口,可以在6个最低阶线偏振(LP)模式之间切换激光器的输出模式。然而光子灯笼大的模式串扰和少模掺铒光纤中的残余模式耦合限制了激光器输出高阶模式激光的纯度。2018年,Yan等<sup>[9]</sup>证明以级联的长周期光栅和光纤布拉格光栅作为模式开关,可以实现具有两阶横模输出的环形光纤激光器。但是需要通过调节施加到机械长周期光栅的压力实现模式转换,控制难度大,可操作性差。目前,专家们仍在积极寻求一种通用、稳健、高效和全光纤集成方法来实现具有多个横向模式激光输出的光纤激光器。

本文通过实验验证了一种基于低模式串扰全光纤模式复用器/解复用器(MUX/DEMUX)的横向模式可切换环形光纤激光器,为实现具有多个

横向模式激光输出的光纤激光器提供了一种新的选择。全光纤模式 MUX/DEMUX 由级联的模式选择耦合器(MSC)组成,可实现基模到高阶 LP 模式的转换。通过使用模式 MUX 结合  $4 \times 1$  光开关,激光器可在 3 个最低阶的 LP 模式之间进行切换。

## 2 实验装置与工作原理

本文所设计的能够实现多个横向模式激光输出的少模环形光纤激光器的示意图如图 1 所示。该少模环形光纤激光器包含:一个 980 nm 的激光二极管作为泵浦源,通过 980 nm 光隔离器(ISO)连接到波分复用器(WDM)的泵浦光输入端口;一个 980/1550 nm 的单模波分复用器作为泵浦光和信号光的耦合器;一段 5 m 长的单模掺铒光纤(SM-EDF)作为增益介质,对基模光信号进行受激辐射光放大;两个  $1 \times 3$  的单模光耦合器(SM-OC);一对由三个级联的 MSC 组成的,能高效复用/解复用多个 LP 模式的模式 MUX/DEMUX;一个  $4 \times 1$  光开关实现模式切换;一个工作在 1550 nm 的单模光隔离器,以保证激光在环形腔内的单向传输;一个 90:10 的六模环形功分器,其中 10% 端口作为激光器的输出,与低通滤波器(LBP)或者光谱分析仪(OSA)相连,90% 端口连接到模式 DEMUX 的输入端口进行信号循环。

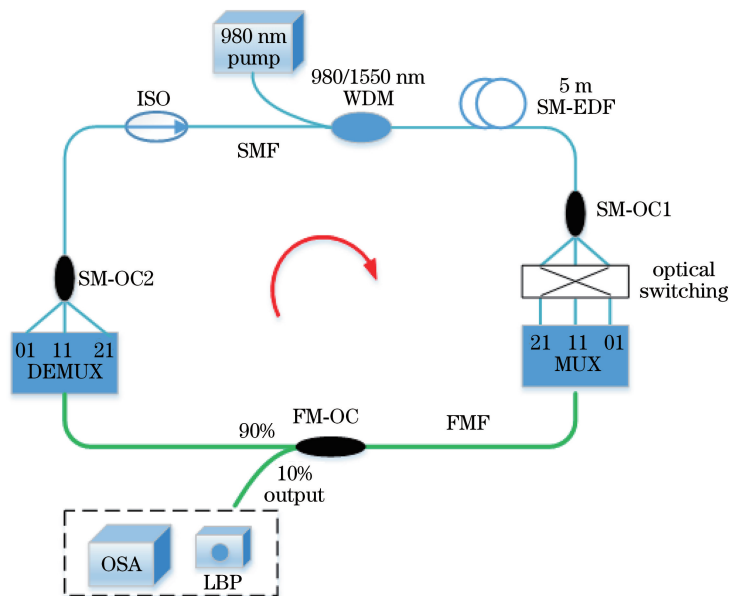


图 1 横向模式可切换的少模环形光纤激光器示意图

Fig. 1 Schematic structure of the transverse mode-switchable few-mode ring fiber laser

在环形谐振腔内,只有基模沿着单模光纤传播,模式 MUX 辅助特定的横向模式( $LP_{01}$ 模、 $LP_{11}$ 模、

$LP_{21}$ 模)有效激发并输入少模光纤。少模光纤中传输的激光信号的 10% 通过少模功分器输出,另外

90%输入模式 DEMUX,模式 DEMUX 将高阶模式转换回基模,然后通过光耦合器合并到单模光纤中进行下一圈的循环。

实验中所用的模式选择耦合器是采用弱融合技术,由单模光纤和少模光纤拉锥熔融而成的,其结构如图 2(a)所示。基于相位匹配条件<sup>[11]</sup>,即当单模光纤中基模的传播常数  $\beta_1$  与少模光纤中高阶模的传播常数  $\beta_2$  满足  $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 = 0$  时,模式选择耦合器两输出端口的光功率分配为  $P_1(z)$  正比于  $\cos^2(Cz)$ ,  $P_2(z)$  正比于  $\sin^2(Cz)$ ,其中  $P_1(z)$  和  $P_2(z)$  分别表示 MSC 的单模光纤臂和少模光纤臂的输出光功率, $C$  是耦合系数。两输出端口的光功率之和为一恒定常数,这表明两根光纤之间可在无损条件下实现完全周期性的功率传输。利用 COMSOL 软件,通过有限元法计算在不同光纤直径下,单模光纤中的基模和少模光纤中所需的高阶模(LP<sub>01</sub>模、LP<sub>11</sub>模和 LP<sub>21</sub>模)的模式有效折射率,如图 2(b)所示,从中找到实现单模光纤中基模与少

模光纤中期望被激发的高阶模相位匹配的最佳直径,从而在特定的耦合器直径处,将发射到单模光纤中的基模转换为少模光纤中的高阶模式。模式选择耦合器一方面作为模式转换器,将单模光纤中的基模转换为少模光纤中的高阶模式;另一方面作为模式分离器,在不同的光纤输出端口输出不同的模式。

将 MSC 级联,组成能高效复用/解复用多个 LP 模式的模式 MUX/DEMUX,通过控制各个模式选择耦合器的单模光纤输入端口,可以实现由单模光纤中的基模到少模光纤中 LP<sub>01</sub>模、LP<sub>11</sub>模、LP<sub>21</sub>模及混合模式的转换,如图 2(c)所示。模式 MUX/DEMUX 对不同模式的光插入损耗有所差异。在 1550 nm 波长处激励高阶模式时:模式 MUX 的光插入损耗对于 LP<sub>01</sub>模而言是 1.45 dB,对于 LP<sub>11</sub>模而言是 2.47 dB,对于 LP<sub>21</sub>模而言是 4.68 dB;模式 DEMUX 的光插入损耗对于 LP<sub>01</sub>模而言是 1.20 dB,对于 LP<sub>11</sub>模而言是 2.19 dB,对于 LP<sub>21</sub>模而言是 4.35 dB。

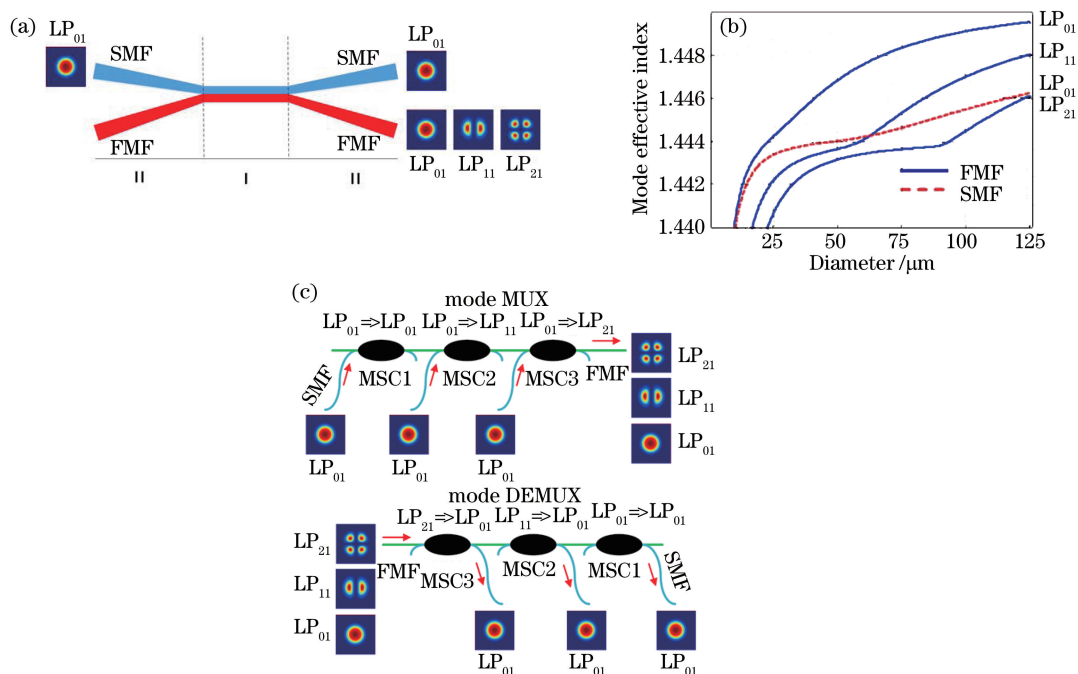


图 2 模式 MUX/DEMUX 的原理。(a)MSC 结构示意图;(b)单模光纤中基模和少模光纤中高阶模的模式有效折射率匹配图;(c)全光纤模式 MUX/DEMUX 结构示意图

Fig. 2 Principle of mode MUX/DEMUX. (a) Schematic of the MSC; (b) mode effective index matching graph for the LP<sub>01</sub> in the SMF and the desired modes in the designed FMF; (c) schematic of all-fiber mode MUX/EDMUX

通过使用模式 MUX/DEMUX 分析模式(LP<sub>01</sub>模、LP<sub>11</sub>模和 LP<sub>21</sub>模)之间的模式串扰。模式串扰程度可以通过背对背装置,即将模式 MUX 的输出端口直接连接到模式 DEMUX 的输入端口进行测量分析。当 0 dBm 的输入功率注入到模式 MUX

的每个端口时,测量模式 DEMUX 输出端口的光功率,结果如表 1 所示。由实验测量数据可以看出,只往模式 MUX 的某一个输入端口中注入基模,不仅能在模式 DEMUX 的对应输出端口检测到光输出,还可以在另外两个端口检测到光输出,由此说明模

式 MUX/DEMUX 是存在模式串扰的,造成模式串扰的原因可能是 MSC 的相位不完全匹配、光纤尾纤连接时纤芯尺寸不匹配等。

表 1 利用背对背装置测量的输出功率  
Table 1 Output power with back to back configuration

Input port	Measured output port	Back to Back
LP <sub>01</sub>	LP <sub>01</sub>	-4.6
LP <sub>01</sub>	LP <sub>11</sub>	-14.8
LP <sub>01</sub>	LP <sub>21</sub>	-34.2
LP <sub>11</sub>	LP <sub>01</sub>	-18.5
LP <sub>11</sub>	LP <sub>11</sub>	-8.6
LP <sub>11</sub>	LP <sub>21</sub>	-26.9
LP <sub>21</sub>	LP <sub>01</sub>	-39.6
LP <sub>21</sub>	LP <sub>11</sub>	-29.7
LP <sub>21</sub>	LP <sub>21</sub>	-9.9

### 3 实验结果与讨论

通过模式 MUX 有效地激励高阶模式之后,可以在 90 : 10 六模环形功分器的输出端检测到激光

输出。使用激光束分析仪(LBP2-IR2, Newport)观察记录每个激光模式的模场强度分布,如图 3 所示,证明该少模环形光纤激光器能够实现可切换的 LP<sub>01</sub>模、LP<sub>11</sub>模、LP<sub>21</sub>模及混合模式的激光输出。值得注意的是,在混合模式激光输出时,由于激光束分析仪分辨率低,以及三个模式混合输出时存在相互串扰,实验测量时只能得到一个明确的光斑。

为探索激光器的输出功率特性,将泵浦功率从 0 mW 开始逐渐升高,用工作在 1550 nm 波长的光功率计分别测量三种模式(LP<sub>01</sub>模、LP<sub>11</sub>模、LP<sub>21</sub>模)的激光输出功率随泵浦功率的变化特性,如图 4 所示。当泵浦功率达到各个模式激光工作阈值以上时,不同模式的激光输出功率随泵浦功率线性增加。对于 LP<sub>01</sub>模、LP<sub>11</sub>模和 LP<sub>21</sub>模,分别获得 40、60、80 mW 的阈值和 1.2%、0.82%、0.56%的斜率效率。不同模式之间斜率效率和阈值的差异是由模式 MUX/DEMUX 的相关插入损耗和串扰造成的。通过优化模式 MUX/DEMUX 的插入损耗,同时保证高阶模式的充分激发,有望实现更高效的激光输出。

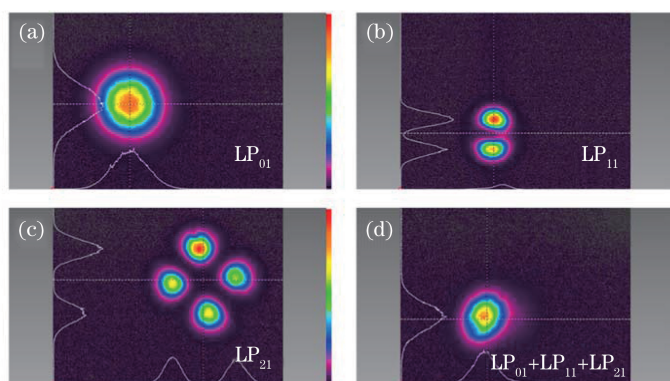


图 3 少模激光器模场强度分布。(a) LP<sub>01</sub>模;(b) LP<sub>11</sub>模;(c) LP<sub>21</sub>模;(d)混合模

Fig. 3 Mode intensity profiles of the few-mode laser. (a) LP<sub>01</sub> mode; (b) LP<sub>11</sub> mode; (c) LP<sub>21</sub> mode; (d) hybrid mode

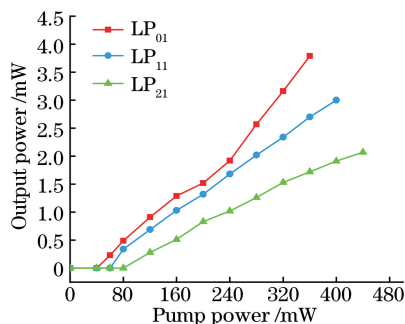


图 4 输出功率随泵浦功率的变化曲线

Fig. 4 Relation between output power and pump power

接着,利用波长分辨率为 0.02 nm,最小采样分辨率为 0.001 nm 的光谱分析仪(AQ6370C, YOKOGAMA)监测在 316 mW 的固定泵浦功率

下,LP<sub>01</sub>模、LP<sub>11</sub>模、LP<sub>21</sub>模及混合模式激光输出的光谱特性,光谱如图 5 所示。激光波长  $\lambda$  与腔的光学长度  $n_{\text{eff}}L$  有关, $n_{\text{eff}}L = m \times \lambda / 2$ ,其中  $n_{\text{eff}}$ 、 $L$  和  $m$  分别是光纤中传输的空间横模的有效折射率、几何腔长和纵模数。一方面,实验所用的模式 MUX/DEMUX 是由三个级联的 MSC 组成的,而 MSC 是基于相位匹配原理设计制作而成的,不同高阶模式选取的模式有效折射率  $n_{\text{eff}}$  不同;另一方面,模式 MUX/DEMUX 的不同输入/输出端口和耦合区域长度会影响几何腔长  $L$ 。因此,如若不加以调整,不同模式之间会出现波长偏移现象,如文献[12]中 LP<sub>01</sub>模与 LP<sub>21</sub>模的波长偏移达 0.9 nm。少模光纤中传输的不同模式的模式有效折射率是基于相位匹

配原理进行精心设计的,不便于轻易改变。因此,实验中需根据需要在模式 MUX 的不同输入端口处添加合适长度的光纤来调整几何腔长,以尽量减小波长偏移。测得  $LP_{01}$  模、 $LP_{11}$  模、 $LP_{21}$  模及混合模式激光输出光谱的中心波长分别为 1559.892、1559.952、1560.003、1559.948 nm,3 dB 线宽分别为

0.024、0.032、0.032、0.020 nm,最大波长偏移为 0.11 nm,波长偏移问题得到了很好的改善,而且实现了窄线宽激光输出。

实验过程中,在混合模状态下由于模式之间的相互串扰将导致三个模式的特征波长无法区分,见图 5(d)。

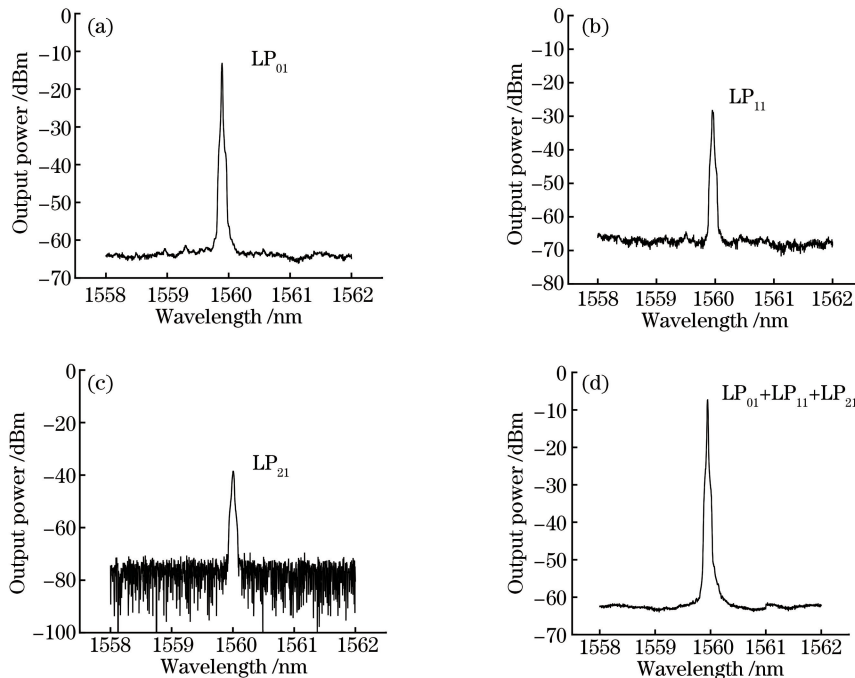


图 5  $LP_{01}$  模、 $LP_{11}$  模、 $LP_{21}$  模及混合模的输出激光光谱。(a) $LP_{01}$  模;(b) $LP_{11}$  模;(c) $LP_{21}$  模;(d)混合模

Fig. 5 Spectral feature of lasing output for the  $LP_{01}$  mode, the  $LP_{11}$  mode, the  $LP_{21}$  mode, and the hybrid mode.

(a)  $LP_{01}$  mode; (b)  $LP_{11}$  mode; (c)  $LP_{21}$  mode; (d) hybrid mode

## 4 结 论

设计了一种基于低模式串扰全光纤模式 MUX/DEMUX 的横向模式可切换的环形光纤激光器,能够实现  $LP_{01}$  模、 $LP_{11}$  模、 $LP_{21}$  模及混合模式可切换的激光输出。通过优化模式 MUX/DEMUX 的插入损耗,同时保证高阶模式的充分激发,有望在后续研究中实现更高效的激光输出。这种利用 MSC 级联实现模式复用/解复用的结构为实现具有多个横向模式激光输出的光纤激光器提供了一种新的选择,可以在光学陷波、高分辨率显微镜和模式复用系统中得到广泛应用。

## 参 考 文 献

- [1] Freckmann T, Essiambre R J, Winzer P J, et al. Fiber capacity limits with optimized ring constellations [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(20): 1496-1498.
- [2] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-

division multiplexing in optical fibres [J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.

- [3] 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.
- [4] Sleiffer V A J M, Leoni P, Jung Y, et al. 20 × 960-Gb/s space-division-multiplexed 32QAM transmission over 60 km few-mode fiber[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 749-755.
- [5] Xu C L, Yan K, Gu C, et al. All-fiber laser with flattop beam output using a few-mode fiber Bragg grating[J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1247-1250.
- [6] Sun B, Wang A T, Xu L X, et al. Low-threshold single-wavelength all-fiber laser generating cylindrical vector beams using a few-mode fiber Bragg grating [J]. Optics Letters, 2012, 37(4): 464-466.
- [7] Ngcobo S, Litvin I, Burger L, et al. A digital laser for on-demand laser modes [J]. Nature Communications, 2013, 4: 2289.

- [8] Wang N, Antonio-Lopez J E, Alvarado Zacarias J C, et al. Mode-selective fiber laser using a photonic lantern[C]//ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication, September 18-22, 2016, Dusseldorf, Germany. New York: IEEE Press, 2016: 1-3.
- [9] Yan T T, Jiang Y C, Li H S, et al. Switchable dual-mode all-fiber laser by using LPG and FBG[C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2018: 1-2.
- [10] Wan H D, Wang J, Zhang Z X, et al. Passively mode-locked ytterbium-doped fiber laser with cylindrical vector beam generation based on mode selective coupler [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(16): 3403-3407.
- [11] Ismaeel R, Lee T, Oduro B, et al. All-fiber fused directional coupler for highly efficient spatial mode conversion [J]. Optics Express, 2014, 22 (10): 11610-11619.
- [12] Ren F, Yu J, Wang J. Spatial-mode switchable ring fiber laser based on low mode-crosstalk all-fiber mode MUX/DEMUX [J]. Optics & Laser Technology, 2008, 101: 21-24.