

基于多芯光纤的三模复用/解复用器的设计

涂佳静, 张 欢, 李 晗, 隆克平*

北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083

摘要 根据模式耦合理论,设计了一种基于三芯光纤并支持 LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{11b} 三种空间模式传输的三模复用/解复用器。该三芯光纤由一个位于中央的三模纤芯和两个外部的单模纤芯构成。选择三模纤芯的结构参数,根据模式有效折射率匹配原理分别设计两个外部单模纤芯的参数。通过仿真分析了 LP_{11a} 模与 LP_{01} 模、 LP_{11b} 模与 LP_{01} 模的功率转换过程,确定最优的光纤长度为 5.2 mm。在 C+L 波段中所设计的三模复用/解复用器能提供 50 nm 的工作带宽,其模式转换效率达到 90%。该基于三芯光纤的三模复用/解复用器具有结构简单、模式转换效率高、插入损耗小、带宽宽等优点。

关键词 光纤光学; 模式耦合; 模式复用/解复用器; 多芯光纤; 少模光纤

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0306001

Design of Multi-Core Fiber Based Three-Mode Multiplexer/Demultiplexer

Tu Jiajing, Zhang Huan, Li Han, Long Keping

School of Computer and Communication Engineering,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract According to the coupled mode theory, a three-core fiber based three-mode multiplexer/demultiplexer supporting to transmit three spatial modes (LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b}) is designed. This three-core fiber consists of a three-mode core located in the center and two single-mode cores deployed in the outer layer. The structural parameters of the three-mode core are chosen, and then according to the effective refractive index matching principle of mode, parameters of two single-mode cores in the outer layer are designed. The power conversion processes between LP_{11a} mode and LP_{01} mode, as well as LP_{11b} mode and LP_{01} mode, are analyzed by simulation, respectively. The optimal fiber length obtained is 5.2 mm. Finally, in C+L band, the working bandwidth provided by the three-mode multiplexer/demultiplexer is 50 nm for mode conversion efficiency of 90%. This three-core fiber based three-mode multiplexer/demultiplexer has plenty of advantages, such as simple structure, high mode conversion efficiency, small splice loss, and wide band.

Key words fiber optics; mode coupling; mode multiplexer/demultiplexer; multi-core fiber; few mode fiber

OCIS codes 060.2270; 060.2280; 060.2310; 060.2400

1 引 言

移动互联网高速增长的数据流量业务给现有网络带来了海啸般的冲击,人们迎来了大数据时代。而突发的大数据传输量需要更大的带宽和更高的传输速率,对下一代光纤传输网络提出了更高要求。在过去的 40 年中,由于一系列突破性技术的出现,单根单模光纤(SMF)的传输容量以每 4 年增加一个数量级的速率指数增长^[1]。近年,通过利用各种复用技术,例如时分复用(TDM)、波分复用(WDM)、偏分复用(PDM),以

收稿日期: 2016-08-24; **收到修改稿日期:** 2016-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(61501027)、中国博士后科学基金(2015M570934)、中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-TP-15-031A1)

作者简介: 涂佳静(1986—),女,博士,讲师,主要从事多芯光纤、少模光纤、光子晶体光纤及模式复用/解复用器等光纤波导方面的研究。E-mail: tujiajing@ustb.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: longkeping@ustb.edu.cn

及多级调制技术,例如正交振幅调制(QAM),SMF的传输系统中每根光纤的容量值已经达到了100 Tbit/s,该容量值非常接近香农理论极限。这表明以现有的光纤技术,不断增长的网络数据将在不远的将来导致传输容量危机^[2]。

为了克服当前光通信系统的容量限制,研究者们对基于多芯光纤(MCF)或少模光纤(FMF)的空分复用技术(SDM)做了大量的研究工作^[3-13]。MCF方面,文献[4]中报道的12芯的MCF实现了大于1 Pbit/s的传输容量。FMF方面,文献[10]报道了模式差分群时延(DMGD)小于10 ps/km的6-LP模式传输的少模光纤。最近,一种多芯和少模相结合的新型结构——少模多芯光纤(FM-MCF)被提出^[14-20]。Mizuno等^[16]提出的FM-MCF具有12个纤芯且在每个纤芯中传输3个模式(LP₀₁、LP_{11a}和LP_{11b})。该FM-MCF可以使得光纤空间多重性因子达到36。对于利用FMFs或FM-MCFs传输的模式复用系统来说,模式复用/解复用器(M-MUX/DEMUX)是一种非常关键的器件。不同类型的M-MUX/DEMUX已经被提出,例如块状自由空间光学、波导技术^[21]、光栅耦合器^[22]、光子灯笼^[23]、光纤耦合器^[24]。

文献[25]采用电弧熔接机光纤整形模式,提出通过局部拉长MCF来构造一种支持LP₀₁模、LP_{11a}模和LP_{11b}模传输的M-MUX/DEMUX,并证明了在两种不同拉伸条件下可以分别实现两种波长下三种模式的转换。然而,文献[25]并没有给出详细的纤芯参数设计过程,并且论文讲述的是两种不同伸长条件下分别实现两种不同波长的复用/解复用,不具有带宽的灵活性。因此,本文针对基于MCF的三模复用/解复用器,给出详细的纤芯参数设计方法,采用有效折射率匹配的原理,利用仿真工具分析模式之间的耦合过程,并且讨论了C+L波段高耦合效率的工作带宽。

2 基于三芯光纤的M-MUX/DEMUX设计

三芯光纤结构示意图如图1所示,由一个中央的三模传输纤芯和两个外部的单模耦合纤芯构成,外部两个单模耦合纤芯的排列角度成90°。

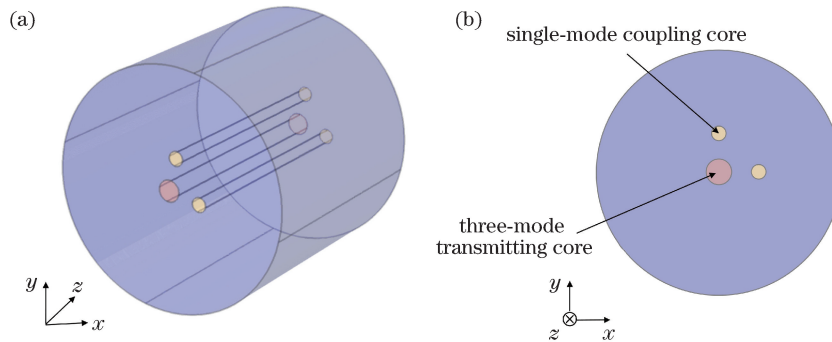


图1 基于三芯光纤的模式复用/解复用器结构示意图。(a)三维模型图;(b)横截面图

Fig. 1 Structural diagram of three-core fiber based mode multiplexer/demultiplexer.

(a) 3D model graph; (b) cross-section view

2.1 三模传输纤芯的设计

三模传输纤芯中传输LP₀₁、LP_{11a}和LP_{11b}三种模式,其E_x电场强度如图2所示。已知归一化传播常数B和归一化频率V为^[26]

$$B = \frac{n_{\text{eff}}^2 - n_0^2}{n_1^2 - n_0^2}, \quad (1)$$

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_0^2}, \quad (2)$$

式中n_{eff}表示有效折射率,一般为传播常数β与光波数k之间的比值;n₁为纤芯折射率,n₀为包层折射率,a为纤芯半径,λ为波长。

根据(1)式和(2)式可以得出如图3所示的阶跃光纤中LP模的归一化传播常数B和归一化频率V之间的关系。要保证两个非简并LP模式(LP₀₁和LP₁₁)在纤芯内传输,其V值大概介于2.4与3.8之间。当V

越靠近 2.4, LP₁₁ 模泄露到包层的部分越多;当 V 越远离 2.4, LP₁₁ 模则被越来越强地束缚在纤芯中;若 V 太靠近 3.8, 则可能会激发出其他的高阶模, 从而产生干扰。综合考虑以上因素, 仿真实验将中央的三模传输纤芯的 V 值设定为 3.57。此外, 光纤工作波长 λ 设定为 1550 nm, 包层半径 b 设为 62.5 μm , 包层折射率 n_0 设为 1.448716。根据(2)式, 可以得出位于包层中央的三模传输纤芯的一组结构参数: 纤芯折射率 n_1 为 1.4575282, 纤芯半径 a 为 5.5 μm 。依据上述三模传输纤芯的结构参数, 使用仿真软件 Comsol 进行建模, 采用电磁波波束包络物理场接口进行边界模式分析, 得出 LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模的有效折射率 n_{eff} 分别为 1.451723663 和 1.451713428。

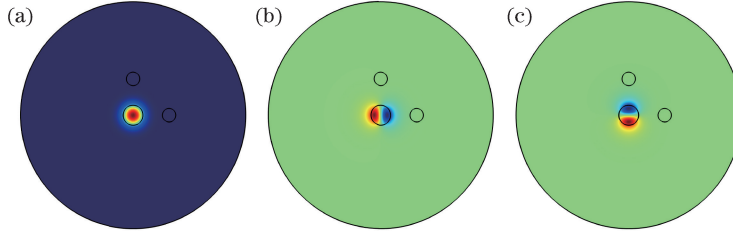


图 2 三模传输纤芯的 (a) LP₀₁、(b) LP_{11a} 和 (c) LP_{11b} 模的 E_x 电场强度分布

Fig. 2 E_x distribution of electric field intensity for (a) LP₀₁, (b) LP_{11a} and (c) LP_{11b} modes of three-mode transmitting core

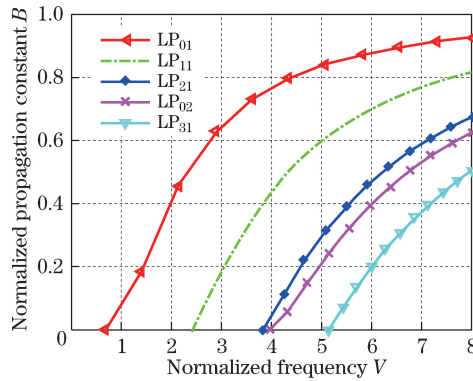


图 3 阶跃光纤中 LP 模的归一化传播常数 B 和归一化频率 V 的关系图

Fig. 3 Relationship between normalized propagation constant B and normalized frequency V of LP mode in step-index fiber

2.2 单模耦合纤芯的设计

已知功率耦合系数可表示为^[26]

$$F = \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + \delta^2} = \frac{1}{1 + (\delta/\kappa)^2}, \quad (3)$$

式中 κ 是两个纤芯中模式间的模式耦合系数, δ 是两个纤芯中模式间的传输常数差, 其数值为

$$\delta = \frac{\beta_2 - \beta_1}{2}. \quad (4)$$

式中 β_2 和 β_1 表示纤芯 1 和纤芯 2 的传播常数。两个单模耦合纤芯中, 其中一个单模纤芯 LP₀₁ 模的 n_{eff} 与三模纤芯 LP_{11a} 模的 n_{eff} 相等, 另一个单模纤芯 LP₀₁ 模的 n_{eff} 与三模纤芯 LP_{11b} 模的 n_{eff} 相等。这是因为三模纤芯中 LP_{11a} 或 LP_{11b} 模的 n_{eff} 与单模纤芯中 LP₀₁ 模的 n_{eff} 相等意味着两个纤芯中的传播常数 β 相同。根据(3)式, 此时的功率耦合系数 F 最大。根据如图 3 所示的 V - B 曲线, 当单模纤芯的归一化频率 V 小于 2.4 时, LP₀₁ 模几乎全部被束缚在纤芯中传输, 若取值过小则导致纤芯中的能量分布过少; 但是, 若 V 太靠近 2.4, LP₀₁ 模越多的能量泄露到包层并且会激发出其他的高阶模式。

设计 LP₀₁ 模与 LP_{11a} 模有效折射率匹配的单模纤芯。综合考虑以上因素, 将第一个单模光纤的归一化频率 V 初步设为 2.1, 工作波长 λ 设为 1550 nm, 纤芯半径 a 设为 3.7 μm , 包层半径 b 设为 62.5 μm , 包层折射率 n_0 设为 1.448716。根据(1)式得出纤芯折射率 n_1 为 1.45546。依据上述参数, 采用仿真软件中电磁波波束包络物理场接口进行边界模式分析, 观察单模纤芯的 LP₀₁ 模式的 n_{eff} 并与三模纤芯的 LP_{11a} 模式的 n_{eff} 进行比较。若二者不相等, 则调整单模纤芯的纤芯折射率, 重复进行边界模式分析以及 n_{eff} 的比较, 直至二者

相等,即得到一组满足 LP_{01} 模的 n_{eff} 与三模纤芯 LP_{11a} 模的 n_{eff} 相匹配的单模光纤参数。然后依次把单模纤芯的纤芯半径 a 设为 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.75, 3.85, 4.0, 4.1 μm , 调整单模纤芯的纤芯折射率 n_1 , 重复进行边界模式分析以及 n_{eff} 的比较, 直至单模纤芯 LP_{01} 模与三模纤芯 LP_{11a} 模的 n_{eff} 相等, 从而得到各纤芯半径 a 对应的满足有效折射率匹配的纤芯折射率 n_1 。至此, 得到了 10 组满足 LP_{01} 模与 LP_{11a} 模的有效折射率匹配的单模纤芯参数, 如图 4 所示。

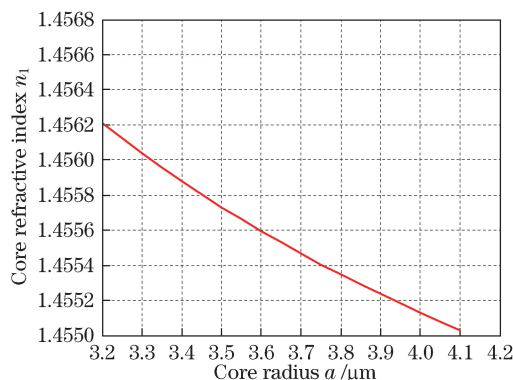


图 4 LP_{01} 模与 LP_{11a} 模有效折射率 n_{eff} 相匹配的单模纤芯参数

Fig. 4 Parameters of single-mode core when effective refractive index n_{eff} of LP_{01} mode matches that of LP_{11a} mode

设计 LP_{01} 模与 LP_{11b} 模有效折射率相匹配的单模纤芯。由于 LP_{11a} 与 LP_{11b} 模是简并模且有效折射率十分接近, 因此第二个单模纤芯的设计过程与上述第一个单模纤芯的设计过程大体相同。同样分别为 10 组单模纤芯的纤芯半径 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.75, 3.85, 4.0, 4.1 μm 找出了相对应的纤芯折射率, 使得 10 组单模纤芯基模的 n_{eff} 与三模传输纤芯的 LP_{11b} 模 n_{eff} 相匹配, 所得到的单模纤芯的结构参数如图 5 所示。

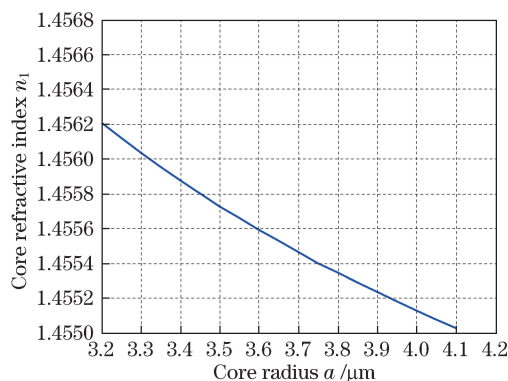


图 5 LP_{01} 模与 LP_{11b} 模有效折射率 n_{eff} 相匹配的单模纤芯参数

Fig. 5 Parameters of single-mode core when effective refractive index n_{eff} of LP_{01} mode matches that of LP_{11b} mode

3 分析三模传输纤芯模式转换

3.1 LP_{11a} - LP_{01} 模式转换效率

由上述三模传输纤芯参数和 LP_{01} 模与 LP_{11a} 模有效折射率相匹配的单模耦合纤芯参数分析 LP_{11a} - LP_{01} 模式转换过程, 另外还需要确定耦合长度, 即光纤长度。此仿真实验将纤芯间距 Δ 初始值设为 17.2 μm , 光纤长度 L 设为 10 mm。依据上述两芯光纤参数, 采用仿真软件中电磁波束包络物理场接口进行边界模式分析, 找到使得在单模纤芯和三模纤芯中能分别观察到 LP_{01} 模和 LP_{11a} 模时对应的有效折射率。任选两个为一组, 进行模式转换过程的仿真。图 6 表示在两芯光纤中 LP_{01} 和 LP_{11a} 模式的转换过程。这时再对不同光纤长度对应的单模纤芯 LP_{01} 模和三模纤芯 LP_{11a} 模的功率进行计算, 单模纤芯 LP_{01} 模和三模纤芯 LP_{11a} 模之间的功率交换曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 当 L 由 0 增大到 5.2 mm 时, LP_{11a} 模式的功率从最大值减小到最小值几乎为 0, 而 LP_{01} 模式的功率从最小值几乎为 0 增大到最大值。因此得出耦合长度为 5.2 mm 且模式转换效率接近百分之百。

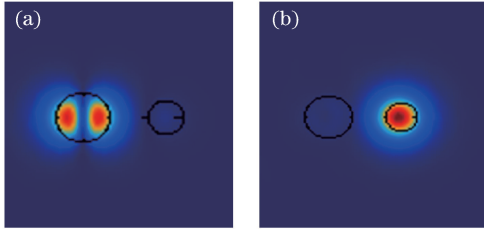


图 6 (a)三模传输纤芯输入端 LP_{11a} 模;
(b)单模耦合纤芯输出端 LP_{01} 模

Fig. 6 (a) Input LP_{11a} mode in three-mode transmitting core;
(b) output LP_{01} mode in single-core coupling core

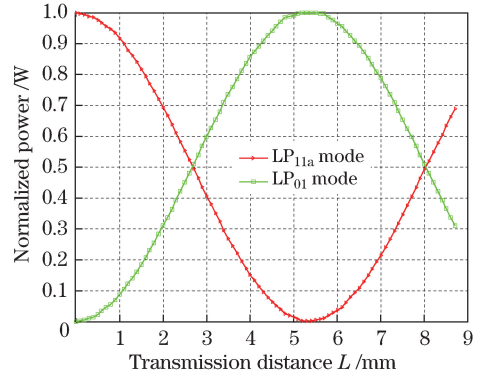


图 7 LP_{11a} 模与 LP_{01} 模随传输长度变化的功率交换曲线
Fig. 7 Power exchange curves of LP_{11a} mode and LP_{01} mode with change of transmission distance

3.2 LP_{11b} - LP_{01} 模式转换效率

由上述三模传输纤芯参数和其中一组与 LP_{11b} 有效折射率相匹配的单模纤芯参数分析 LP_{11b} - LP_{01} 模式转换并确定纤芯间距 Λ 和耦合长度 L 。将 Λ 初始值设为 $17.2 \mu\text{m}$, L 设为 10 mm 。依据上述两芯光纤参数,采用仿真软件中电磁波波束包络物理场接口进行边界模式分析,找到使得在单模纤芯和三模纤芯中能分别观察到 LP_{01} 模和 LP_{11b} 模时对应的有效折射率。然后任选两个为一组,进行模式转换过程的仿真。图 8 表示在两芯光纤中 LP_{01} 和 LP_{11b} 模式的转换过程。图 9 表示单模纤芯 LP_{01} 模和三模纤芯 LP_{11b} 模的功率对于传输长度的依赖关系。从图 9 中可以看出,当长度由 0 增大到 5.2 mm 时, LP_{11b} 模的功率从最大值减小到最小值几乎为 0,而 LP_{01} 模式的功率从最小值几乎为 0 增大到最大值。因此得出耦合长度为 5.2 mm 且模式转换效率接近百分之百。表 1 表示三模传输纤芯与外部两个单模耦合纤芯的结构参数以及最佳耦合长度。

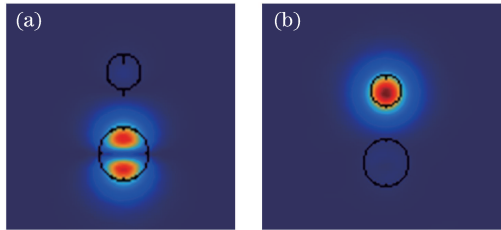


图 8 (a)三模传输纤芯输入端 LP_{11b} 模;
(b)单模耦合纤芯输出端 LP_{01} 模

Fig. 8 (a) Input LP_{11b} mode in three-mode transmitting core;
(b) output LP_{01} mode in single-mode coupling core

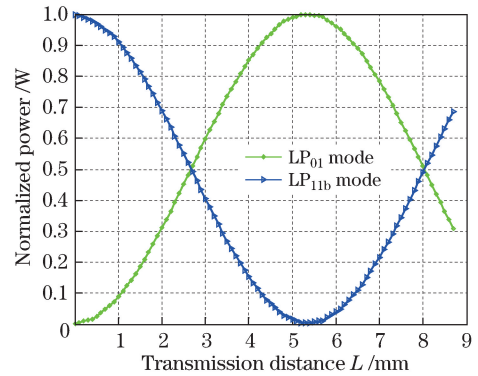


图 9 LP_{01} 模与 LP_{11b} 模随传输长度变化的功率交换曲线
Fig. 9 Power exchange curves of LP_{01} mode and LP_{11b} mode with the change of transmission distance

表 1 基于三芯光纤的模式复用/解复用器结构参数

Table 1 Structural parameters of the three-core fiber based mode multiplexer/demultiplexer

Parameter	Value
Core radius $a / \mu\text{m}$	5.5
Refractive index of transmitting core n_1	1.4575282
Core radius of coupling core (arranged at 0°) $r_{11a} / \mu\text{m}$	3.7
Refractive index of coupling core (arranged at 0°) n_{11a}	1.4554661736
Core radius of coupling core (arranged at 90°) $r_{11b} / \mu\text{m}$	3.7
Refractive index of coupling core (arranged at 90°) n_{11b}	1.45546612558
Normalized frequency $\Lambda / \mu\text{m}$	17.2
Transmission distance L / mm	5.2

4 讨论三模复用/解复用器的工作波长范围

上述所有的分析都基于 1550 nm 的工作波长,并且 LP_{11a} 和 LP_{11b} 模式的耦合过程都是分离的。图 10 为在工作波长为 1550 nm 时,三芯的复用/解复用系统中对应输入输出端的模式图,图 11 则为对应的功率交换图。可以看出由于三个纤芯的空间呈 90° 的分布,导致 LP_{11a} 和 LP_{11b} 虽然有效折射率相差很接近,却能够互不影响地各自复用/解复用。

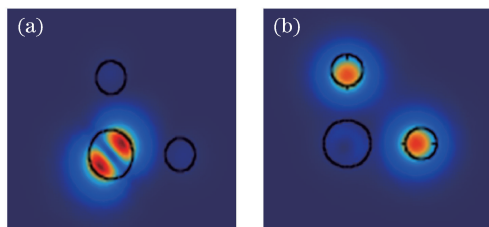


图 10 (a)三模传输纤芯输入端 LP_{11} 模;
(b)单模耦合纤芯输出端 LP_{01} 模

Fig. 10 (a) Input LP_{11} mode in three-mode transmitting core;
(b) output LP_{01} mode in single-mode coupling core

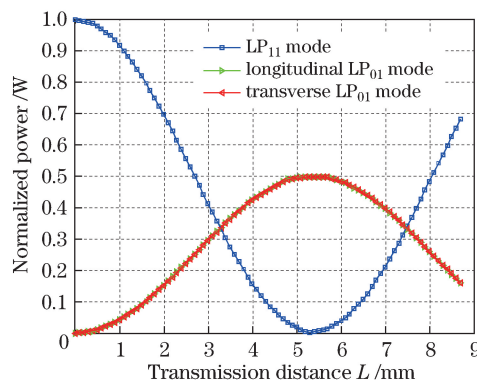


图 11 三芯光纤 LP_{11} 与 LP_{01} 归一化功率交换曲线
Fig. 11 Normalized power exchange curves of LP_{11} and LP_{01} modes in three-core fiber

接下来讨论带宽的问题。使工作波长在 1530 nm 和 1630 nm 之间,以 10 nm 为步长变换,分析不同波长对应的 LP_{11a} - LP_{01} 与 LP_{11b} - LP_{01} 的模式转换效率。采用电磁波波束包络物理场接口进行边界模式分析,对光纤长度为 0 mm(对应最大功率)和 5.2 mm(对应最小功率)处的单模纤芯 LP_{01} 模与三模纤芯 LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模的功率进行计算,求得模式转换效率。变换工作波长,重复上述步骤,得到 11 组在工作波长下 LP_{11a} - LP_{01} , LP_{11b} - LP_{01} 模式转换效率的数据,如图 12 所示。由曲线可得,M-MUX/DEMUX 在较宽的工作波长范围内具有高模式转换效率,尤其靠近中心 1550 nm 的工作波长范围内,M-MUX/DEMUX 的模式转换效率更高。然而,随着与中心工作波长 1550 nm 的远离程度的增大,模式转换效率逐渐降低。

当工作波长介于 1530~1580 nm 时, LP_{11a} - LP_{01} 与 LP_{11b} - LP_{01} 的模式转换效率均高于 90%。综合上述分析,M-MUX/DEMUX 在较大的工作波长范围内具有较高的模式转换效率,说明其具有较大的工作带宽。其工作波长和模式转换效率可参照图 12 进行权衡选择。

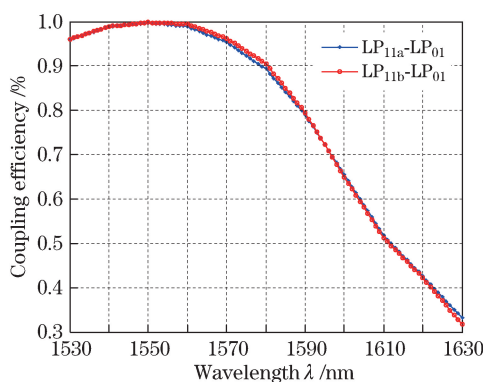


图 12 LP_{11a} - LP_{01} , LP_{11b} - LP_{01} 模式耦合效率对波长的依赖关系

Fig. 12 Dependence of coupling efficiency of LP_{11a} - LP_{01} , LP_{11b} - LP_{01} modes on wavelength

5 结 论

根据模式的有效折射率匹配原理,研究设计了一种基于三芯光纤的支持 LP_{01} 、 LP_{11a} 、 LP_{11b} 三种模式工作的 M-MUX/DEMUX。其由一个中央的三模纤芯和两个外部正交排列的单模纤芯构成,中心工作波长为 1550 nm,中心工作波长对应的模式转换效率高于 99%。给出了详细的纤芯设计过程,并且分析了工作波长

介于 1530~1630 nm 之间 M-MUX/DEMUX 对应的模式转换效率。研究发现当工作波长介于 1530~1580 nm 时, LP_{11a} - LP_{01} 与 LP_{11b} - LP_{01} 的模式转换效率均高于 90%, 即在保证 90% 的模式转换效率前提下, 在 C+L 波段所设计的三模 M-MUX/DEMUX 还能提供 50 nm 的工作带宽。分析 M-MUX/DEMUX 的模式转换效率对工作波长的依赖关系曲线, 还能发现当远离中心工作波长 1550 nm 时, 无论工作波长增大还是减小, 模式转换效率都会降低。

依据本文的设计思想, 找到使得单模纤芯 LP_{01} 模的有效折射率分别和三模纤芯 LP_{11a} 、 LP_{11b} 模相等的两个单模纤芯和一个三模纤芯的参数, 将三模纤芯放在光纤中央位置, 两个单模纤芯放在光纤圆心外部成正交排列构成三芯光纤, 仿真分析找到与纤芯间距相匹配的耦合长度, 即可研究设计基于任何中心工作波长的三模复用/解复用器。

参 考 文 献

- [1] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fiber[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [2] Essiambre R J, Kramer G, Winzer P J, *et al.* Capacity limits of optical fiber networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(4): 662-701.
- [3] Sakaguchi J, Puttnam B J, Klaus W, *et al.* 19-core fiber transmission of $19 \times 100 \times 172$ -Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305 Tb/s[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2012: PDP5C.1.
- [4] Takara H, Sano A, Kobayashi T, *et al.* 1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregate spectral efficiency[C]. *European Conference and Exhibition on Optical Communication*, 2012: Th.3.C.1.
- [5] Tu J, Saitoh K, Koshiha M, *et al.* Design and analysis of large-effective-area heterogeneous trench-assisted multi-core fiber[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15157-15170.
- [6] Sakamoto T, Mori T, Yamamoto T, *et al.* Differential mode delay managed transmission line for WDM-MIMO system using multi-step index fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(17): 2783-2787.
- [7] Sato K, Maruyama R, Kuwaki N, *et al.* Optimized graded index two-mode optical fiber with low DMD, large $A(\text{eff})$ and low bending loss[J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 16231-16238.
- [8] Han J, Zhang J, Zhao Y, *et al.* Numerical demonstration of mode-division multiplexing transmission over dual-mode photonic crystal fiber enabled by fiber couplers[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124: 1287-1289.
- [9] Munir A, Xin X, Liu B, *et al.* Numerical analysis of intermodal delay in few-mode fibers for mode division multiplexing in optical fiber communication systems[J]. *Optoelectronics Letters*, 2012, 8(2): 138-141.
- [10] Sillard P, Bigot-Astruc M, Molin D. Few-mode fibers for mode-division-multiplexed systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(16): 2824-2829.
- [11] Liu Yehui, Li Jinyan. Mode properties and progress of multi-core fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 050005.
刘业辉, 李进延. 多芯光纤激光器选模特性及其研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 050005.
- [12] Yang Fang, Tang Ming, Li Borui, *et al.* Design and optimization of multi-core fibers with low crosstalk and large effective area[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0106005.
杨 芳, 唐 明, 李博睿, 等. 低串扰大模场面积多芯光纤的设计与优化[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0106005.
- [13] Luo Shujun, Wang Xiaoliang, Chen Daru, *et al.* Multi-core fiber and its application for bending sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(2): 0206005.
骆淑君, 王晓亮, 陈达如, 等. 多芯光纤及其在弯曲传感中的应用[J]. *光子学报*, 2016, 45(2): 0206005.
- [14] Takenaga K, Sasaki Y, Guan N, *et al.* Large effective-area few-mode multicore fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(21): 1941-1944.
- [15] Xia C, Amezcua-correa R, Bai N, *et al.* Low-crosstalk few-mode multi-core fiber for high-mode-density space-division multiplexing[C]. *38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*, 2012: Mo.1.F.5.
- [16] Mizuno T, Kobayashi T, Takara H, *et al.* 12-core \times 3-mode dense space division multiplexed transmission over 40 km employing multi-carrier signals with parallel MIMO equalization[C]. *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, 2014: Th5B.2.

- [17] Tu J, Saitoh K, Takenaga K, *et al.* Heterogeneous trench-assisted few-mode multi-core fiber with low differential mode delay[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 4329-4341.
- [18] Sasaki Y, Amma Y, Takenaga K, *et al.* Few-mode multicore fiber with 36 spatial modes (three modes (LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b}) \times 12 cores)[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(5): 964-970.
- [19] Tu J, Saitoh K, Amma Y, *et al.* Heterogeneous trench-assisted few-mode multi-core fiber with graded-index profile and square-lattice layout for low differential mode delay[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 17783-17792.
- [20] Tu J, Long K, Saitoh K. Design and optimization of 3-mode \times 12-core dual-ring structured few-mode multi-core fiber [J]. *Optics Communications*, 2016, 381: 30-36.
- [21] Hanzawa N, Saitoh K, Sakamoto T, *et al.* Three-mode PLC-type multi/demultiplexer for mode-division multiplexing transmission[C]. *European Conference and Exhibition on Optical Communication*, 2013: Tu.1.B.3.
- [22] Chen H, Uden R V, Okonkwo C, *et al.* Employing an integrated mode multiplexer on silicon-on-insulator for few-mode fiber transmission[C]. *European Conference and Exhibition on Optical Communication*, 2013: Tu.1.B.4.
- [23] Fontine N K, Leon-saval S G, Ryf R, *et al.* Mode-selective dissimilar fiber photonic-lantern spatial multiplexers for few-mode fiber[C]. *European Conference and Exhibition on Optical Communication*, 2013: PD1.C.3.
- [24] Zhou Q, Simmhan Y, Prasanna V. Tapered mode multiplexers based on standard single-mode fibre [C]. *European Conference and Exhibition on Optical Communication*, 2013: PD1.C.1.
- [25] Uemura H, Sasaki Y, Nishimoto S, *et al.* Mode multiplexer/demultiplexer based on a partially elongated multi-core fiber[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2014: Tu3D.3.
- [26] Okamoto K. *Fundamentals of optical waveguides*[M]. Tokyo: Corona Publishing, 1992: 5-18.