

非对称平面光波导型模式复用/解复用器研究

常玉鑫 胡贵军 柏松 李井贺 王艳萍

(吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要 针对现有模式复用器的不足,根据有效折射率匹配效应,设计一种非对称平面光波导型模式复用/解复用器。波导结构由 1 个波导主臂和 2 个波导分支臂组成。研究了波导各项参数的确定准则,仿真分析了不同的波导底面宽度比对模式复用/解复用性能的影响,确定了最佳的波导底面宽度比,分析了基模和一阶模在波导中的传输过程和光场能量流动情况。结果表明:非对称平面光波导型模式复用/解复用器具有良好的模式复用和解复用性能,并且可以高效率地实现模式之间的转换,具有结构简单、模式转换效率较高、易于集成等优点。

关键词 光通信; 模式复用; 少模光纤; 平面波导; 模式转换

中图分类号 TN913.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1205004

Research of Asymmetric Planar Waveguide Type Mode Division Multiplexer/Demultiplexer

Chang Yuxin Hu Guijun Bai Song Li Jinghe Wang Yanping

(College of Communications Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract Aiming at the shortcomings of the existing multiplexers, a pattern of the asymmetric planar waveguide type mode division multiplexer/demultiplexer is designed, based on the effective refractive index matching effect. Waveguide structure consists of a main boom and two waveguide branches. The parametric principle to design the asymmetric planar waveguide type mode division multiplexer/demultiplexer is discussed. The performance of mode multiplexing/de-multiplexing is simulated under different waveguide width ratios, and the best waveguide width ratio is determined. The transmission process and the light field energy flow processes of fundamental mode and first-order mode are analyzed. The simulation results show that the asymmetric planar waveguide type mode division multiplexer/demultiplexer has a good performance of mode division multiplexing/demultiplexing, and the mode conversion can be realized efficiently. The properties, such as simple structure, high mode conversion efficiency, easy integration, make it more suitable for mode division multiplexing communication.

Key words optical communications; mode division multiplexing; few mode fiber; planar waveguide; mode conversion

OCIS codes 060.4510; 230.7390; 060.1810; 060.4230

1 引言

随着以互联网和大型数据中心为代表的 IT 业务的迅猛发展,当前的信息化社会对于网络带宽的需求达到了前所未有的高度,对光网络的传送能力提出了越来越高的要求^[1]。

为了解决光传送网的巨大压力,目前通常采用高阶调制、波分复用(WDM)^[2]、偏振复用(PDM)^[3]等技术来提高单模光纤(SMF)的传输容量,但是单模光纤固有的非线性效应以及放大器放大自发辐射(ASE)噪声^[4],使单模光纤的系统容量已经越来越接近“香

收稿日期: 2014-05-20; **收到修改稿日期**: 2014-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(61177066)、吉林省科技发展计划(20120761)、长春市科技局国际合作项目(2011105)、教育部留学回国人员科研启动基金

作者简介: 常玉鑫(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤通信方面的研究。

E-mail: changyuxin1989@163.com

导师简介: 胡贵军(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事正交频分复用光纤通信技术、多输入多输出光通信技术、全光通信网中的关键技术和关键器件等方面的研究。E-mail: hugj@jlu.edu.cn(通信联系人)

农极限”^[5]。因此,探索一种新型高速大容量光传输方式已成为未来光通信网络面临的重大挑战^[6]。

基于少模光纤的模式复用^[7],可以利用少模光纤中有限的正交模式作为独立信道进行信息传送,成倍地提升系统传输容量^[8],近年来得到人们的极大关注。由于少模光纤具有比较大的模场面积,因此其非线性容限也很高,这样既提高了传输系统的容量,又规避了非线性效应对系统的影响。

在基于少模光纤的模式复用系统中,模式复用器是最关键的部分。模式复用器主要作用是将不同的空间模式复用进一根少模光纤中。对应的模式解复用器则是将少模光纤中的混合空间模式进行分离,得到不同的空间模式并进行探测和处理。模式复用/解复用器是模式复用系统的关键器件,是模式复用通信技术的研究重点之一^[9]。

现有的模式复用器主要有:基于光纤熔融型的模式复用器,基于长周期光纤光栅的模式复用技术^[10],基于自由空间光学的模式复用/解复用器(其中,一种是采用相位盘作为模式转换的结构^[11];另一种是利用硅基液晶技术的空间光调制器作为模式转换的结构^[12])等。然而,基于光纤熔融型的模式复用器虽然结构简单,但其制作工艺比较复杂,熔融程度与长度均难以控制,并且有较高的波长依赖性;而基于长周期光纤光栅的模式复用技术需要特定的装置来使光纤产生周期性形变,很容易造成光纤损伤,而且对温度和压力比较敏感。而基于自由空间光学的模式复用/解复用器虽然对波长的依赖性较低,但其具有较高的插入损耗,难于集成。

本文针对现有模式复用器的不足,提出了一种非对称平面光波导型模式复用/解复用器结构,波导结构由1个波导主臂和2个波导分支臂组成。仿真研究了该模式复用/解复用器的性能,结果表明:这种模式复用/解复用器的复用和解复用效果良好。相比较而言,这种非对称平面光波导型模式复用/解复用器具有结构简单、模式转换效率高、易于集成与互联等优点,更加适用于模式复用通信。

2 非对称平面光波导型模式复用/解复用器的结构

非对称平面光波导型模式复用/解复用器结构如图1所示,由一个波导主臂A和两个波导分支臂B和C组成。其基本原理为:恰当选取波导分支臂B和C的底面宽度 W_1 、 W_2 ,使波导主臂A中基模的有效

折射率与波导分支臂B中基模的有效折射率相同,而使波导主臂A中一阶模的有效折射率与波导分支臂C中基模的有效折射率相同。这样,根据有效折射率匹配效应,波导主臂A中传输的基模向波导分支臂B传播,波导主臂A中传输的一阶模向波导分支臂C传播,且转换为基模形式,即实现了基模和一阶模的模式复用/解复用功能。同理,对于多个模式的复用/解复用,可以采用多个分支波导结构来实现。

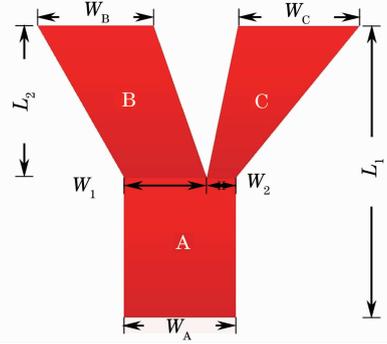


图1 非对称平面光波导型模式复用/解复用器结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of asymmetric planar waveguide type mode division multiplexer/demultiplexer

对于一个如图1所示的非对称平面光波导型模式复用/解复用器,需要确定以下参数:波导芯层材料的折射率 n_1 ;波导上包层材料的折射率 n_2 ;波导下包层材料的折射率 n_3 ;波导主臂A的底面宽度 W_A ;波导分支臂B和C的顶面宽度 W_B 、 W_C ;波导分支臂B和C的底面宽度 W_1 、 W_2 ;波导总长度 L_1 ;波导分支臂长度 L_2 。各参数确定流程如下:

1) 确定波导芯层和包层的折射率。波导芯层和包层的折射率是根据少模光纤的折射率(纤芯折射率和包层折射率)来确定。例如:在一定工作波长 λ 下,少模光纤的纤芯半径为 a ,纤芯的折射率为 n_{core} ,包层的折射率为 $n_{cladding}$,从而确定波导芯层材料的折射率和包层材料的折射率分别为 $n_1 = n_{core}$, $n_2 = n_3 = n_{cladding}$ 。

2) 确定波导主臂A的顶面宽度 W_A 、波导分支臂的顶面宽度 W_B 和 W_C 。为了便于光纤与波导互联,使 $W_A = W_B = W_C = 2a$ 。假定光纤的纤芯半径为 a ,则波导主臂A的底面宽度 W_A 为 $2a$,波导分支臂的顶面宽度 W_B 、 W_C 均为 $2a$ 。

3) 确定波导分支臂B和C的底面宽度 W_1 、 W_2 。设 n_{A0} 是波导主臂A中基模的有效折射率, n_{A1} 是波导主臂A中一阶模的有效折射率。 n_{B0} 是波导分支臂B中基模的有效折射率, n_{C0} 是波导分支臂C中基模的有效折射率。 n_{C0} , n_{A1} , W_1 、 W_2 有如下关系:

$$\sqrt{k_0^2 n_1^2 - n_{C0}^2 k_0^2} W_2 - \arctan \left(\frac{\sqrt{n_{C0}^2 k_0^2 - k_0^2 n_2^2}}{\sqrt{k_0^2 n_1^2 - n_{C0}^2 k_0^2}} \right) - \arctan \left(\frac{\sqrt{n_{C0}^2 k_0^2 - k_0^2 n_3^2}}{\sqrt{k_0^2 n_1^2 - n_{C0}^2 k_0^2}} \right) = 0, \quad (1)$$

$$\sqrt{k_0^2 n_1^2 - n_{A1}^2 k_0^2} W_1 - \arctan \left(\frac{\sqrt{n_{A1}^2 k_0^2 - k_0^2 n_2^2}}{\sqrt{k_0^2 n_1^2 - n_{A1}^2 k_0^2}} \right) - \arctan \left(\frac{\sqrt{n_{A1}^2 k_0^2 - k_0^2 n_3^2}}{\sqrt{k_0^2 n_1^2 - n_{A1}^2 k_0^2}} \right) = \pi. \quad (2)$$

根据有效折射率匹配效应,为了保证波导主臂 A 中的基模在分支臂 B 中传输,一阶模在分支臂 C 中传输,必须满足:

$$n_{A1} = n_{C0}, \quad (3)$$

$$n_{A0} = n_{B0}. \quad (4)$$

同时要求:

$$W_1 + W_2 = W_A, \quad (5)$$

联立(1)~(5)式,通过数值求解即可求得 W_1 、 W_2 。

4) 确定波导长度。波导总长度为波导分支臂长度与波导主臂长度之和。波导主臂长度可以根据自身的需要确定。对于波导分支臂长度 L_2 ,只要保证光场在传输过程中是缓变即可,一般在 $500 \sim 1000 \mu\text{m}$ 。

3 非对称平面光波导型模式复用/解复用器的性能分析

3.1 底面宽度比与波导模式复用/解复用器性能的关系

将基模和一阶模以 1:1 的功率比同时注入波导主臂 A 中,仿真分析不同底面宽度比条件下,波导分支臂 B 和 C 中基模与一阶模的功率比例变化情况。仿真的相关参数如表 1 所示,仿真结果如图 2、3 所示。

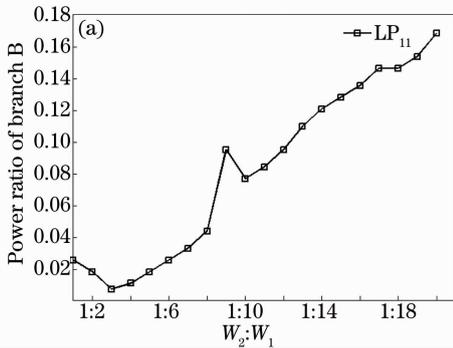


表 1 非对称平面光波导型模式复用/解复用器的相关参数
Table 1 Related parameters of asymmetric planar optical waveguide type mode division multiplexer/demultiplexer

	Parameter	Numerical value
Few-mode fiber	λ / nm	1550
	$a / \mu\text{m}$	4
	n_{core}	1.4716
	n_{cladding}	1.4619
	n_1	1.4716
Optical waveguide	n_2	1.4619
	n_3	1.4619
	$W_A / \mu\text{m}$	8
	$W_B / \mu\text{m}$	8
	$W_C / \mu\text{m}$	8
	$L_1 / \mu\text{m}$	900
	$L_2 / \mu\text{m}$	640

从图 2 可以看出,波导分支臂 B 中一阶模的功率比随着底面宽度比的增加而增加,但其值却相对较小;相比之下,波导分支臂 B 中的基模的总功率比例较大。当 $W_2:W_1 > 1:4$ 时,波导分支臂 B 中基模的功率随底面宽度比的增加而减小。由图 2(b) 分析可知,当 $1:3 < W_2:W_1 < 1:7$,分支臂 B 中的基模功率比例可以达到 47% 以上,由此可知波导主臂 A 中基模的有效折射率与波导分支臂 B 中基模的有效折射率相同,从而主臂 A 中基模从波导分支臂 B 中输出。

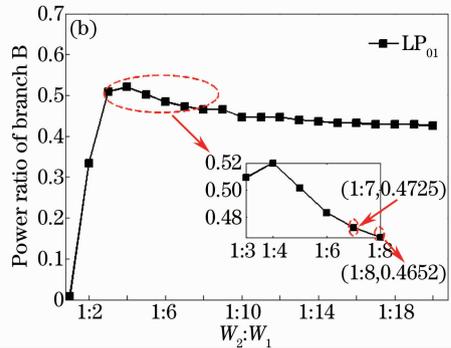


图 2 不同的波导分支臂底面宽度比时,分支臂 B 中(a)一阶模和(b)基模的功率比例变化情况

Fig. 2 Changes of power ratios of (a) first-order mode and (b) fundamental mode in branch B with different waveguide width ratios

由图 3(a)可知,波导分支臂 C 中一阶模的总功率比例较小,特别是当 $W_2:W_1 > 1:7$ 时,其功率比例明显下降;而当 $W_2:W_1 > 1:10$ 时,波导分支臂 C 中

一阶模的总功率比例为零,对比分析图 3(b)可知,波导分支臂 C 中基模功率占大部分比例,当 $1:5 < W_2:W_1 < 1:8$ 时,波导分支臂 C 中基模的功率比例

达到 47% 以上, 由此可知在模式复用器中, 波导主臂 A 中一阶模的有效折射率与波导分支臂 C 中基模的有效折射率近似相同, 波导主臂 A 中的一阶模

向波导分支 C 传输的过程中也转化为基模, 实现了模式转换, 转换效率高达 98% 左右。

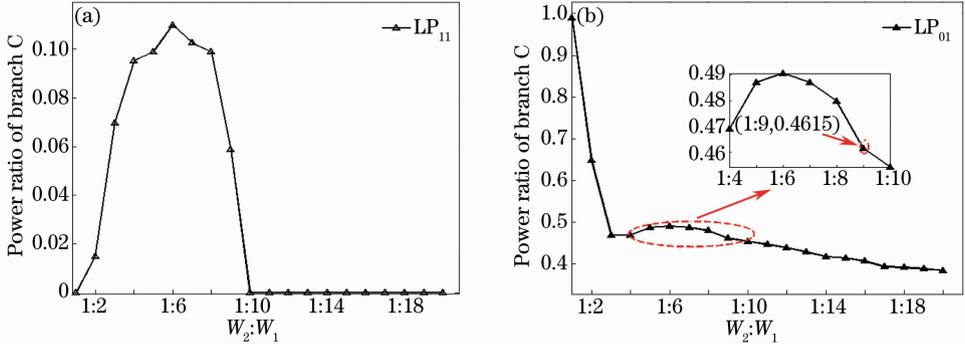


图 3 不同的波导分支臂底面宽度比时, 分支臂 C 中 (a) 一阶模和 (b) 基模的功率比例变化情况

Fig. 3 Changes of power ratios of (a) first-order mode and (b) fundamental mode in branch C with different waveguide width ratios

因此, 当波导底面宽度之比 $1:5 < W_2:W_1 < 1:7$ 时, 模式复用器的损耗最低, 效率最高, 效果最好。

3.2 模式在波导模式复用/解复用器中的传输特性

为了进一步分析不同的底面宽度比对非对称光波导型模式复用/解复用器的性能的影响, 仿真研究了在最佳的波导底面宽度比, 即 $W_2:W_1 = 1:6$ 的情况下, 基模和一阶模在波导中的传输过程, 如图 4 所示。由图 4 可知, 两个模式在波导主臂围内正常传输, 经过分叉口处后, 模式的传播分成两部分, 分别向分支臂 B 和分支臂 C 传播。基模从主臂 A 向分支臂 B 方向传播, 一阶模从主臂 A 向分支臂 C 方向传播, 很好地实现了模式解复用的功能。由于光路具有可逆性, 因此, 该器件反向传输时可以实现模式复用功能。

3.3 模式在波导模式复用/解复用器中的能量流动特性

为了进一步分析不同的底面宽度比对非对称光

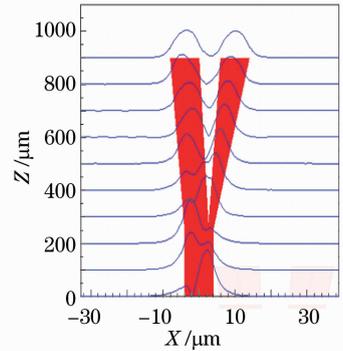


图 4 模式在波导中的传输过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of transmission process of modes in the waveguide

波导型模式复用/解复用器的性能的影响, 仿真研究了当波导底面宽度比为 $W_2:W_1 = 1:6$ 的情况下, 基模和一阶模在波导中的光场能量流动的情况, 如图 5 所示。由图 5 可知, 光场能量在波导主臂 A 中正常传播, 经过分叉口后, 基模与一阶模的光场能量分别沿着分支臂 B 和 C 传播。

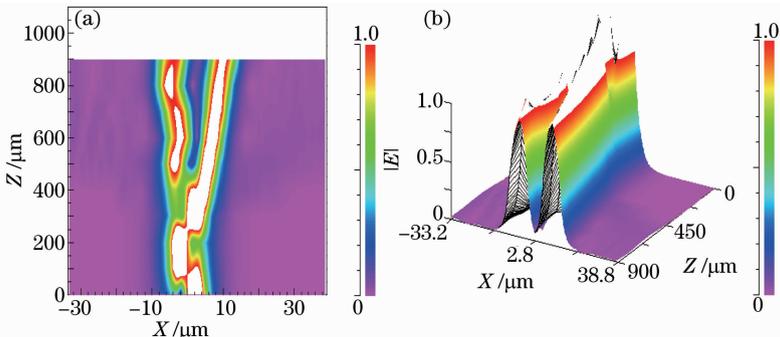


图 5 模式在波导中的能量流动示意图。(a) 二维图; (b) 三维图

Fig. 5 Schematic diagrams of energy flowing of modes in the waveguide. (a) 2-D schematic diagram; (b) 3-D schematic diagram

参 考 文 献

为验证本文设计的非对称平面光波导型模式复用/解复用器分支臂 B 和分支臂 C 的输出均为基模,在上述的最佳的底面宽度比的情况下,仿真监测分支臂 B 和分支臂 C 中基模功率的变化情况,如图 6(b)图所示,▲曲线表示分支臂 B 中的基模功率,●曲线表示分支臂 C 中的基模功率,由图中的曲线可以看出,在传播过程中,分支臂 B 和分支臂 C 的基模功率由 0 不断上升,最后达到稳定,说明波导主臂 A 中的基模向分波导支臂 B 传输,而波导主臂 A 中的一阶模向波导分支 C 传输的过程中也转化为基模,实现了一阶模和基模之间的转换。

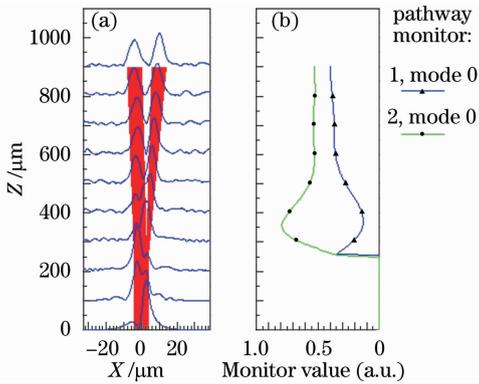


图 6 (a) 能量流动过程示意图;(b) 分支臂 B 和 C 中的基模功率变化示意图

Fig. 6 (a) Schematic diagram of the energy flow processes in the waveguide; (b) schematic diagram of power changes of the fundamental mode in branch arms B and C

4 结 论

针对现有模式复用/解复用器的不足,根据有效折射率匹配原理,设计了一种非对称平面光波导型模式复用/解复用器,同时对其模式复用/解复用性能进行了仿真分析。结果表明:这种模式复用/解复用器不仅具有良好的模式复用/解复用的效果,而且具有模式转换功能,转换效率高达 98% 左右,其结构简单、性能稳定、易于集成和互联的优点是其更适用于模式复用通信。

- Ren Yitao, Huang Chuyong, Luo Jinlong. Design and fabrication of heavy germanium loading waveguide splitters and couplers by UV exposure method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(9): 092301.
任一涛, 黄楚勇, 罗金龙. 紫外曝光法制备高掺锗光波导分束器及耦合器[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 092301.
- Xie Yiwei, Fu Songnian, Zhang Hailiang, *et al.*. Design and optimization of mode differential group delay for few-mode fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906010.
谢意维, 付松年, 张海亮, 等. 少模光纤模式差分群时延的设计与优化[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906010.
- Zeng Xiangye, Liu Jianfei, Zhao Qida. Study on dispersion equalizer and algorithm for polarization multiplexed fiber optics communication systems[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0206003.
曾祥烨, 刘剑飞, 赵启大. 偏振复用光纤通信系统色散均衡器及算法的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0206003.
- Hu Yun, Zhao Xueqing, Xue Quanxi, *et al.*. ASE suppression in the high power excimer laser MOPA system based on electro-optical switch[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102008.
胡云, 赵学庆, 薛全喜, 等. 基于电光开关的高功率准分子激光 MOPA 系统 ASE 抑制[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102008.
- Wang Yuanquan, Fang Wuliang, Tao Li, *et al.*. Research of multiple-input multiple-output (MIMO) technique in multimode fiber links[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 100601.
王源泉, 方武良, 陶理, 等. 多模光纤链路中多输入多输出技术的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 100601.
- Yao Shuchang, Fu Songnian, Zhang Minming, *et al.*. Demodulation and multi-input multi-output equalization for mode division multiplexing system using a novel few-mode fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 144215.
姚殊畅, 付松年, 张敏明, 等. 基于少模光纤的模分复用系统多输入多输出均衡与解调[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 144215.
- M Salsi, C Koebele, D Sperti, *et al.*. Mode-division multiplexing of 2×100 Gb/s channels using an LCOS-based spatial modulator[J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(4): 618–623.
- Peter M Krummrich. Spatial multiplexing for high capacity transport[J]. Optical Fiber Technology, 2011, 17(5): 480–489.
- Riesen Nicolas, Love John D. Weakly-guiding mode-selective fiber couplers[J]. IEEE J Quantum Electron, 2012, 48(7): 941–945.
- Abdullah Al Amin, An Li, Simin Chen, *et al.*. Dual-LP₁₁ mode 4×4 MIMO-OFDM transmission over a two-mode fiber[J]. Opt Express, 2011, 19(17): 16672–16679.
- Koebele Clemens, Salsi Massimiliano, Milord Laurent, *et al.*. 40 km transmission of five mode division multiplexed data streams at 100 Gb/s with low MIMO-DSP complexity[C]. 37th European Conference and Exposition on Optical Communications, 2011.
- Clemens Koebele, Massimiliano Salsi, Donato Sperti, *et al.*. Two mode transmission at 2×100 Gb/s over 40 km-long prototype few-mode fiber using LCOS-based programmable mode multiplexer and demultiplexer[J]. Opt Express, 2011, 19(17): 16593–16600.

栏目编辑: 王晓琰