

熔融拉锥型全光纤多模式复用器/解复用器研究

陆少凡, 肖悦娱, 蒋晓勇

上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072

摘要 提出了一种基于并联结构的多模式复用器/解复用器。该多模式复用器/解复用器由一根少模光纤和两根单模光纤构成。根据有效折射率匹配原则确定了光纤参数, 仿真分析了不同芯间距对多模式复用器/解复用器性能的影响, 得出最佳芯间距。仿真分析了该多模式复用器/解复用器对应的工作波长带宽。结果表明: 该多模式复用器/解复用器不需要结合模式转换器即可实现 LP₀₁、LP₁₁ 和 LP₀₂ 三种模式的复用, 最佳耦合区长度为 4530 μm, 工作波长带宽可达 60 nm。

关键词 光纤光学; 多模式复用器/解复用器; 模式转换器; 少模光纤; 波长带宽; 熔融拉锥

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0706002

Research on Fused Taper All Fiber Multi-Mode Multiplexer/De-Multiplexer

Lu Shaofan, Xiao Yueyu, Jiang Xiaoyong

Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract We design a multi-mode multiplexer/de-multiplexer based on parallel mode couplers. The multi-mode multiplexer/de-multiplexer consists of two single mode fibers and a few-mode fiber. According to the effective refractive index matching principle, the parameters of fiber are determined. The influence of different core distances on the performance of multi-mode multiplexer/de-multiplexer is analyzed, and the optimum core distance is determined. The working wavelength bandwidth corresponding to the multi-mode multiplexer/de-multiplexer is analyzed. Simulation results show that the multi-mode multiplexer/de-multiplexer can achieve the multiplexing of LP₀₁, LP₁₁ and LP₀₂ modes without the need of a mode converter, the optimal coupling length is 4530 μm, and the wavelength bandwidth is 60 nm.

Key words fiber optics; multi-mode multiplexer/de-multiplexer; mode converter; few-mode fiber; wavelength bandwidth; fused taper

OCIS codes 060.1810; 060.4230; 060.2330

1 引 言

随着社会信息化程度的不断提高, 从 2010 年起网络流量呈现爆炸式的发展趋势。近年来, 为了提高传输容量, 光波在单模光纤(SMF)中的频率、偏振、幅度和相位等自由度都已经被开发^[1], 传输系统容量已接近 SMF 传输的香农极限^[2]。少模光纤(FMF)中有限的正交模式作为独立信道进行模式传

输, 可以成倍地提高系统传输容量^[3], 因此基于 FMF 的模式复用器/解复用器得到研究人员的青睐。

在模式复用系统中, 模式复用器/解复用器是最关键的部分。不同类型的模式复用器/解复用器不断被提出, 主要有块状自由空间光学^[4-5]、波导耦合器^[6-7]、光栅耦合器复用^[8]、光子灯笼^[9]、光纤耦合器^[10]等。基于块状自由空间光学的模式复用器/解复用器虽然结构简单, 但是体积较大难于集成, 具有

收稿日期: 2018-01-31; 收到修改稿日期: 2018-02-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61107075)

作者简介: 陆少凡(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事全光纤多模式复用器/解复用器方面的研究。

E-mail: lushaofansonia@foxmail.com

导师简介: 肖悦娱(1977—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事特种光纤与光纤传感系统方面的研究。

E-mail: xyy@staff.shu.edu.cn(通信联系人)

较高的插入损耗,不适于工业生产使用;基于波导技术的模式复用器/解复用器虽然可以降低器件对波长的依赖性,但是其结构和光纤结构不匹配,会造成较大的插入损耗。全光纤模式复用器/解复用器因其具有尺寸小,采用复用器接口,其传输光纤匹配度高可以极大降低插入损耗等优势,近几年得到快速发展。

目前全光纤模式复用器/解复用器主要有基于熔融拉锥的模式选择耦合器、基于绝热转换的光纤光子灯笼^[11]、基于多芯光纤的模式复用/解复用器^[12]、基于光纤光栅的模式复用器/解复用器^[13]等。基于熔融拉锥的耦合器技术是目前最成熟的光纤器件技术之一,具有很好的市场前景。Tsekrekos等^[14]采用FMF与FMF的熔融拉锥耦合器,通过级联方式实现了6种模式的复用,不足之处是需要配合匹配的模式转换器才能完成6种模式的复用,且该器件实现LP₁₁、LP₀₂和LP₀₁的复用耦合区总长度需达到2.15 cm。李安等^[15]提出了基于传播常数匹配原则的模式选择耦合器,可将SMF的LP₀₁模转换为FMF中的LP_{11a}和LP_{11b}

模,该结构不足之处是需要多个耦合器的级联来实现多种模式的复用。

基于此,本文提出一种并联型的FMF模式复用器/解复用器,可在不使用模式转换器的情况下实现三种模式的复用。仿真研究表明:在两个SMF输入端口输入基模,可同步实现LP₁₁和LP₀₂两种模式在FMF中的复用。

2 多模式复用器/解复用器的工作原理

熔融拉锥型的光纤模式复用器/解复用器结构如图1所示,由两根SMF(SMF1,SMF2)和一根FMF组成。输入端有port1、port2和port3三个端口,输出端有port4、port5和port6三个端口。结构中包含两个由SMF和FMF组成的耦合器,一个耦合器实现port1中模式LP₀₁向模式LP₁₁的转换;另一个耦合器实现port2中注入模式LP₀₁向模式LP₀₂的转换。通过合理的结构设计,该模式复用器/解复用器可实现从三个输入端口输入基模,分别转换为FMF中的LP₀₁、LP₁₁和LP₀₂模,并同时由port5输出或传输到后续光路。

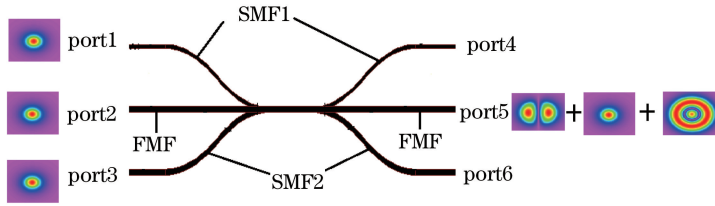


图1 多模式复用器/解复用器结构图

Fig. 1 Structure of the multi-mode multiplexer/de-multiplexer

图1中,假设光纤是无吸收的,耦合系统是三根光纤组成的无损耗系统,则该耦合系统的耦合波方程^[15-16]为

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} a_1^{01}(z) \\ a_2^{11}(z) \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} \beta_1^{01} & \kappa_1 \\ \kappa_1 & \beta_2^{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1^{01}(z) \\ a_2^{11}(z) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} a_3^{01}(z) \\ a_2^{02}(z) \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} \beta_3^{01} & \kappa_2 \\ \kappa_2 & \beta_2^{02} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_3^{01}(z) \\ a_2^{02}(z) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $a_i^{mn}(z)$ ($i=1,2,3$)为耦合区内LP_{mn}模式在第*i*根光纤内*z*处的场振幅; β_1^{01} 为耦合区内SMF1中的基模的传播常数; β_2^{11} 和 β_2^{02} 为耦合区内轴心FMF中LP₁₁模式和LP₀₂模式的传播常数; β_3^{01} 为耦合区内SMF2中基模的传播常数; κ_i ($i=1,2$)为SMF与相邻FMF之间的耦合系数。耦合系数 κ_i 和光纤芯间距有关,光纤芯间距的改变会对复用器的长度和效率产生影响。

3 多模式复用器/解复用器的设计

本研究提出的3×3模式复用器/解复用器由两根SMF和一根FMF采用熔融拉锥工艺制作,三根光纤采用一字型平行排列,如图2所示。图2(a)为耦合区结构示意图,图2(b)为光纤截面图,其中蓝色代表SMF2,黄色代表FMF,绿色代表SMF1。SMF1和SMF2纤芯直径均为5.68 μm,FMF纤芯直径为18.48 μm;三根光纤包层直径均为125 μm。三根光纤的包层折射率为 $n_{cladding} = 1.4571$,采用FMF的纤芯折射率为1.46805,SMF1和FMF芯间距为 d_1 ,SMF2和FMF芯间距为 d_2 。

为实现SMF中基模到FMF中高阶模式的转换,需满足相位匹配条件。这里仅考虑光纤结构均匀的耦合区,利用COMSOL软件,采用纤芯、包层、完全匹配层所组成的三层系统,分别计算了在

1550 nm波长下 FMF 中 LP_{11} 和 LP_{02} 模式的有效折射率, 分别为 $n_{\text{eff},LP_{11}} = 1.465377$ 和 $n_{\text{eff},LP_{02}} = 1.461877$ 。根据 SMF1 和 SMF2 中基模 LP_{01} 的有

效折射率分别与 FMF 中 LP_{11} 模式和 LP_{02} 模式的有效折射率相等的原则, 最终确定 SMF1 和 SMF2 及 FMF 的参数^[17], 详见表 1。

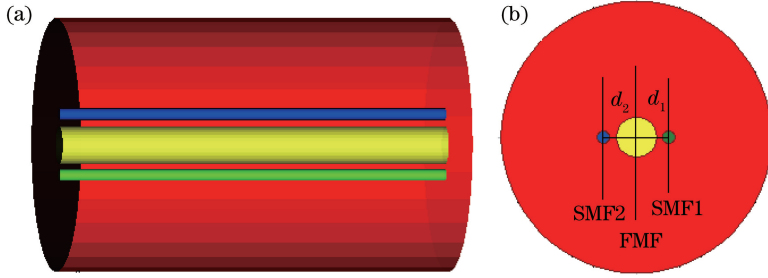


图 2 多模式复用器/解复用器示意图。(a)耦合区结构;(b)耦合区端面

Fig. 2 Schematic of multi-mode multiplexer/de-multiplexer. (a) Structure of coupling area; (b) cross section of coupling area

表 1 多模式复用器/解复用器中 SMF 和 FMF 参数
Table 1 Parameters of SMF and FMF in multi-mode multiplexer/de-multiplexer

Parameter	Value		
	SMF1	FMF	SMF2
Core diameter / μm	5.68	18.48	5.68
Cladding diameter / μm	125	125	125
n_{core}	1.47241	1.46805	1.469
n_{cladding}	1.4571	1.4571	1.4571

当 SMF1 和 SMF2 中的基模 LP_{01} 分别与 FMF 中的 LP_{11} 模式、 LP_{02} 模式达到模式匹配条件时, 将基模 LP_{01} 分别输入 SMF1 和 SMF2 中, 芯间距 d_1 和 d_2 的取值会影响 FMF 中 LP_{11} 模式和 LP_{02} 模式的耦合长度及耦合效率。为了确定最佳的芯间距 d_1 和 d_2 , 利用 Rsoft 软件中的光束传播法进行数值研究。

由于 FMF 中的 LP_{11} 模式、 LP_{02} 模式的有效折射率的数值不接近, 因此 FMF 中的 LP_{11} 模式不会和 SMF2 中的基模 LP_{01} 发生模式耦合, FMF 中的 LP_{02}

模式不会和 SMF1 中的基模 LP_{01} 发生模式耦合, 即 LP_{11} 模式和 LP_{02} 模式转换的两个耦合器互不影响。

由于 LP_{02} 模式和 LP_{21} 模式在 FMF 中的有效折射率相差较小, 因此需要通过选择合适的芯间距 d_2 来实现 LP_{02} 模式和 LP_{21} 模式的分离。图 3(a) 为当入射波长为 1550 nm 时, LP_{02} 模式和 LP_{21} 模式的耦合效率随芯间距 d_2 的变化关系, 仿真时选择芯间距 d_2 在 12.4~16.0 μm 范围内变化, 耦合区长度为 10000 μm 。从图中可以看出, FMF 中的 LP_{02} 模式的耦合效率随着芯间距 d_2 的增大逐渐增加, 而 LP_{21} 模式的耦合效率则逐渐减小。当芯间距 d_2 小于 15.2 μm 时, FMF 中会有 LP_{21} 模式的存在, 此时会降低转换得到的 LP_{02} 模式的纯度; 随着芯间距 d_2 的增加, LP_{21} 模式的能量逐渐降低, 当芯间距大于 15.2 μm 后, LP_{21} 模式能量趋近于 0, 相对于 LP_{02} 模式而言可以忽略不计。为了保证 FMF 中的 LP_{02} 模式的纯度, 取 SMF2 和 FMF 的芯间距 d_2 大于 15.2 μm 。图 3(b) 是波长为 1550 nm 时, LP_{11} 模式

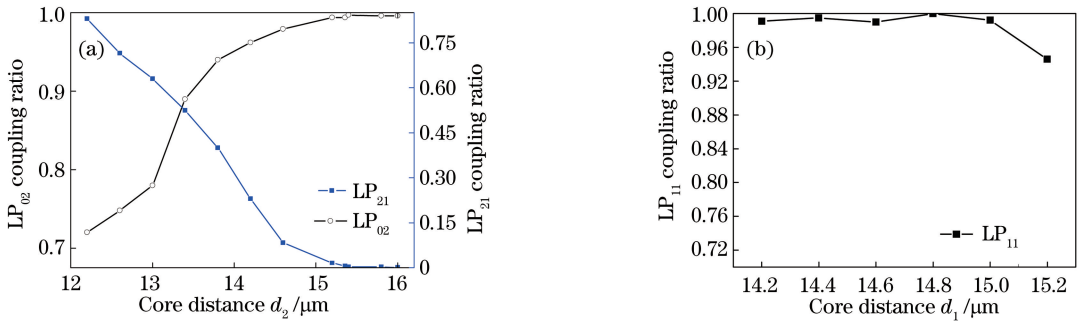


图 3 耦合效率随芯间距的变化关系曲线。(a) LP_{21} 模式和 LP_{02} 模式的耦合效率随芯间距 d_2 的变化关系曲线; (b) LP_{11} 模式的耦合效率随芯间距 d_1 的变化关系曲线

Fig. 3 Coupling ratio as a function of core distance. (a) Coupling ratio of LP_{21} mode and LP_{02} mode as a function of core distance d_2 ; (b) coupling ratio of LP_{11} mode as a function of core distance d_1

的耦合效率随芯间距 d_1 的变化关系曲线。从图中可以看出, FMF 中的 LP_{11} 模式的耦合效率在芯间距 d_1 取值为 $14.2 \sim 15.0 \mu\text{m}$ 范围内均可达到 99% 以上, 芯间距 d_1 取值大于 $15.0 \mu\text{m}$ 后, 随着芯间距 d_1 增加, LP_{11} 模式的耦合效率降低。为了保证 FMF 中的 LP_{11} 模式有较高的耦合效率, 取 SMF1 和 FMF 的芯间距 d_1 小于 $15.0 \mu\text{m}$ 。

图 4 为 LP_{11} 模式和 LP_{02} 模式的耦合长度与芯间距的关系。若 SMF1、SMF2 和 FMF 选择相同的芯间距, 则 LP_{11} 模式转换所需的耦合长度大于 LP_{02} 模式转换所需的耦合长度, 为了使 LP_{11} 模式和 LP_{02} 模式在 FMF 中能够实现最大效率的复用, 需要满足 LP_{11} 模式和 LP_{02} 模式的耦合长度相等。取芯间距 $d_2 = 15.36 \mu\text{m}$, 此时 SMF1 和 FMF 芯间距 d_1 应取 $14.8 \mu\text{m}$, 如图 4 中虚线所示。

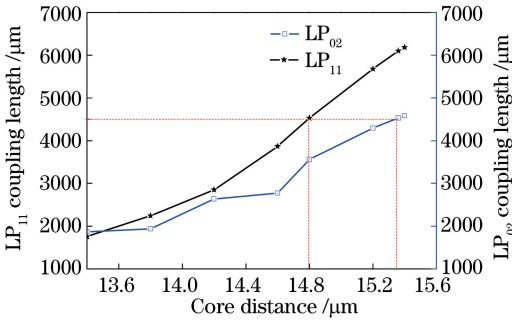


图 4 耦合长度随芯间距的变化关系曲线

Fig. 4 Coupling length as a function of core distance

4 多模式复用器/解复用器性能分析

4.1 多模式复用器/解复用器工作波长的数值仿真及性能比较

根据上述仿真结果, 取最佳芯间距 $d_1 = 14.8 \mu\text{m}$, $d_2 = 15.36 \mu\text{m}$ 。利用 Rsoft 软件仿真得到在 1550 nm 波长下, FMF 中耦合得到的 LP_{11} 模式和转换得到的 LP_{02} 模式的能量随传输距离的变化关系曲线如图 5 所示, 从图中可以看出, LP_{11} 模式和 LP_{02} 模式的耦合曲线基本重叠, 从而证明了上述选择的芯间距 d_1 和 d_2 能够保证 LP_{11} 模式和 LP_{02} 模式在 FMF 中同时实现最高效率的复用, FMF 中注入的 LP_{01} 模式的能量一直保持在 95% 以上。在耦合区长度为 $4530 \mu\text{m}$ 时, FMF 中耦合得到的 LP_{11} 模式和 LP_{02} 模式的能量均能达到最大值, LP_{11} 模式和 LP_{02} 模式的耦合效率均可以达到 99.7% 以上, 因此该器件能够在不需要模式转换器的情况下直接实现 LP_{01} 、 LP_{02} 和 LP_{11} 三种模式的复用, 且实现复用

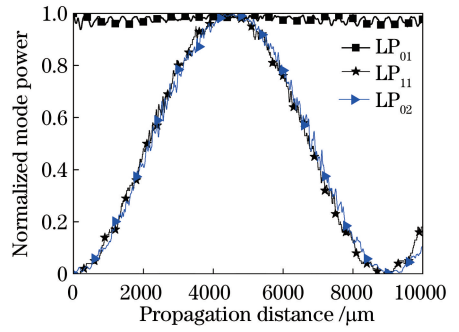


图 5 1550 nm 波长下 FMF 中 LP_{01} 、 LP_{11} 和 LP_{02} 模式的能量与传输距离之间的关系
Fig. 5 Power of LP_{01} , LP_{11} and LP_{02} modes as a function of the propagation distance with the wavelength of 1550 nm

的耦合区的最佳长度仅为 $4530 \mu\text{m}$ 。

图 6 为在 1550 nm 工作波长下, 模式复用的能量流动二维示意图。图 6 右侧曲线展示了当在 SMF 中注入基模 LP_{01} 后, SMF2 和 SMF1 中的基模 LP_{01} 以及 FMF 中转换得到的 LP_{11} 模式和 LP_{02} 模式的能量变化, 从曲线图中可知在传输距离为 $4530 \mu\text{m}$ 处, SMF2 和 SMF1 中的基模能量完全转换为 FMF 中的 LP_{11} 模式和 LP_{02} 模式, 同步完成 LP_{11} 模式和 LP_{02} 模式的复用, 当传输距离大于 $4530 \mu\text{m}$ 时, FMF 中的能量又再次耦合进入 SMF1 和 SMF2 中。因为模式复用器和模式解复用器具有对称性, 当 FMF 中输入复用的 LP_{11} 和 LP_{02} 模式时, 经过耦合区会将 LP_{11} 和 LP_{02} 模式分别转换 SMF1 和 SMF2 中的基模, 实现模式解复用的功能。

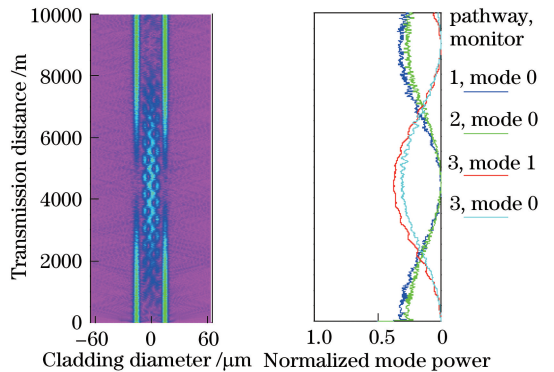


图 6 1550 nm 波长下, 模式复用器的能量流动二维示意图
Fig. 6 Two-dimensional sketch of power flow for mode multiplexer with the wavelength of 1550 nm

图 7 为 LP_{11} 与 LP_{02} 模式的耦合效率与工作波长的关系曲线, 仿真的波长范围为 $1510 \sim 1610 \text{ nm}$ 。从图中可以看出, 两种模式的耦合效率随工作波长的增加都呈先升后降的趋势, 在 1550 nm 波长处, LP_{02} 模式

的耦合效率达到99.7%，LP₁₁模式的耦合效率达到99.9%。LP₁₁模式的耦合效率随波长变化相比LP₀₂更明显。定义耦合效率大于80%为模式复用器/解复用器的工作波长带宽。LP₁₁模的波长范围为1522~1582 nm，带宽达到60 nm，因此，所设计的多模式复用器/解复用器工作波长带宽为60 nm。

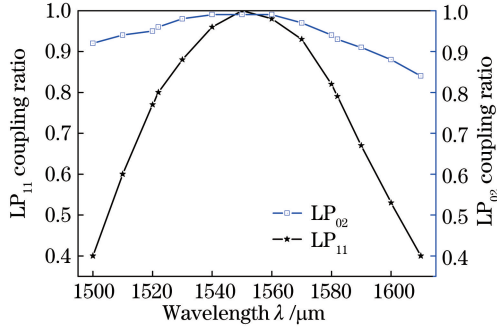


图7 LP₀₂和LP₁₁模式的耦合效率与工作波长的关系
Fig. 7 Coupling ratio of LP₀₂ and LP₁₁ modes as a function of wavelength

经过上述分析可知，所设计的多模式复用器/解复用器可实现两种模式的转换和三种模式的复用，工作波长带宽可以达到60 nm，最佳耦合区的长度为4530 μm。表2对比了几种全光纤模式复用器/解复用器的性能，从表中可以看出，所提出的多模式复用器/解复用器不需要模式转换器，采用两个耦合器并联的结构降低了模式复用器耦合区的长度。

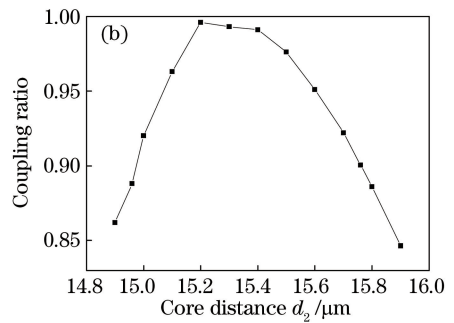
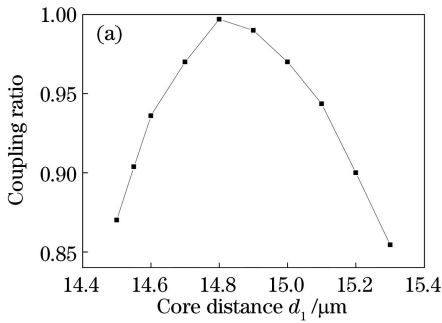


图8 多模式复用器/解复用器的容差分析。(a) LP₁₁耦合效率与芯间距d₁的关系；(b) LP₀₂耦合效率与芯间距d₂的关系
Fig. 8 Tolerance analysis of multi-mode multiplexer/de-multiplexer. (a) Coupling ratio of LP₁₁ mode as a function of core distance d₁; (b) coupling ratio of LP₀₂ mode as a function of core distance d₂

分析多模式复用器/解复用器的参数容差范围可知，耦合区长度的容差相对于最佳耦合区长度4530 μm可以达到-906~+896 μm，芯间距d₁的容差相对于所选取的d₁的数值14.8 μm可以达到-0.25~+0.4 μm；芯间距d₂的容差范围相对于所采用的d₂的数值15.36 μm可以达到-0.39~+0.4 μm。对于本设计的多模式复用器/解复用器

表2 与现有模式复用器的性能比较
Table 2 Performance comparison with existing mode multiplexers

Fiber type	Need mode converter	Coupling length / μm	Mode type
Fiber multiplexer in this paper	No	4530	LP ₀₁ , LP ₀₂ , LP ₁₁
Fused fiber mode coupler ^[15] Symmetric	Need	8520	LP ₀₁ , LP _{11a} , LP _{11b}
FMF coupler ^[14]	Need	21500	LP ₀₁ , LP _{11a} , LP ₀₂

4.2 多模式复用器/解复用器的容差分析

由于器件在制造过程中存在误差，加工尺寸可能达不到理论尺寸，因此一个器件的容差范围对于器件而言非常重要。在1550 nm工作波长下，讨论了模式复用器耦合效率在90%以上时，制造过程中允许的制造容差范围。由图5可知，当两种模式的耦合效率大于90%时，对应的传输长度为3624~5426 μm，即耦合区长度变化在最佳耦合区长度的±19.9%的范围内，两种模式的耦合效率仍在90%以上。图8为LP₁₁和LP₀₂模式的耦合效率随芯间距d₁和d₂的变化曲线。从图中可知，LP₁₁模式的耦合效率达到90%以上时，芯间距d₁的取值为14.55~15.2 μm，LP₀₂模式的耦合效率达到90%以上时，芯间距d₂的取值为14.97~15.76 μm。

耦合长度、芯间距d₁和芯间距d₂均能允许一定的容差范围。

5 结 论

设计了一种基于并联结构的熔融拉锥型全光纤多模式复用器/解复用器，并对模式复用器/解复用器的结构和性能参数进行了研究。研究结果表明：

该结构的模式复用器/解复用器在 1522~1582 nm 波长范围内 LP₁₁ 模式的耦合效率可以达到 80% 以上, LP₀₂ 模式的耦合效率在 93% 以上。该模式复用器/解复用器能够在不使用模式转换器的情况下同时实现三种模式的复用, 两个耦合器并联的结构可有效缩短耦合区的长度。

参 考 文 献

- [1] Wu R, Hu Y W, Yue Y L. Simulation on slow light effect of dense wavelength division multiplexer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55 (4): 040605.
吴蓉, 胡延伟, 岳云龙. 密集波分复用器慢光效应仿真研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55 (4): 040605.
- [2] Chang S H, Chung H S, Ryf R, *et al.* Mode- and wavelength-division multiplexed transmission using all-fiber mode multiplexer based on mode selective couplers [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (6): 7164-7172.
- [3] Fang Y, Hu G J, Gong C L, *et al.* Mode demultiplexing based on cascaded independent component analysis for mode division multiplexing system with high mode group delay [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0806001.
方妍, 胡贵军, 宫彩丽, 等. 高模式群时延模分复用系统的级联独立成分分析解复用技术研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0806001.
- [4] Xiao Y L, Liu Y G, Wang Z, *et al.* Design and experimental study of mode selective all-fiber fused mode coupler based on few mode fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(20): 204207.
肖亚玲, 刘艳格, 王志, 等. 基于少模光纤的全光纤熔融模式选择耦合器的设计及实验研究 [J]. *物理学报*, 2015, 64(20): 204207.
- [5] Li J H, Ren F, Hu T, *et al.* Recent progress in mode-division multiplexed passive optical networks with low modal crosstalk [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 35: 28-36.
- [6] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, *et al.* Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6 × 6 MIMO processing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 521-531.
- [7] Hanzawa N, Saitoh K, Sakamoto T, *et al.* Two-mode PLC-based mode multi/demultiplexer for mode and wavelength division multiplexed transmission [J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 25752-25760.
- [8] Chang Y X, Hu G J, Bai S, *et al.* Research of asymmetric planar waveguide type mode division multiplexer/demultiplexer [J]. *Chinese Journal of 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] You B, Jia H Z, Tu J K. A novel mode multiplexer [J]. *Optical Instruments*, 2016, 38(5): 466-470.
尤贝, 贾宏志, 涂建坤. 一种新型的模式复用器 [J]. *光学仪器*, 2016, 38(5): 466-470.
- [10] Eznaveh Z S, Antonio-Lopez J E, Zacarias J C A, *et al.* All-fiber few-mode multicore photonic lantern mode multiplexer [J]. *Optics Express*, 2017, 25 (14): 16701-16707.
- [11] Li H Y, Wang Z, Liu Y G, *et al.* Coupling characteristics of twin-core few-mode all-solid photonic bandgap fiber and their application in mode separation [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(9): 1811-1816.
- [12] Love J D, Riesen N. Mode-selective couplers for few-mode optical fiber networks [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(19): 3990-3992.
- [13] Tu J J, Zhang H, Li H, *et al.* Design of multi-core fiber based three-mode multiplexer/demultiplexer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0306001.
涂佳静, 张欢, 李晗, 等. 基于多芯光纤的三模复用/解复用器的设计 [J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0306001.
- [14] Tsekrekos C P, Syvridis D. Symmetric few-mode fiber couplers as the key component for broadband mode multiplexing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(10): 2461-2467.
- [15] Li A, Chen X, Amin A A, *et al.* Fused fiber mode couplers for few-mode transmission [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(21): 1953-1956.
- [16] Gasulla I, Kahn J M. Performance of direct-detection mode-group-division multiplexing using fused fiber couplers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(9): 1748-1760.
- [17] Xu Q, Huang Z M, Huang Y. Analysis of coupling power for fused biconical 2 × 6 single mode optical fiber coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(6): 751-754.
许强, 黄肇明, 黄勇. 2 × 6 熔融拉锥型单模光纤耦合器的特性分析 [J]. *光学学报*, 2005, 25(6): 751-754.