

# 光纤型三模式复用解复用器的研究

乐燕思 王智 李强 郭凯丽 崔燊 吴重庆

北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所, 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044

**摘要** 基于模式耦合理论, 研究了一种 3 个模式的锥形光纤模式复用/解复用器, 可以实现 1 根少模光纤与 3 根单模光纤之间的模式复用及解复用, 有利于提升光纤传输系统的传输容量。当基模光场分别输入 3 根直径为 10、8.4、7.2  $\mu\text{m}$  的单模光纤时, 会在锥形结构中发生耦合并转换为高阶模式场。利用重叠积分计算该复用器输出端口光场与标准模式场的相似度, 检测出输入的基模在输出端分别转换为  $\text{LP}_{01}$  和两个简并的  $\text{LP}_{11}$  模式, 即实现模式复用。当  $\text{LP}_{01}$  和两个  $\text{LP}_{11}$  模式分别输入到少模光纤时, 从解复用器输出端相应端口输出的光功率最大, 即实现模式解复用。最后改变复用器的结构参数来计算该器件的容差比, 计算出该器件实现模式转换以及解复用效果最好的拉锥长度分别为 3.88 cm 和 3.8931 cm。

**关键词** 光纤通信; 模式复用; 模式转换; 解复用; 模式鉴别

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0606004

## Research of Three Mode Fiber Multiplexers and Demultiplexers

Le Yansi Wang Zhi Li Qiang Guo Kaili Cui Can Wu Chongqing

Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** A kind of three modes tapered fiber mode multiplexer/demultiplexer is developed based on mode coupling theory for realizing modes multiplexing and demultiplexing between a few-mode fiber (FMFs) and three single-mode fibers (SMF). It's significant to improve the transmission capacity of optical transmission system. When the fundamental mode lights are input into three SMFs with the diameters of 10  $\mu\text{m}$ , 8.4  $\mu\text{m}$  and 7.2  $\mu\text{m}$ , the lights will couple in the tapered area and convert into higher order modes. The similarity between optical field at output port and standard mode field is further calculated by overlap integral. As a consequence, the fundamental modes can be converted into  $\text{LP}_{01}$  mode and two degenerate  $\text{LP}_{11}$  modes at the output port, i. e. realization of modes multiplexing. When the  $\text{LP}_{01}$  mode and two  $\text{LP}_{11}$  modes are separately input into the FMF, the output light power of corresponding port is the maximum, i. e. realization of modes demultiplexing. Finally, the multiplexer's tolerance is calculated with different parameters. Calculation results show that 3.88 cm and 3.8931 cm are the tapered structure's length of the multiplexer for best effect of mode converting and demultiplexing.

**Key words** optical communications; mode multiplexing; mode conversion; demultiplexing; mode identification

**OCIS codes** 060.2330; 060.1810; 060.4230; 060.2430

## 1 引 言

受频谱效率的限制, 单模光纤(SMF)的传输容量已接近极限<sup>[1]</sup>。近几年, 研究人员利用多芯光纤和少模光纤(FMF)实现空分复用, 进而提升光纤的传输容量<sup>[2]</sup>。利用少模光纤实现空分复用过程中, 模式转换

收稿日期: 2016-01-11; 收到修改稿日期: 2016-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(61571035)

作者简介: 乐燕思(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事空分复用、集成光电子器件等方面的研究。

E-mail: 14121609@bjtu.edu.cn

导师简介: 王智(1971—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信、集成光电子器件和全光信号处理等方面的研究。E-mail: zhiwang@bjtu.edu.cn(通信联系人)

及复用是关键。2011年,Ryf等<sup>[3-4]</sup>基于空间光路上的耦合完成了三模光纤的偏振模式复用,实现了10 km  $6 \times 28$  Gb/s的传输,之后进一步实现了33 km  $6 \times 56$  Gb/s的传输。2014年顾铮先等<sup>[5-6]</sup>提出可以利用长周期光纤光栅使包层中的高阶模式与纤芯中的低阶模式发生耦合从而实现模式转换。除此之外,朱晓亮等<sup>[7-8]</sup>还利用多芯光纤以及非对称平面光波导实现模式转换。2015年,Genevaux等<sup>[9]</sup>利用多平面光转换(MPLC)实现了6个模式的复用,他们把图像的相位信息提取出来,加载到空间光调制器上,改变了光场横向分布的相位,从而使经过空间光调制器的光能够呈现出预设的图像,即模式或者模式复用之后的光场。

为了实现全光纤型模式复用光传输,2012年,Birks等<sup>[10]</sup>将多根单模光纤在1根低折射率的套管中熔融拉锥,在末端拉锥形成少模光纤。2014年,Yerolatsitis等<sup>[11]</sup>成功实现了3个模式的绝热锥形光纤模式复用,该器件能够同时实现模式转换及模式复用,简化了空分复用系统的复杂程度,使其更容易得到实现。但是在基模向高阶模转换时,少模光纤中仍存在未转换完全的基模,因此模式复用过程中未转换完全的基模之间存在串扰。本文利用COMSOL软件对文献[11]中的结构进行仿真,深入研究了3个模式的模式复用与解复用结构,通过改变拉锥的比例对该器件进行完善,将输出端口、输入端口直径之比定为1:6.8,并利用重叠积分对模式转换后的模式场与标准模式进行了鉴别,定量地计算了该器件实现模式转换的效率;将模式复用器的输入端与输出端调换即可实现模式解复用,并且利用各个端口输出光功率的比值分析了该结构实现模式解复用的效果。最后,研究了结构参数变化对器件性能的影响。

## 2 模式复用解复用器的结构

将3根普通的康宁SMF-28单模光纤进行拉锥处理,使其成为纤芯与包层直径均不相同的单模光纤,再将它们嵌套进入1根掺氟的石英毛细管中进行熔融拉锥。由于毛细管的熔点比光纤的熔点低,所以首先对毛细管进行拉锥使其紧密包裹着3根光纤,再用较高的温度将光纤与毛细管一同拉锥,其结构示意图如图1(b)所示。本文主要是对其中锥形部分即图中0~4 cm部分进行仿真,将该结构进行简化后,可得图1(a)和1(c)。它们分别为模式复用器的输入端口和输出端口,输出端口与输入端口直径按1:6.8拉锥,锥形结构长度为3.88 cm,具体结构参数如表1所示。

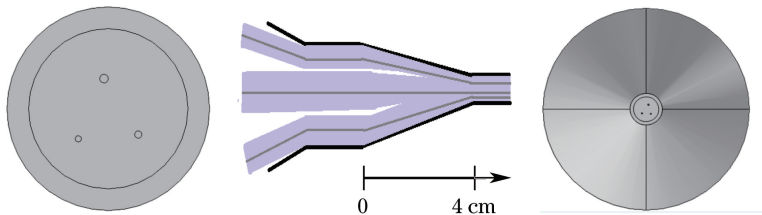


图1 光纤与掺氟毛细管融合后形成的锥形结构。(a) 模式复用器输入端口; (b) 结构示意图; (c) 模式复用器输出端口  
Fig. 1 Tapered structure made by fusing and tapering fibers in an F-doped capillary. (a) Input port of the mode multiplexer; (b) schematic of structure; (c) output port of the mode multiplexer

表1 锥形复用器参数

Table 1 Parameters of tapered multiplexer

Index	Input port	Output port
Diameter of F-doped capillary / $\mu\text{m}$	236	34.7
Diameter of silica cladding / $\mu\text{m}$	186	27.34
Diameters of three cores in SMFs / $\mu\text{m}$	10,8.4,7.2	1.47,1.24,1.06
Coordinate of core 1(10 $\mu\text{m}$ ) / $\mu\text{m}$	(5,35)	(2.5,5)
Coordinate of core 2(8.4 $\mu\text{m}$ ) / $\mu\text{m}$	(36,-24)	(5,-5)
Coordinate of core 3(7.2 $\mu\text{m}$ ) / $\mu\text{m}$	(-32,-20)	(-4.5,-4.5)
Refractive index of F-doped capillary	1.4606	
Refractive index of silica cladding	1.4578	
Refractive index of core	1.4352	
Length of the mode multiplexer /cm	3.88	

复用器的输出端为少模光纤,它的束缚模包括基模  $LP_{01}$  和二阶模  $LP_{11}$  模式, $LP_{11}$  模又包括  $LP_{11a}$  和  $LP_{11b}$  两种。图 2 是它们的电场分布,显然  $LP_{11a}$  和  $LP_{11b}$  的偏振态是正交的。本研究的模式复用器是将 3 个单模光纤输入的  $LP_{01}$  模式分别转换为少模光纤的这 3 个模式,并在少模光纤中传输;模式解复用器则将少模光纤中的 3 个束缚模式分别转换为 3 个  $LP_{01}$  模式,并进入不同的单模光纤传输。

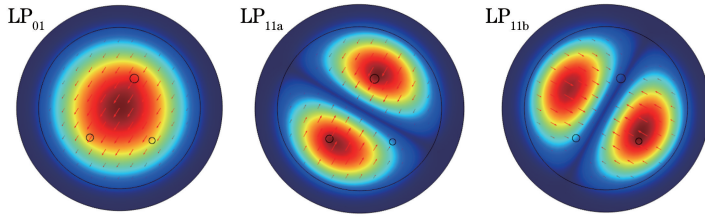
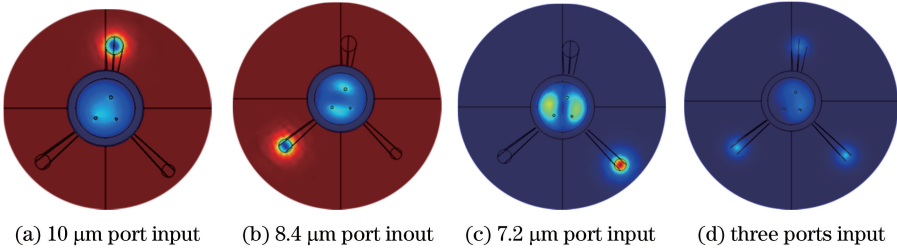


图 2 少模光纤的束缚模式的电场分布

Fig. 2 Electric field distributions of propagation modes in FMF

### 3 模式复用

在模式复用器输入端,纤芯直径分别为  $10$ 、 $8.4$ 、 $7.2 \mu\text{m}$  的单模光纤单独输入基模,模式光场在锥形结构中耦合,输出光场如图 3(a)~(c)所示。3 路单模光纤同时输入基模时,输出端光场如图 3(d)所示。图 3 展示的锥形模式复用器采用面积较大的圆形截面作为入射面,中间面积较小的圆形截面作为出射面。由光斑形状可以看出,直径  $10 \mu\text{m}$  端口输入的基模转换为输出端的基模;直径  $8.4 \mu\text{m}$  和  $7.2 \mu\text{m}$  端口输入的基模转换为二阶模  $LP_{11a}$  和  $LP_{11b}$ 。因此,该器件实现了基模向  $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 、 $LP_{11b}$  3 种模式的转换和复用。



(a)  $10 \mu\text{m}$  port input (b)  $8.4 \mu\text{m}$  port input (c)  $7.2 \mu\text{m}$  port input (d) three ports input

图 3 模式复用器输入端输入基模后输出端的光场

Fig. 3 Output light fields of mode multiplexer after fundamental mode transmitting

为了定量鉴别模式复用器输出端的光场,对输出光场与对应的模式场进行重叠积分,计算结果越接近 1,表明两个模式越相似。计算公式为

$$K = \frac{\left| \iint (E_{1x} \cdot E_{2x} + E_{1y} \cdot E_{2y}) dx dy \right|^2}{\iint |E_{1x}^2 + E_{1y}^2| dx dy \cdot \iint |E_{2x}^2 + E_{2y}^2| dx dy}, \quad (1)$$

式中  $K$  为重叠积分计算值, $E_{1x}$ 、 $E_{2x}$  分别表示模式 1、2 模式场的  $x$  分量电场, $E_{1y}$ 、 $E_{2y}$  分别表示模式 1、2 模式场的  $y$  分量电场,积分区域为光纤横截面。

将图 3 所得到的输出端光场与标准的  $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 、 $LP_{11b}$  3 个模式场进行重叠积分计算,结果如表 2 所示。各端口与 3 个模式的重叠积分计算结果中, $10 \mu\text{m}$  端口输出光场与  $LP_{01}$  模式重叠积分最大为 0.9034;  $8.4 \mu\text{m}$  端口输出光场与  $LP_{11a}$  模式重叠积分最大为 0.6176;  $7.2 \mu\text{m}$  端口输出光场与  $LP_{11b}$  模式重叠积分最大为 0.5080。由此可以确定从 3 个端口输入的  $LP_{01}$  模式分别转换为了  $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 、 $LP_{11b}$  3 个模式。

表 2 复用器输出端光场与标准模式场重叠积分计算

Table 2 Overlap integral of output electric field of mode multiplexer with standard mode field

Diameter of port input	$LP_{01}$	$LP_{11b}$	$LP_{11a}$
$10 \mu\text{m}$	0.9034	0.0737	0.0799
$8.4 \mu\text{m}$	0.1404	0.6167	0.4650
$7.2 \mu\text{m}$	0.0068	0.2856	0.5080

## 4 模式解复用

根据光路的可逆性原理,解复用器的结构和复用器的结构是相同的,将复用器的输入端和输出端调换即可实现解复用,由少模光纤输入基模和 LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>模式,经过锥形结构实现模式转换,由 3 个单模光纤分别输出对应的基模。当输入端分别输入 3 个模式后,输出端的光场如图 4 所示。从图中看出输出端除了对应端口有光输出,其他 2 个端口也有光输出,因此为了更好地分析该结构是否能够实现解复用,计算了输入端输入各个模式场后,输出端 3 个端口的光场的振幅的比值。

光场振幅计算公式为

$$E = \iint (E_x^2 + E_y^2) dx dy. \quad (2)$$

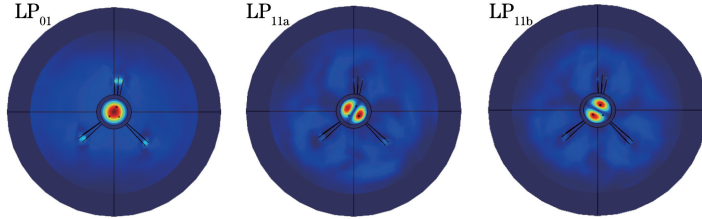


图 4 3 个不同模式输入时,模式解复用器输出端的光场图

Fig. 4 Output light fields of mode demultiplexer with three injected modes

图 5 为解复用器输入端输入各个模式后,在距离输出端不同位置处各个端口的光功率比值。当解复用器输入端分别输入 3 个模式时,输出端对应的 3 个端口输出的光功率最大,即实现解复用。从图 5 看出,距离解复用器输出端 0.1069 cm 处即长度为 3.8931 cm 的解复用效果最好,3 个模式分别进行解复用后,3 个输出端口输出的光功率比值分别为 0.7428:0.1110:0.1462、0.2965:0.2619:0.4416、0.3015:0.4445:0.245。当解复用器的长度小于 3.8 cm 时,LP<sub>11a</sub>和 LP<sub>11b</sub>模式经过模式转换后,大部分的能量都将从直径为 7.2 μm 端口处输出。

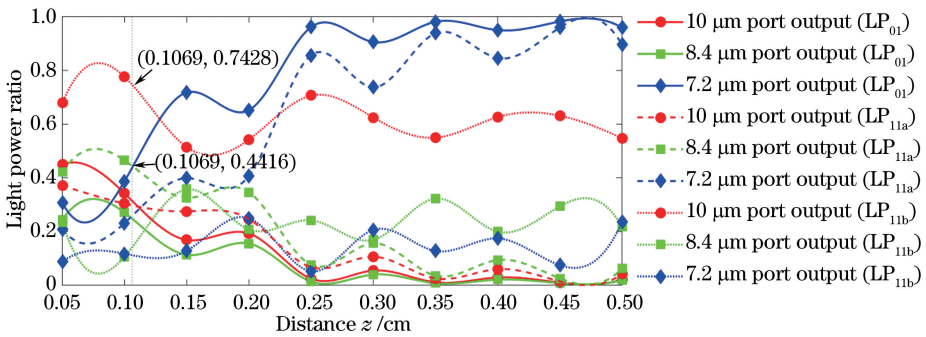


图 5 3 个模式解复用后 3 个输出端的光功率比值

Fig. 5 Light power ratios of output ends of three mode demultiplexers after 3 modes transmission

## 5 结构容差

由于实际生产中不能保证制造无误差,所以有必要讨论复用器结构参数的改变对锥形复用器模式鉴别功能的影响。只有在保证各参数的微小改变对整个器件的功能影响不大的情况下,整个设计才有意义。在不改变锥角的前提下,研究了将复用器的拉锥长度  $L$  由 3.88 cm 改为 4 cm 后,输出端的光场图,如图 6 所示,并利用(1)式计算了它们各自的重叠积分。

由于输出端光场与标准模式场会存在一定的角度差,因此在计算重叠积分时需要旋转输出端光场。从图 6 中输出端光场可以看出,模式复用器依然可以完成基模向 LP<sub>01</sub>、LP<sub>11a</sub>、LP<sub>11b</sub> 3 种模式的转换以及复用。通过重叠积分计算得到 3 个光场与其各自对应的标准的模式场的相似度,分别为 0.5769、0.6924、0.3418。与长度 3.88 cm 的模式复用器输出端光场和相对应的模式场重叠积分结果相比较,可知改变拉锥长度对输

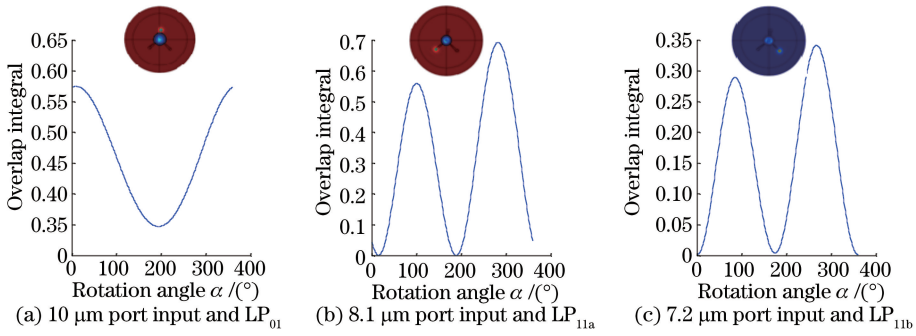


图 6  $L = 4$  cm 模式复用器输入基模后输出端的光场以及与各自对应的标准模式场的重叠积分计算

Fig. 6 Light field of 4 cm-long mode multiplexer output after fundamental mode transmitting and its overlap integral with standard mode field

出端的模式场没有太大的改变,但是重叠积分计算值要小一些,说明该长度下的模式复用器实现模式转换的效果没有 3.88 cm 长的好。

在不改变锥角的情况下,以 0.05 cm 为步长,将模式复用器的拉锥长度改变 0.5 cm,对输出端的光场与其相对应的标准模式场进行重叠积分计算,可得结果如图 7 所示。由图看出,改变拉锥长度对各个端口输入的模式转换影响不大;另外拉锥长度为 3.5 cm~4 cm 时,模式复用器都能实现基模向 3 种不同模式的转换。

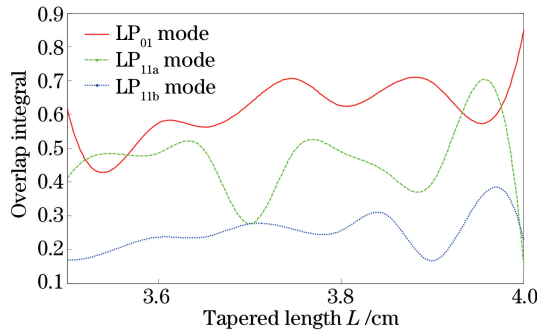


图 7 复用器拉锥长度对输出端光场与其相对应的标准模式场重叠积分的影响

Fig. 7 Effect of tapered length of the multiplexer on overlap integral of each output light field of mode multiplexer with standard mode field

## 6 结 论

对一种 3 个模式的锥形光纤模式复用/解复用器进行理论分析,研究了它的模式复用和解复用的特性,并对它的结构容差进行了分析。结果表明:该模式复用器可实现基模向  $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 、 $LP_{11b}$  3 种模式的转换和复用,利用重叠积分计算可以得到该模式复用器在拉锥长度 3.88 cm 时的模式转换效果最好,3 个模斑和其相对应的标准模式的相似度分别为 0.8991、0.6834、0.5080;改变拉锥长度对直径为 10  $\mu\text{m}$  及 8.4  $\mu\text{m}$  端口输入的模式转换并没有太大的影响,但是对直径为 7.2  $\mu\text{m}$  端口输入的模式转换影响较大;利用相同的结构实现了模式解复用,解复用器的长度为 3.8931 cm 处解复用的效果最好。该设计对于由更多单模光纤熔融拉锥成的锥形光器件的设计和更多电磁波模式的鉴别分离的实现具有指导意义,同时有利于进一步提升光纤模式复用系统的传输信息容量。

## 参 考 文 献

- Li A, Chen X, Al Amin A, *et al.*. Space-division multiplexed high-speed superchannel transmission over few-mode fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(24): 3953-3964.
- Zhang Yongsheng, Xie Zhiguo, Zheng Rongsheng, *et al.*. Mode coupling in polymer optical fiber and its enhancement to transmission bandwidth[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(9): 1234-1238.

- 张永生, 谢志国, 郑荣升, 等. 聚合物光纤中的模式耦合及其对带宽的提高[J]. 中国激光, 2006, 33(9): 1234-1238.
- 3 Ryf R, Randel S, Gnauck A H, *et al.*. Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent  $6 \times 6$  MIMO processing[C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2011: 1-3.
- 4 Randel S, Ryf R, Sierra A, *et al.*.  $6 \times 56$ -Gb/s mode-division multiplexed transmission over 33-km few-mode fiber enabled by  $6 \times 6$  MIMO equalization[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16697-16707.
- 5 Gu Zhengtian, Lan Jinlong. Design optimization of coated long-period fiber grating based on mode transition[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0105007.  
顾铮先, 蓝锦龙. 基于模式转换的镀膜长周期光纤光栅传感器的结构优化设计[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0105007.
- 6 Gu Zhengtian, Lan Jinlong. Mode transition and refractive index response in long-period fiber grating coated with double-layer overlays including metal film[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0406005.  
顾铮先, 蓝锦龙. 镀金属两层膜系长周期光纤光栅模式转换与折射率响应[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0406005.
- 7 Zhu Xiaoliang, Sun Weimin, Yan Qi. Investigation of astronomical fiber mode converter[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s106003.  
朱晓亮, 孙伟民, 闫 奇. 天文光纤模式转换器的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s106003.
- 8 Chang Yuxin, Hu Guijun, Bai Song, *et al.*. Research of asymmetric planar waveguide type mode division multiplexer/demultiplexer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1205004.  
常玉鑫, 胡贵军, 柏 松, 等. 非对称平面光波导型模式复用/解复用器研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1205004.
- 9 Genevaux P, Simonneau C, Labroille G, *et al.*. 6-mode spatial multiplexer with low Loss and high selectivity for transmission over few mode fiber[C]. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2015: W1A.5.
- 10 Birks T A, Mangan B J, Díez A, *et al.*. "Photonic lantern" spectral filters in multi-core fiber[J]. Optics Express, 2012, 20(13): 13996-14008.
- 11 Yerolatsitis S, Gris-Sánchez I, Birks T A. A diabatically-tapered fiber mode multiplexers[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 608-617.