

基于级联非对称 Y 分支的紧凑宽带高效的 LP₀₁-LP_{11a} 模式转换器

张豪, 邓佳瑶, 王梦柯, 马小霞, 陈开鑫*

电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 611731

摘要 提出了一种基于级联非对称 Y 分支的紧凑、宽带、高效的 LP₀₁-LP_{11a} 模式转换器。制作的聚合物波导模式转换器具有 1.5 mm × 14.0 μm 的紧凑尺寸, 对于 C+L 波段的 *x* 偏振和 *y* 偏振光, 其模式转换效率大于 98%, 串扰小于 -17.5 dB, 插入损耗低于 5.8 dB。所提出的模式转换器可以应用在宽带模分复用传输系统中。

关键词 光纤光学; 光学器件; 模式转换器; 模分复用; 聚合物波导; 集成光学; 非对称 Y 分支

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230832

1 引言

模分复用(MDM)技术采用光纤或波导的多个正交模式信道并行传输信息, 这些正交的信道彼此具有很低的模式串扰, 为单模光纤光通信容量受限问题提供了一个新的解决方案^[1-4]。MDM系统的核心器件为模式转换器, 模式转换器能够在复用/解复用时将基模转换为高阶模, 或者将高阶模转换为基模^[3-4]。模式转换器的主要实现平台可以分为三类, 即空间光学元件^[5-6]、全光纤^[7-8]和平面光路(PLC)^[9-28]。针对目前市场对模式转换器的需求, 基于 PLC 的模式转换器由于具有尺寸紧凑、材料和结构多样、设计与制作灵活、集成可兼容等特点而得到了极大的关注。已经报道的基于 PLC 的模式转换器采用了多种结构, 包括沟槽^[9]或缝隙波导^[10]、非对称定向耦合器^[11-14]、多模干涉耦合器^[15-16]、光栅辅助耦合器^[17]、布拉格光栅^[18]、长周期光栅(LPG)^[19-21]、非对称 Y 分支^[22-26]、非对称 Y 分支与热诱导 LPG 的结合^[27]、马赫-曾德尔干涉仪^[28-30]、介电超表面^[31]等。

众所周知, Y 分支是一种非常简单且通用的光波导器件, 对称 Y 分支可以用作光功率分配器, 而非对称 Y 分支可以用作模式选择器。非对称 Y 分支具有制作容差大、宽带的点, 聚合物波导具有低成本、制作工艺简单的特点, 因此基于聚合物平台的非对称 Y 分支的模式转换器适用于 MDM 光通信系统中。文献^[24]报道了一种基于聚合物平台的非对称 Y 分支, 可以实现 LP₀₁ 和 LP_{11a} 模式的转换, 在 1550 nm 工作波长下模

式串扰为 -22.2 dB, 10 dB 带宽为 40 nm, 器件尺寸约为 15 mm × 130 μm。文献^[25]报道了一种可以同时实现 LP₀₁-LP_{11a} 和 LP₀₁-LP_{11b} 模式转换的非对称 Y 分支结构, 该器件可以工作在 C+L 波段, 模式串扰约为 -10 dB, 器件尺寸约为 1.5 mm × 130.0 μm。文献^[27]报道了一种结合热诱导 LPG 和非对称 Y 分支的可重构模式复用/解复用器, 在 C+L 波段可以实现模式选择度大于 12 dB 的 LP₀₁-LP_{11a} 模式转换, 该器件的长度约为 14 mm。尽管这些基于聚合物的模式转换器具有良好的性能, 但大的器件尺寸在一定程度上限制了其在片上高密度集成光互联中的应用。

鉴于此, 本文基于聚合物光波导平台, 采用级联非对称 Y 分支结构, 设计、制作了一种紧凑、宽带、高效的 LP₀₁-LP_{11a} 模式转换器。我们制作的聚合物波导模式转换器具有 1.5 mm × 14.0 μm 的紧凑尺寸, 并且对于 C+L 波段的 *x* 偏振和 *y* 偏振光, 模式转换效率大于 98%, 串扰小于 -17.5 dB, 插入损耗低于 5.8 dB。本文提出的模式转换器也可以在其他高折射率差材料平台上实现, 例如绝缘体上铌酸锂、氮化硅和绝缘体上硅, 从而实现更紧凑和更先进的集成光子回路。

2 器件结构与设计

本文提出的模式转换器的三维示意图如图 1(a) 所示, 其由两个完全相同的非对称 Y 分支反向连接而成。Y 分支的主干部分是一个芯层宽度为 w_1 的双模直波导(stem A 和 stem B), 该波段仅支持 E_{11}^i 和 E_{21}^i 模式($i=x$ 或 y , 代表模式的偏振方向), 分别对应着光纤

收稿日期: 2023-05-16; 修回日期: 2023-06-26; 录用日期: 2023-07-11; 网络首发日期: 2023-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(62075027)、四川省重点研发计划(2020YFSY0003)、深圳市关键技术研发计划(JSGG20210802154413040)

通信作者: *chenkx@uestc.edu.cn

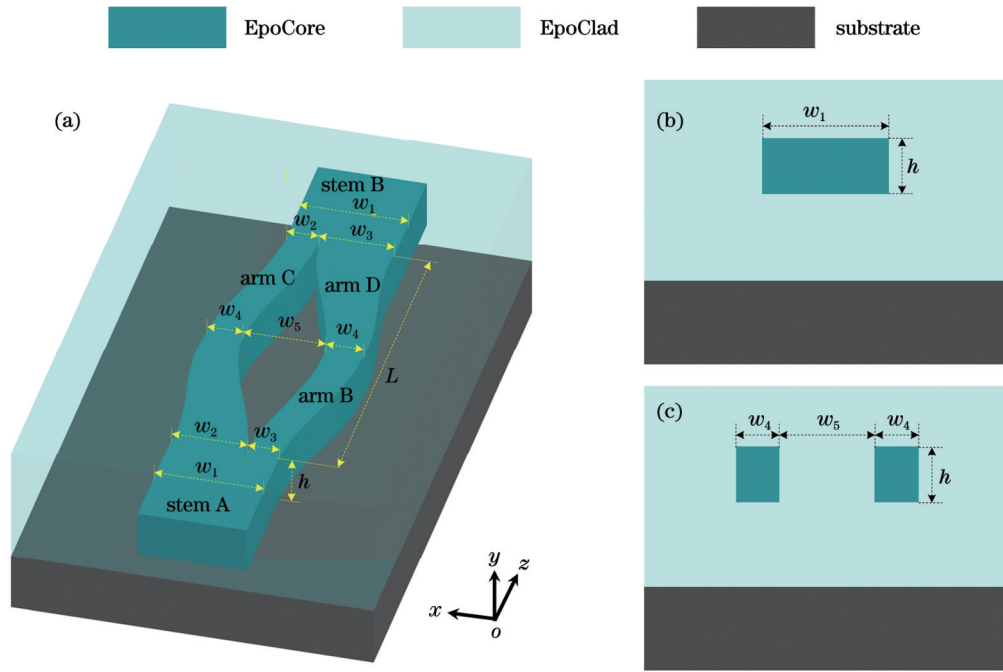


图 1 所提出的 LP_{01} - LP_{11a} 模式转换器示意图。(a) 模式转换器三维示意图；(b) 主干波导的横截面图；(c) 两个非对称 Y 分支连接处的横截面图

Fig. 1 Schematics of proposed LP_{01} - LP_{11a} mode converter. (a) 3D schematic of mode converter; (b) cross-section view of stem waveguide; (c) cross-section view at joint of two asymmetric Y-junctions

中 i 偏振方向的 LP_{01} 模和 LP_{11a} 模。在 Y 分支的分叉处, 该双模波导逐渐分成两个具有不同宽度的单模余弦 S 形弯曲波导。其中, 宽臂 S 形弯曲波导 (arm A 和 arm D) 的起始宽度为 w_2 , 末端宽度为 w_4 , 窄臂 S 形弯曲波导 (arm B 和 arm C) 的起始宽度为 w_3 , 末端宽度也为 w_4 。两臂的最大间距 (对应于两个非对称 Y 分支反向连接处) 为 w_5 , 两个主干波导的 z 向间距为 L 。主干波导和两个非对称 Y 分支的连接处的横截面分别如图 1 (b) 和图 1 (c) 所示。聚合物材料 EpoCore 和 EpoClad 分别用作芯层和包层材料, 它们在 1538 nm 波长处的折射率分别为 1.5716 和 1.5595, 且均对偏振不敏感。为了便于制作, 所有波导芯层具有相同的高度 h 。

所提出的模式转换器的模式演变和转换特性如图 2 所示。该器件的工作原理是模式的绝热演变, 即一个模式可以通过非对称 Y 分支逐渐演变为另一个具有与之最接近有效折射率的模式^[32-33]。如图 2 (a) 所示, 当耦合到 stem A 中的 LP_{01} 模传输到分叉处时, 基于最佳匹配有效折射率法则, 它将演变为 arm A 中的 LP_{01} 模。随后, arm A 中的 LP_{01} 模式逐渐演变为 arm C 中的 LP_{01} 模式, 并且在此演变过程中其有效折射率随波导宽度的减小而减小, 之后演变为 stem B 中的 LP_{11a} 模, 实现了从 LP_{01} 模到 LP_{11a} 模的转换。当 LP_{11a} 模耦合到 stem A 中时, 模式演变与上述情况相似, 如图 2 (b) 所示。

根据上述模式演化原理, 为了实现两个模式之间的最大模式转换效率, 须优化波导参数, 使得这两个模

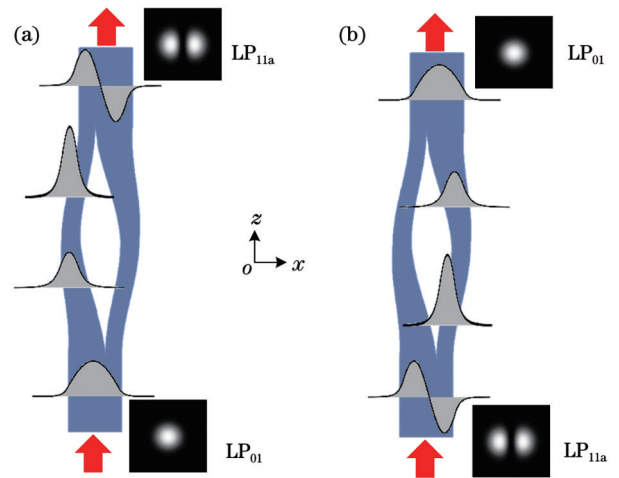


图 2 模式转换过程示意图。(a) LP_{01} 模转换为 LP_{11a} 模；(b) LP_{11a} 模转换为 LP_{01} 模

Fig. 2 Schematic of modal conversion process. (a) LP_{01} mode is converted to LP_{11a} mode; (b) LP_{11a} mode is converted to LP_{01} mode

式的有效折射率相等或非常接近。因此, 首先固定了芯层高度 $h=4.0 \mu\text{m}$, 这里选择这一厚度是因为, 针对所选择的波导材料, 该厚度的平板波导满足 y 方向的单模条件, 且较易旋涂实现。接下来, 我们使用商业模式求解器 (COMSOL) 计算了在 1550 nm 波长下不同波导宽度对应的 x 和 y 偏振 LP_{01} 模和 LP_{11a} 模的有效折射率 (N_{eff}), 计算得到的模式色散曲线如图 3 所示, 从中选择了 $w_1=9.0 \mu\text{m}$, $w_2=6.3 \mu\text{m}$, $w_3=2.7 \mu\text{m}$ 。相应地, 表 1 总结了 LP_{01} 和 LP_{11a} 模在 x 和 y 偏振方向的有效

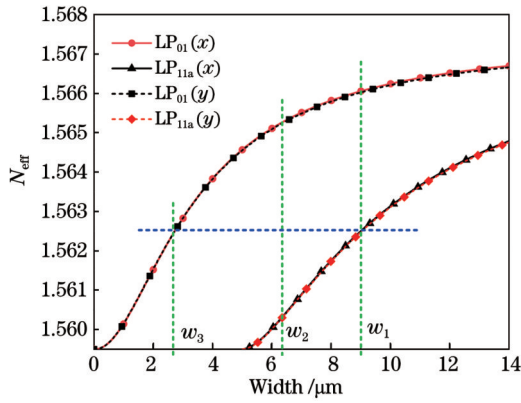


图3 固定 $h=4.0\ \mu\text{m}$, LP_{01} 模和 LP_{11a} 模在不同芯层宽度下的有效折射率

Fig. 3 Effective refractive indices of LP_{01} mode and LP_{11a} mode at fixed $h=4.0\ \mu\text{m}$ for different waveguide widths

表1 所提出的模式转换器在不同芯层宽度下沿 x 和 y 偏振方向的模式有效折射率

Table 1 Effective refractive indices along x and y polarized directions at different core widths of proposed device

Polarized direction	Mode	Effective refractive index		
		$w_1=9.0\ \mu\text{m}$	$w_2=6.3\ \mu\text{m}$	$w_3=2.7\ \mu\text{m}$
x	LP_{01}	1.56599	1.56510	1.56193
	LP_{11a}	1.56218	1.55969	–
y	LP_{01}	1.56596	1.56508	1.56191
	LP_{11a}	1.56218	1.55967	–

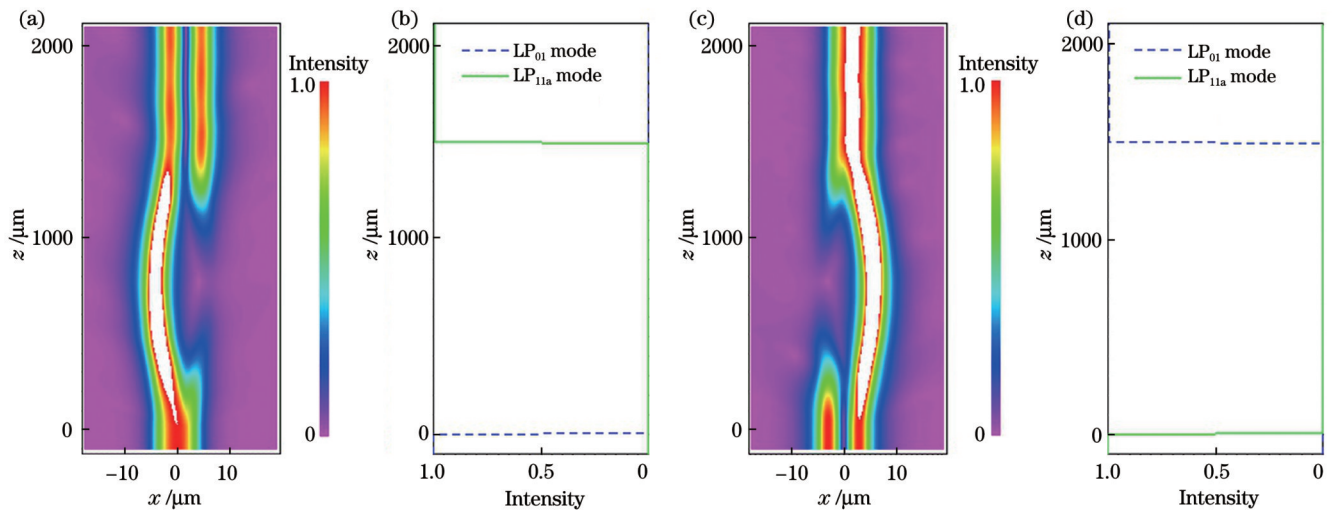


图4 模式转换器的光路传输和归一化能量的变化情况。(a) LP_{01} 模转换为 LP_{11a} 模的光路传输；(b) LP_{01} 模转换为 LP_{11a} 模的归一化能量变化；(c) LP_{11a} 模转换为 LP_{01} 模的光路传输；(d) LP_{11a} 模转换为 LP_{01} 模的归一化能量变化

Fig. 4 Optical transmission and normalized energy change of mode converter. (a) Optical transmission when LP_{01} mode is converted to LP_{11a} mode; (b) normalized energy change when LP_{01} mode is converted to LP_{11a} mode; (c) optical transmission when LP_{11a} mode is converted to LP_{01} mode; (d) normalized energy change when LP_{11a} mode is converted to LP_{01} mode

3 器件制作

根据以上器件参数,利用实验室微加工设备制作了所提出的模式转换器。该器件的芯层和包层材料分

别为聚合物材料 EpoCore 和 EpoClad,且聚合物波导是在硅衬底上制作的。下面简要介绍制作工艺。首先在硅衬底上旋涂约 $7\ \mu\text{m}$ 厚的 EpoClad 薄膜作为下包层。接下来,将 EpoCore 旋涂到下包层上得到厚度约

折射率。可以看出,stem A(B)中的 LP_{01} 模的有效折射率与 arm B(C)中的 LP_{01} 模的有效折射率明显不同,但与 arm A(D)的 LP_{01} 模的有效折射率非常接近。因此,stem A(B)中的 LP_{01} 模在经过非对称 Y 分支时可以转换为 arm A(D)中的 LP_{01} 模,该过程几乎没有功率损失。同样地,stem A(B)中的 LP_{11a} 模可以转换为 arm B(C)中的 LP_{01} 模。

需要指出的是,虽然图 3 显示的色散曲线对于 x 和 y 偏振几乎重叠,但 x 和 y 偏振的 LP_{01} (LP_{11a}) 模的有效折射率仍然存在细微差异,如表 1 所示,这导致了所提出的模式转换器无法使 x 和 y 偏振的 LP_{01} (LP_{11a}) 模式同时实现最大的模式转换效率。因此,所提出的器件仅对 x 偏振情况下的模式转换进行了优化。模式转换器的性能还取决于两个主干波导的 z 向间距 L 、非对称 Y 分支末端宽度 w_4 以及两臂的最大间距 w_5 。考虑到可用于模式选择的非对称 Y 分支需要满足模式转换因子大于 $0.43^{[34]}$,采用三维有限差分光束传播法 (3DFD-BPM) 进行了参数优化,最终确定 $L=1.5\ \text{mm}$ 、 $w_4=3.1\ \mu\text{m}$ 、 $w_5=6.8\ \mu\text{m}$ 。图 4 展示了根据上述参数利用 3DFD-BPM 模拟得到的模传输和归一化模式能量的变化情况。如图 4(a)和图 4(c)所示,输入端激发的 $1550\ \text{nm}$ 波长的 x 偏振 LP_{01} 和 LP_{11a} 模可以分别转换为 x 偏振的 LP_{11a} 和 LP_{01} 模,相应的模式转换效率如图 4(b)和图 4(d)所示,分别为 99.3% 和 99.2% 。

为 $4\ \mu\text{m}$ 的薄膜,使用标准光刻工艺制作器件图案。随后,旋涂一层厚度约为 $7.8\ \mu\text{m}$ 的 EpoClad 薄膜作为上包层。最后,解理样品以形成输入输出端面。最终制作得到的模式转换器尺寸仅为 $1.5\ \text{mm} \times 14.0\ \mu\text{m}$ 。然而,为了便于测量,设计的输入/输出主干波导的长度

远远超过了所需的长度,因此器件的实际长度远大于 $1.5\ \text{mm}$ 。图 5(a)显示了包含数十个模式转换器的照片,图 5(b)及其插图分别显示了制作的模式转换器和放大的非对称 Y 分支的显微镜图像,图 5(c)和图 5(d)分别显示了所制作的器件的主干和中心部分的横截面。

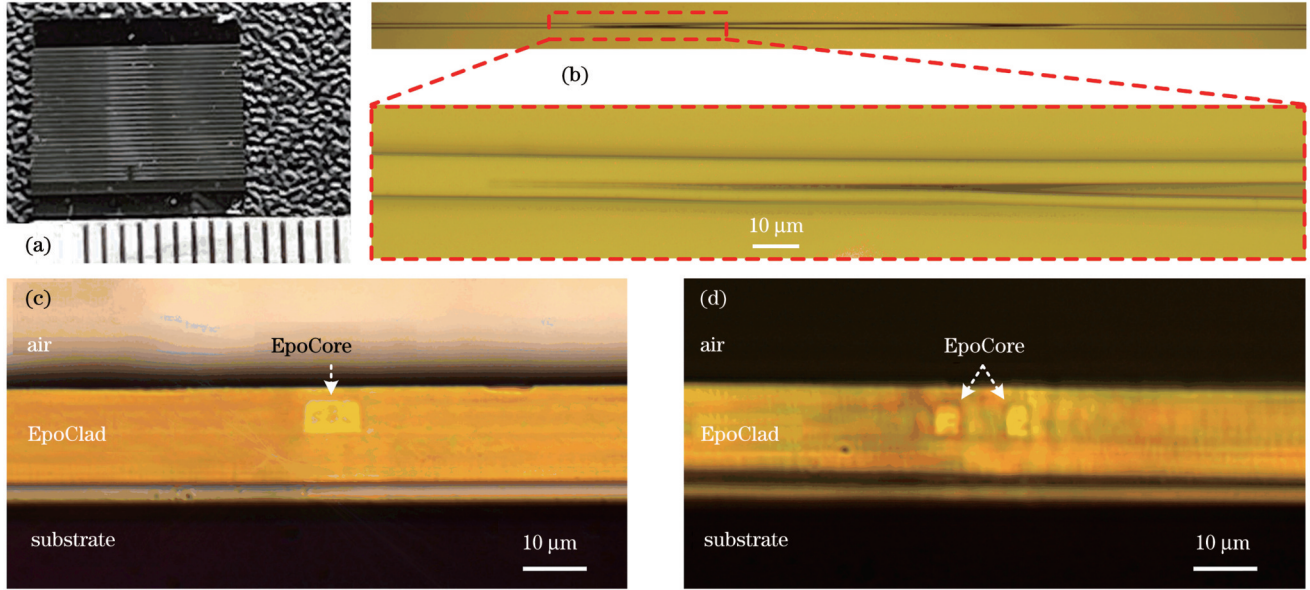


图 5 所制作的模式转换器的显微图像。(a)所制作的模式转换器芯片的照片;(b)所制作的模式转换器和放大的非对称 Y 分支(插图)的显微镜图像;(c)所制作器件的主干波导的横截面图;(d)所制作器件的中心部分的横截面图

Fig. 5 Microscope images of fabricated mode converter. (a) Photograph of fabricated mode converter chip; (b) microscope images of fabricated mode converter and enlarged asymmetric Y-junction (inset); (c) cross-sectional view of stem waveguide of fabricated device; (d) cross-sectional view of central part of fabricated device

4 测试结果和讨论

首先测试了所制作的模式转换器的性能。来自可调谐激光器的光波通过偏振控制器(PC)后经透镜单模光纤(SMF)耦合进待测器件的 stem A 端口以激发 LP_{01} 模和 LP_{11a} 模。为了激发 stem A 中的 LP_{11a} 模,我们调整了透镜 SMF 的位置,相对于芯层中心引入了适当

的位移,且相对于芯轴引入了较小的倾斜角。当 x 和 y 偏振的 LP_{01} 模和 LP_{11a} 模分别在 stem A 中激发时,利用红外相机拍摄到了 stem B 端口的近场光斑,如图 6 所示。在可调谐激光器波长范围为 $1530\sim 1560\ \text{nm}$ 的情况下,耦合到 stem A 中的 LP_{01} (LP_{11a}) 模演变为偏振不敏感的 stem B 中的 LP_{11a} (LP_{01}) 模,这与仿真结果非常吻合。

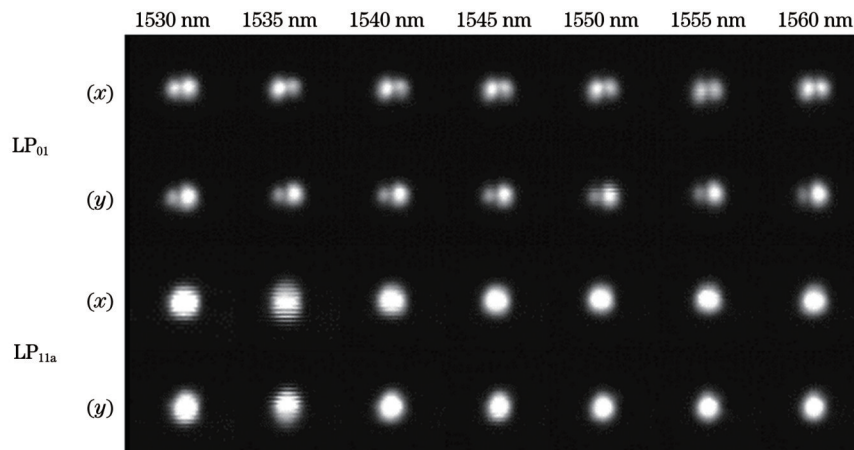


图 6 当 x 和 y 偏振的 LP_{01} 和 LP_{11a} 模分别被激发到器件中时模式转换器在不同波长下的近场图像

Fig. 6 Near-field images taken at different wavelengths for mode converter when x and y polarized LP_{01} and LP_{11a} modes are launched into device, respectively

然后,利用放大自发辐射(ASE)光源研究了 LP_{11a} - LP_{01} 的模式转换以评估器件的带宽和插入损耗。来自 ASE 的光通过透镜 SMF 耦合到器件的 stem A 中以激发 LP_{11a} 模,通过检偏器和沿输入透镜 SMF 放置的 PC 来切换输入光波的偏振态。从 stem B 端输出的光信号由另一个 SMF 收集,并连接至光谱仪(OSA)进行实时监测。该器件的归一化输出光谱如图 7 所示,这里归一化是对光纤-光纤的传输谱进行的。可以看出,在 1530~1600 nm 的波长范围内, x 偏振的插入损耗在 4.8 dB 和 5.8 dB 之间, y 偏振的插入损耗在 3.5 dB 和 5.1 dB 之间。该结果表明,该器件实现了大带宽的模式转换,且 x 和 y 偏振的情况均覆盖了 C+L 波段。波长调谐范围受到了激光光源的限制,实际上该器件的带宽要大于 C+L 波段。

如上所述,该器件的模式转换特性主要由两个非对称 Y 分支决定,因此,为了进一步研究该非对称 Y 分支的模式串扰和转换特性,我们从中间位置解理了该器件以获得非对称 Y 分支。然后,我们将 x 和 y 偏振的 LP_{01} 模分别耦合到非对称 Y 分支的宽臂波导和窄臂波导中,并获取了主干波导输出的近场光斑图像。如

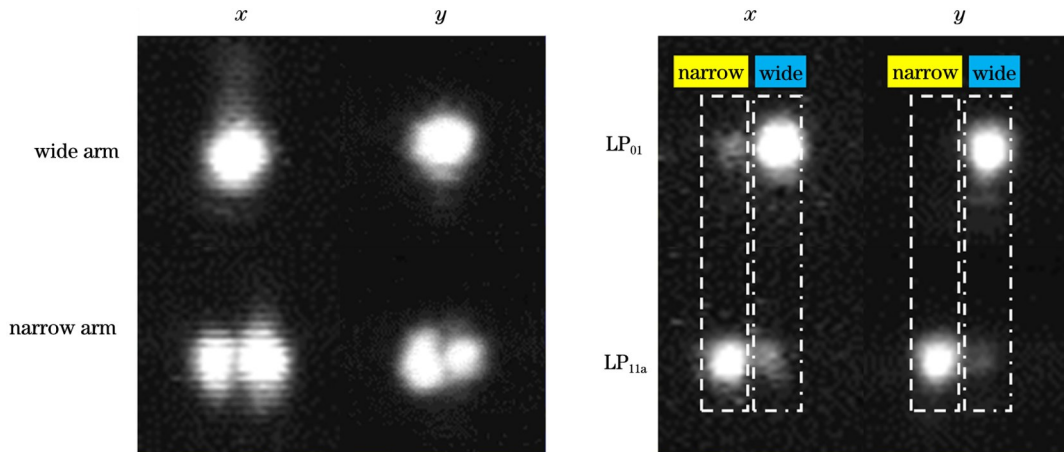


图 8 在 1550 nm 波长下非对称 Y 分支的近场输出光斑。(a) 当 x 或 y 偏振的 LP_{01} 模式在宽臂或窄臂中被激发时,主干波导输出的近场图像;(b) 当 x 和 y 偏振的 LP_{01} 或 LP_{11a} 模分别在主干波导中激发时,宽臂和窄臂波导输出的近场图像

Fig. 8 Near-field output spots of asymmetric Y-junction at 1550 nm wavelength. (a) Near-field images taken from stem waveguide when x or y polarized LP_{01} mode is excited in wide or narrow arm; (b) near-field images taken from wide and narrow arms when x and y polarized LP_{01} or LP_{11a} modes are excited in stem waveguide

我们也测试了非对称 Y 分支的模式转换效率和模式串扰。当 x 和 y 偏振的 LP_{01} (LP_{11a}) 模分别在主干波导中被激发时,宽臂和窄臂波导的输出光谱如图 9 所示。需要说明的是,这只是为了测量模式串扰,因此数据没有作归一化处理。结果表明,在忽略非对称 Y 分支的辐射损耗和波导传输损耗的前提下,在 C+L 波段内 x 和 y 偏振下的模式转换效率分别大于 98% 和 98.1%。当主干波导激发起 x (y) 偏振的 LP_{01} 模时,非对称 Y 分支的模式串扰小于 -18.5 dB (-19 dB),而当主干波导激发起 x 或 y 偏振的 LP_{11a} 模时,非对称 Y 分支的模式串扰均小于 -17.5 dB。这里仿真结果与

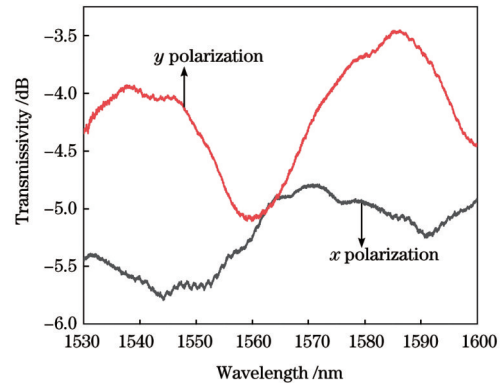


图 7 x 和 y 偏振 LP_{11a} 模在器件的 stem A 中激发时的归一化传输光谱

Fig. 7 Normalized transmission spectra when x and y polarized LP_{11a} modes are excited in stem A of device

图 8(a) 所示,在 1550 nm 波长下,当 LP_{01} 模在宽(窄)臂波导中被激发时,主干波导输出 LP_{01} (LP_{11a}) 模。此外,当 x 和 y 偏振的 LP_{01} (LP_{11a}) 模分别在主干波导中被激发时,只有宽(窄)臂波导输出 LP_{01} 模。这些结果表明,我们的非对称 Y 分支实现了低串扰且高效的模式转换。

实验结果之间的差异首先主要是由于存在不可避免的工艺误差,特别地,由于所采用的普通光刻机的分辨率只有 $1 \mu\text{m}$,故实验上难以实现所设计的尖锐且较小的非对称 Y 分支的分支角,后续可通过优化器件设计与制作工艺来减小分支角的影响,进一步提升器件性能。其次,所采用的聚合物材料较大的吸收损耗 ($1 \text{ dB/cm} \sim 2 \text{ dB/cm}$ ^[27]) 也是导致器件传输损耗较大,性能不如理论预期好的另一个重要原因,这可以通过采用低损耗的材料平台如薄膜铌酸锂、氮化硅等来弥补。

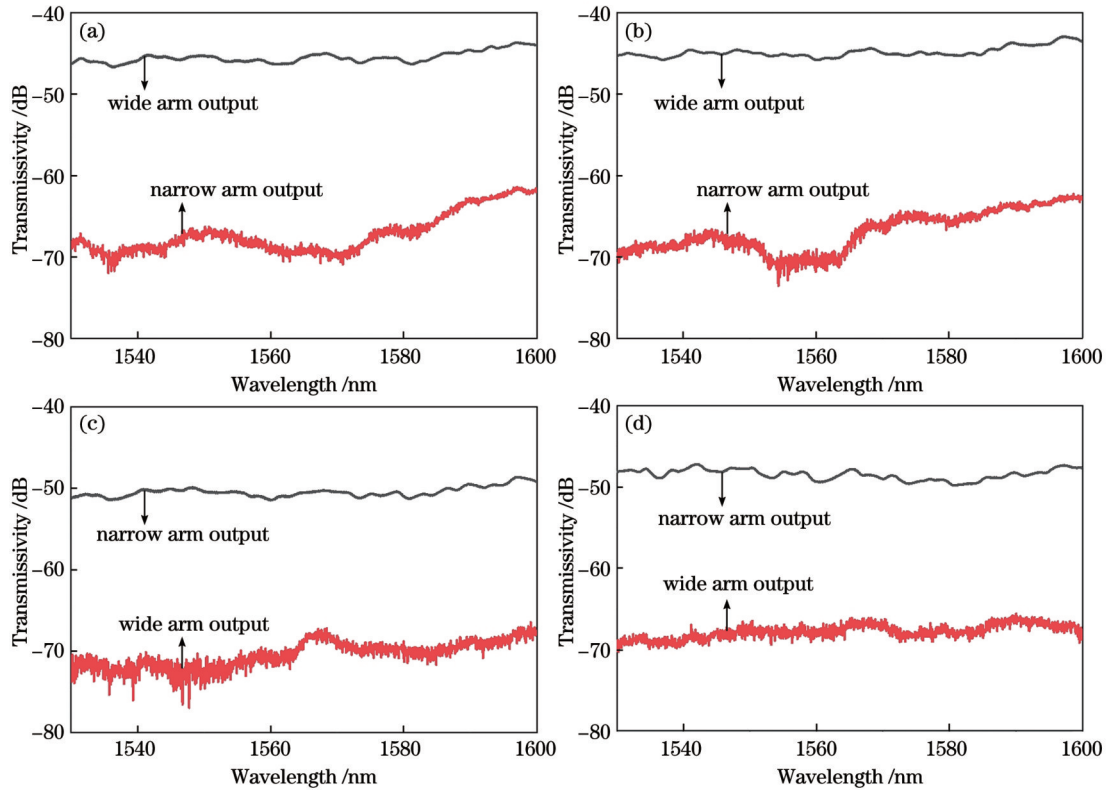


图9 非对称Y分支主干波导不同模式被激发时宽臂和窄臂的输出光谱。(a) x 偏振的 LP_{01} 模被激发;(b) y 偏振的 LP_{01} 模被激发;
(c) x 偏振的 LP_{11a} 模被激发;(d) y 偏振的 LP_{11a} 模被激发

Fig. 9 Output spectra of wide and narrow arms when different modes are excited in stem waveguide of asymmetric Y-junction.
(a) x polarized LP_{01} mode is excited; (b) y polarized LP_{01} mode is excited; (c) x polarized LP_{11a} mode is excited; (d) y polarized LP_{11a} mode is excited

5 结 论

提出了一种在聚合物平台上的基于级联非对称Y分支的模式转换器,该模式转换器可以实现 LP_{01} 模和 LP_{11a} 模的相互转换。制作的模式转换器具有 $1.5\text{ mm} \times 14.0\ \mu\text{m}$ 的紧凑尺寸。实验结果表明:在C+L波段内, x 和 y 偏振的模式转换效率均大于98%,串扰小于-17.5 dB,插入损耗小于5.8 dB。所提出的基于聚合物材料的模式转换器易于制作且成本低。特别地,同样的结构也可以在具有高折射率对比(即波导芯层和包层折射率的差值大)的材料平台上实现,比如绝缘体上铌酸锂、氮化硅和绝缘体上硅等,从而实现更紧凑的集成器件,促进MDM系统的发展。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Memon A K, Chen K X. Recent advances in mode converters for a mode division multiplex transmission system[J]. *Opto-Electronics Review*, 2021, 29(1): 13-32.
- [4] Du J B, Shen W H, Liu J C, et al. Mode division multiplexing: from photonic integration to optical fiber transmission[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(9): 091301.
- [5] Lee Y S, Lim K S, Islam M R, et al. Dynamic LP_{01} - LP_{11} mode conversion by a tilted binary phase plate[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3597-3603.
- [6] Soma D, Wakayama Y, Beppu S, et al. 10.16-peta-B/s dense SDM/WDM transmission over 6-mode 19-core fiber across the C+L band[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(6): 1362-1368.
- [7] Zhao Y H, Liu Y Q, Zhang C Y, et al. All-fiber mode converter based on long-period fiber gratings written in few-mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(22): 4708-4711.
- [8] Dong J L, Chiang K S. Temperature-insensitive mode converters with CO_2 -laser written long-period fiber gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(9): 1006-1009.
- [9] Saitoh K, Uematsu T, Hanzawa N, et al. PLC-based LP_{11} mode rotator for mode-division multiplexing transmission[J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19117-19130.
- [10] Zhao Y T, Guo X H, Zhang Y, et al. Ultra-compact silicon mode-order converters based on dielectric slots[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3797-3800.
- [11] 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.
- [12] Zhao W K, Chen K X, Wu J Y, et al. Horizontal directional coupler formed with waveguides of different heights for mode-division multiplexing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 6601509.
- [13] Huang Q D, Wu Y F, Jin W, et al. Mode multiplexer with cascaded vertical asymmetric waveguide directional couplers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(14): 2903-2911.

- [14] 于雪莲, 佐珊珊, 王鹏飞, 等. 基于定向耦合器的双芯模式转换器[J]. 光学学报, 2022, 42(13): 1323004.
- Yu X L, Zuo S S, Wang P F, et al. Dual-core mode converter based on directional coupler[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(13): 1323004.
- [15] Leuthold J, Eckner J, Gamper E, et al. Multimode interference couplers for the conversion and combining of zero- and first-order modes[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(7): 1228-1239.
- [16] Guo F, Lu D, Zhang R K, et al. Two-mode converters at 1.3 μm based on multimode interference couplers on InP substrates[J]. Chinese Physics Letters, 2016, 33(2): 024203.
- [17] Gui C C, Gao Y, Zhang Z L, et al. On-chip silicon two-mode (de)multiplexer for OFDM/OQAM data transmission based on grating-assisted coupler[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 7905807.
- [18] Xiao R L, Shi Y C, Li J A, et al. On-chip mode converter based on two cascaded Bragg gratings[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 1941-1957.
- [19] Jin W, Chiang K S. Mode converters based on cascaded long-period waveguide gratings[J]. Optics Letters, 2016, 41(13): 3130-3133.
- [20] Wang W, Wu J Y, Chen K X, et al. Ultra-broadband mode converters based on length-apodized long-period waveguide gratings[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14341-14350.
- [21] Zhao W K, Chen K X, Wu J Y. Ultra-short embedded long-period waveguide grating for broadband mode conversion[J]. Applied Physics B, 2019, 125(9): 177.
- [22] Driscoll J B, Grote R R, Souhan B, et al. Asymmetric Y junctions in silicon waveguides for on-chip mode-division multiplexing[J]. Optics Letters, 2013, 38(11): 1854-1856.
- [23] Chen W W, Wang P J, Yang T J, et al. Silicon three-mode (de)multiplexer based on cascaded asymmetric Y junctions[J]. Optics Letters, 2016, 41(12): 2851-2854.
- [24] Feng J, Chen K X, Wu J Y, et al. Mode (de)multiplexer based on polymer-waveguide asymmetric Y-junction[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2016, November 2-5, 2016, Wuhan, China. New York: IEEE Press, 2016.
- [25] Wu Y F, Chiang K S. Ultra-broadband mode multiplexers based on three-dimensional asymmetric waveguide branches[J]. Optics Letters, 2017, 42(3): 407-410.
- [26] Fujisawa T, Yamashita Y, Sakamoto T, et al. Scrambling-type three-mode PLC multiplexer based on cascaded Y-branch waveguide with integrated mode rotator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(10): 1985-1992.
- [27] Zhao W K, Feng J, Chen K X, et al. Reconfigurable broadband mode (de)multiplexer based on an integrated thermally induced long-period grating and asymmetric Y-junction[J]. Optics Letters, 2018, 43(9): 2082-2085.
- [28] Huang Y Y, Xu G Y, Ho S T. An ultracompact optical mode order converter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(21): 2281-2283.
- [29] Zhang M R, Chen K X, Jin W, et al. Electro-optic mode switch based on lithium-niobate Mach-Zehnder interferometer[J]. Applied Optics, 2016, 55(16): 4418-4422.
- [30] Zhang M R, Chen K X, Wang M K, et al. Electro-optic reconfigurable two-mode (de)multiplexer on thin-film lithium niobate[J]. Optics Letters, 2021, 46(5): 1001-1004.
- [31] Ohana D, Desiatov B, Mazurski N, et al. Dielectric metasurface as a platform for spatial mode conversion in nanoscale waveguides[J]. Nano Letters, 2016, 16(12): 7956-7961.
- [32] Love J D, Riesen N. Single-, few-, and multimode Y-junctions[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(3): 304-309.
- [33] Burns W K, Milton A F. Mode conversion in planar-dielectric separating waveguides[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1975, 11(1): 32-39.
- [34] Riesen N, Love J D. Design of mode-sorting asymmetric Y-junctions[J]. Applied Optics, 2012, 51(15): 2778-2783.

Compact, Broadband, and Efficient LP_{01} - LP_{11a} Mode Converter Based on Cascaded Asymmetric Y-Junction

Zhang Hao, Deng Jiayao, Wang Mengke, Ma Xiaoxia, Chen Kaixin*

School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China

Abstract

Objective The current information capacity of communication systems based on single-mode fibers (SMFs) is approaching its physical limits. To solve this problem, spatial-division multiplexing based on mode-division multiplexing (MDM) has been intensively investigated. Due to its orthogonal characteristics, MDM can help realize more multiplexed channels, and thus the capacity of existing optical fiber communications can be enhanced. Mode converters are critical devices in optical-fiber communication systems and are essential for improving the performance of future MDM systems applicable in long-distance and high-capacity optical-fiber communication. Mode-conversion efficiency is a major index of mode converters. Mode converters based on asymmetric Y junctions on polymer platforms offer the advantages of low cost, high fabrication tolerance, and wide bandwidth. Thus, the design and fabrication of mode converters with compact structures and high mode-conversion efficiencies based on asymmetric Y junctions on polymer platforms are essential to meet the increasing demands in data traffic.

Methods The proposed mode converter consists of two identical inversely connected asymmetric Y junctions. The stem of the Y junction is a straight two-mode waveguide designed to support only the E_{11}^i and E_{21}^i modes ($i=x$ or y , indicating the polarization direction), which correspond to the LP_{01} and LP_{11a} modes (polarized in the i direction) of the optical fiber, respectively. This two-mode

core gradually branches into two single-mode cosine S bends with different widths, forming an asymmetric Y junction. Based on the mode evolution principle of the asymmetric Y junction, the parameters of the proposed mode converter based on a cascaded asymmetric Y junction (Fig. 1) are optimized in this study. These parameters include the widths of the core (w_1), arms A and D (w_2), and arms B and C (w_3), as well as the length of the arm (L), width of the Y-junction end (w_4), and distance between the two Y-junction ends (w_5). A three-dimensional finite-difference beam-propagation method (3DFD-BPM) is used to simulate the mode-conversion characteristics of the proposed mode converter. Under these device parameters, the proposed mode converter is fabricated with in-house microfabrication facilities. In addition, an experiment is conducted to characterize the mode-conversion performance of the proposed mode converter.

Results and Discussions In the proposed mode converter, the waveguide core height is fixed at $4\ \mu\text{m}$, and w_1 , w_2 , and w_3 are set to 9.0 , 6.3 , and $2.7\ \mu\text{m}$, respectively. The refractive-index difference between the core and cladding is sufficient to achieve mode conversion. The mode-conversion efficiency between the LP_{01} and LP_{11a} modes is optimal when the length of the arm, width of the Y-junction end, and distance between the two Y-junction ends are $1.5\ \mu\text{m}$, $3.1\ \mu\text{m}$, and $6.8\ \mu\text{m}$, respectively. The simulation results show that the mode-conversion efficiencies for the x polarized LP_{01} - LP_{11a} and LP_{11a} - LP_{01} are 99.3% and 99.2% , respectively (Fig. 4). An experiment is conducted to characterize the mode-conversion performance, and the near-field spots detected by the infrared camera indicate that the device can implement mode conversion (Fig. 6). Over a wavelength of $1530\text{--}1600\ \text{nm}$, the insertion losses are between $\sim 4.8\ \text{dB}$ and $\sim 5.8\ \text{dB}$ and between $\sim 3.5\ \text{dB}$ and $\sim 5.1\ \text{dB}$ for the x and y polarizations, respectively (Fig. 7). To investigate further the mode-conversion and crosstalk characteristics at the asymmetric Y junction of the device, the device is cleaved at the middle position to obtain an asymmetric Y junction. The results show that, under the premise of neglecting the radiation losses of the asymmetric Y junction and propagation losses of the waveguide, the mode-conversion efficiencies are greater than $\sim 98\%$ and $\sim 98.1\%$ for the x and y polarizations over the C+L band, respectively, and the mode crosstalk is less than $-17.5\ \text{dB}$ (Fig. 9).

Conclusions We propose and demonstrate a mode converter constructed using two identical asymmetric Y junctions connected inversely. Our proof-of-concept mode converter, designed for the conversion of the LP_{01} and LP_{11a} modes and fabricated using an optical polymer material, has a miniature footprint of approximately $1.5\ \text{mm} \times 14.0\ \mu\text{m}$. The results show that over the C+L band and for both polarizations, the mode-conversion efficiencies are greater than $\sim 98\%$, the crosstalk is less than $\sim -17.5\ \text{dB}$, and the insertion loss is less than $\sim 5.8\ \text{dB}$. Our proposed mode converter with polymeric materials is easy to fabricate and inexpensive. In particular, the same structure can be implemented with other high refractive index contrast material platforms such as lithium niobate on insulators, silicon nitride, and silicon on insulators to realize more advanced integrated photonic circuits.

Key words fiber optics; optical devices; mode converter; mode-division multiplexing; polymer waveguides; integrated optics; asymmetric Y-junction