

引用格式: LIN Jian, LIU Yuxiao, FU Qiang, et al. Scalable Multimode Waveguide Bend Based on Tapered Couplers[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(7):0713001

林健,刘雨潇,符强,等. 基于锥形渐变耦合结构的可扩展多模弯曲波导[J]. 光子学报, 2023, 52(7):0713001

基于锥形渐变耦合结构的可扩展多模弯曲波导

林健¹, 刘雨潇¹, 符强³, 李军¹, 汪鹏君², 陈伟伟¹

(1 宁波大学 信息科学与工程学院, 宁波 315211)

(2 温州大学 电气与电子工程学院, 温州 325035)

(3 宁波大学 科学技术学院, 宁波 315300)

摘 要:提出了一种基于锥形渐变耦合结构的可扩展多模弯曲波导。该器件利用模式等效折射率匹配原理,通过对称的锥形渐变耦合结构,实现高阶模式与基模的相互转化,完成多模弯曲传输功能。同时,结合时域有限差分方法和粒子群优化算法,优化锥形渐变耦合结构区域,提升器件性能。实验测试结果表明,在 1 520~1 600 nm 的波长范围内,当输入模式分别为 TE₀、TE₁、TE₂、TE₃和 TE₄时,该器件的插入损耗分别小于 1.71 dB、3.04 dB、2.90 dB、3.16 dB 和 4.00 dB,对应的串扰分别小于 -10.60 dB、-11.35 dB、-10.92 dB、-10.35 dB 和 -11.45 dB。

关键词:集成光学;多模弯曲波导;粒子群算法;锥形耦合器;有限时域差分法

中图分类号:TN256

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235207.0713001

0 引言

近年来,云计算、大数据等业务对大容量互连的需求迅速增长。在传统电互连面临瓶颈之际,硅基光互连凭借其高速、大带宽和易集成等特点而备受关注^[1-3]。与此同时,为了满足日益增长的带宽需求,各种先进的多路复用技术^[4-7]应用而生,如空间分复用(Spatial-Division-Multiplexing, SDM)、偏振复用(Polarization-Division-Multiplexing, PDM)、波分复用(Wavelength-Division-Multiplexing, WDM)和模分复用(Mode-Division-Multiplexing, MDM)等。其中,MDM技术利用波导支持多种模式传输,将信号搭载至不同光模式上传输,可成倍提升传输容量^[8]。

多模弯曲波导是模分复用系统中的关键元器件之一,许多学者已对其开展了研究工作。其中,部分学者使用了各种算法来辅助优化多模弯曲波导结构。如 2012 年, GABRIELLI L H 等通过变换光学(Transformation Optics, TO)算法对可同时承载 3 种最低阶横电(Transverse Electric, TE)模式的传统多模弯曲波导进行优化^[9]。2017 年, SUN C L 等利用粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法对弯曲波导的输入及输出端波导宽度进行优化,实现了 TE₀和 TE₁模式的高效传输^[10]。SUN S 等通过算法进行双自由曲线模型的逆设计,所制得的多模弯曲波导可支持 TE₀、TE₁、TE₂和 TE₃模式^[11]。类似地,还有学者使用其它曲线模型代替传统 90°弯曲波导来完成多模传输。如 JIANG X H 等提出了使用欧拉曲线代替传统 90°弯曲波导曲线^[12],该多模弯曲波导可支持 4 种最低阶的横磁(Transverse Magnetic, TM)模式传输。除了使用算法对多模弯曲波导进行优化设计,工艺制造技术的改进也促发了研究者新的尝试。XU H N 团队报道了一种表面覆盖聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate, PMMA)基于超表面结构的多模弯曲波导^[13],可同时支持 TM₀、TM₁、TM₂和 TM₃模式传输。此外,还有学者在多模弯曲波导处引入光子晶体、亚波长光栅等结构进行研究。CHANG W J 等在弯曲波导区域采用类光子晶体结构实现 TE₀和 TE₁模式的传输^[14]。LIU Y J 等

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 62275134, 62234008, 61875098),浙江省自然科学基金(No. LY20F050003),宁波市自然科学基金(Nos. 2022J099, 202003N4159)

第一作者:林健, 2111082011@nbu.edu.cn

通讯作者:陈伟伟, chenweiwei@nbu.edu.cn

收稿日期:2023-01-04; **录用日期:**2023-03-06

<http://www.photon.ac.cn>

也在弯曲波导处刻蚀光子晶体,并通过逆设计进行仿真优化,实现了可支持 TE_0 、 TE_1 和 TE_2 模式的多模弯曲波导^[15]。WU H等将弯曲波导表面刻蚀形成亚波长光栅,可支撑 TE_0 、 TE_1 、 TE_2 和 TE_3 模式^[16]。GAO S团队提出一种基于梯度浅刻蚀槽的多模弯曲波导,可支持 TE_0 、 TE_1 、 TE_2 和 TE_3 模式^[17]。上述工作中,虽然研究者提出的多模弯曲波导具备良好的性能,但往往只能支持2至4种模式进行弯曲传输,不易拓展至更高阶模式。

因此,本文提出了一种易级联、可扩展、基于锥形渐变耦合结构的多模弯曲波导。通过利用模式等效折射率匹配原理,实现高阶模与基模之间的相互转换,并采用时域有限差分法和粒子群智能算法,优化器件结构参数,提升器件性能。以支持 TE_0 、 TE_1 、 TE_2 、 TE_3 和 TE_4 模式传输的多模弯曲波导为例,详细介绍器件的仿真设计与参数优化。采用商用的互补式金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)兼容工艺制备基于锥形渐变耦合结构的多模弯曲波导,并采用垂直耦合测试平台对其进行测试分析。

1 器件原理与设计

图1所示为基于锥形渐变耦合结构的多模弯曲波导结构示意图。如图1(a)所示,所提出的多模弯曲波导主要由模式解复用模块、模式复用模块和弯曲波导模块组成。其中,模式解复用模块和模式复用模块是由锥形渐变耦合结构级联而成。通过增加锥形渐变耦合结构,可实现多模弯曲波导所支撑模式的扩展,完成多模式弯曲传输功能。器件所支撑模式的数量主要取决于模式复用/解复用模块可复用/解复用模式的数量。图1(b)为耦合区域的细节放大图。图1(c)是沿A-A'的截面图。由图1(c)所示可知,波导芯层为Si,包层为 SiO_2 。其中,波导的厚度 H 为220 nm。图2所示为各个模式等效折射率随波导宽度的变化情况。基模从 I_0 输入端口输入时,由于不满足等效折射率匹配条件,直接沿着主干波导传输,并通过对称结构从 O_0 输出端口输出;高阶模从 I_0 输入端口输入时,由于在对应的锥形渐变耦合结构区域满足了等效折射率匹配条件,则高阶模从主干波导耦合至附近的锥形波导,并转化为基模向前传输,直至对称的锥形渐变耦合结构区域转化回高阶模,从 O_0 输出端口输出。若以支持 TE_0 、 TE_1 、 TE_2 、 TE_3 、 TE_4 模式传输的多模弯曲波导为例,

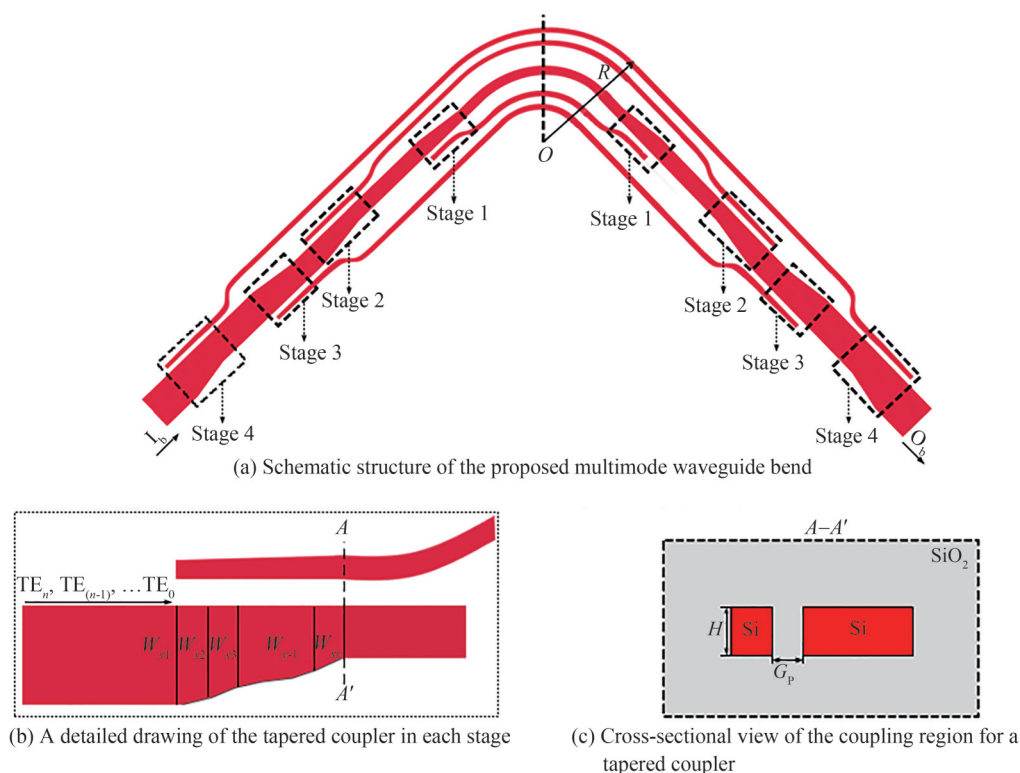


图1 提出的多模弯曲波导结构示意图、细节图、截面图

Fig.1 The schematic diagram of the proposed multimode waveguide bend, a detailed drawing of the tapered coupler, cross-sectional view of the coupling region

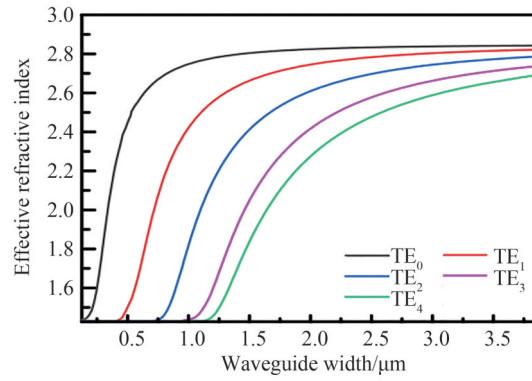


图2 条形硅波导中本征模式等效折射率随波导宽度变化关系图

Fig.2 Calculated effective refractive indices of eigenmodes in a silicon strip waveguide changing with the waveguide width

TE₀模式从I₀端口输入时,由于不满足等效折射率匹配条件,直接沿着主干波导传输,并通过对称结构从O₀端口输出;TE₄、TE₃、TE₂和TE₁模式从I₀输入端口输入时,由于在Stage4、Stage3、Stage2和Stage1处的锥形渐变耦合结构区域满足了等效折射率匹配条件,分别从主干波导耦合至附近的锥形波导,并转化为TE₀模式向前传输,直至对称的锥形渐变耦合结构区域,依次转化对应的高阶模式,沿着主干波导传输,并从O₀端口输出,从而实现多模弯曲传输。

以优化TE₀、TE₁、TE₂、TE₃、TE₄模式传输的多模弯曲波导为例,进行器件设计详细说明。为了使器件具有良好的性能,在整个设计过程中,通过采用时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)方法进行整体仿真建模,并结合PSO算法对器件结构参数进行优化。如图1(b)所示,将待优化锥形波导等分成N个长度为1 μm的小单元,并将各单元锥形波导的宽度标记为W_{xy}(x=1,2,3,4; y=1,2,⋯)。算法优化过程中,品质因数(Figure of Merit, FoM)定义为

$$\text{FoM} = T_{\text{TE}_i - \text{TE}_0} (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

式中, $T_{\text{TE}_i - \text{TE}_0}$ 表示在Stage i 锥形渐变耦合结构区域,TE _{i} 模式转化为TE₀模式的转换效率。

使用PSO算法的优化过程为:1)设置节点宽度,即初始化每个粒子的位置;2)进行FDTD仿真获得当前位置的个体最优值和当前节点全局最优值;3)根据式(2)更新粒子速度;4)根据式(3)更新粒子当前位置,进行FDTD仿真并计算最优值;5)判定FoM是否最佳,若为最佳则确定粒子位置并进入下一节点循环,否则回到步骤3)。

$$V_{n+1} = W_i \times V_n + C_1 \times \text{rand}() \times (b_n - t_n) + C_2 \times \text{rand}() \times (g_n - t_n) (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

$$t_{n+1} = t_n + V_n (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

式中, W_i 表示惯性权重, V_n 表示粒子当前速度, C_1 和 C_2 分别表示自我认知率和粒子社交率, $\text{rand}()$ 是介于0到1之间均匀分布的随机数, b_n 表示当前最佳位置, t_n 表示粒子当前位置, g_n 示全局最佳位置。考虑到制备工艺的最小特征尺寸, G_p 选取为150 nm。图3所示FoM与迭代次数的变化关系。可见,Stage1、Stage2、Stage3

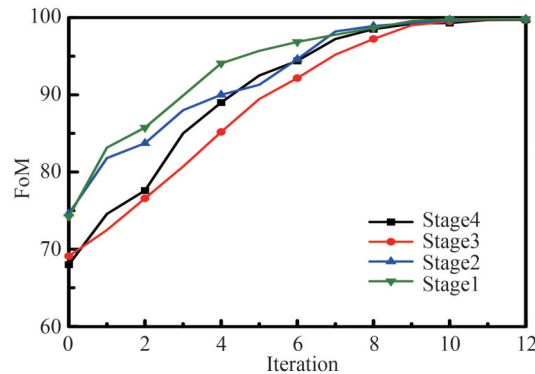


图3 FoM随迭代次数变化关系

Fig. 3 FoM as a function of the number of iterations

和 Stage4 的 FoM 值分别在迭代次数为 10、10、11 和 11 时达到最大。表 1 总结了优化后的各阶段锥形波导最佳节点宽度。

表 1 优化后各锥形波导的最优节点宽度
Table 1 Optimized widths of the tapered waveguide at each stage

Stage	Symbol	Value/ μm	Symbol	Value/ μm	Symbol	Value/ μm	Symbol	Value/ μm
Stage4	L_{41}	1.70	L_{42}	1.69	L_{43}	1.67	L_{44}	1.62
	L_{45}	1.61	L_{46}	1.57	L_{47}	1.56	L_{48}	1.54
	L_{49}	1.52	L_{410}	1.48	L_{411}	1.43	L_{412}	1.40
	L_{31}	1.40	L_{32}	1.38	L_{33}	1.34	L_{34}	1.25
Stage3	L_{35}	1.22	L_{36}	1.19	L_{37}	1.16	L_{38}	1.12
	L_{39}	1.08	L_{310}	1.05				
	L_{21}	1.05	L_{22}	1.02	L_{23}	1.01	L_{24}	0.97
Stage2	L_{25}	0.94	L_{26}	0.91	L_{27}	0.86	L_{28}	0.83
	L_{29}	0.80	L_{210}	0.78	L_{211}	0.75		
	L_{11}	0.75	L_{12}	0.73	L_{13}	0.69	L_{14}	0.68
Stage1	L_{15}	0.65	L_{16}	0.60	L_{17}	0.58	L_{18}	0.52
	L_{19}	0.45						

2 仿真结果与分析

在完成器件的结构参数优化后,使用 FDTD 进行整体性能仿真。图 4 是 TE_0 模式、 TE_1 模式、 TE_2 模式、 TE_3 模式和 TE_4 模式在多模弯曲波导中的仿真光路。可以看出,该器件的功能可以很好地执行,即当 TE 高阶模式输入时,先由锥形渐变耦合结构转换为 TE 基模,随后在弯曲波导内传输,最后通过对称的锥形渐变耦合结构再转换为 TE 高阶模式后输出,而 TE 基模输入时,光模式不会发生耦合而直接进入弯曲波导传输,并通过结构对称的输出波导输出。

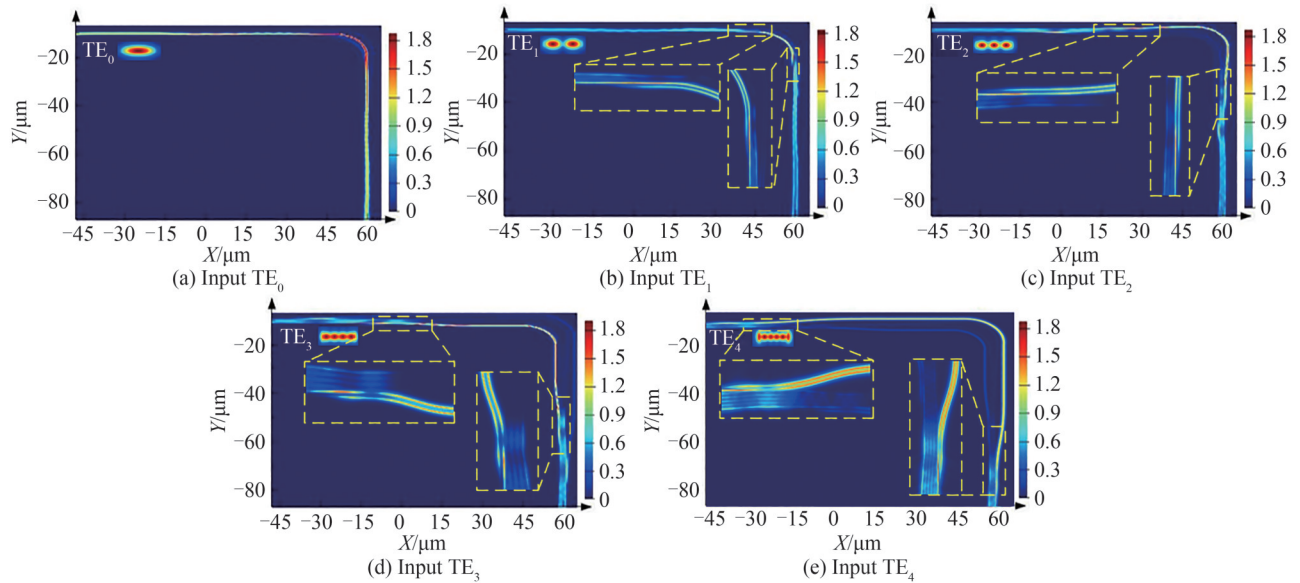


图 4 在 1 550 nm 工作波长处, TE_0 、 TE_1 、 TE_2 、 TE_3 和 TE_4 输入模式在所设计多模弯曲波导中的仿真光路
Fig. 4 Simulated light propagation in the designed multimode waveguide bend with input TE_0 、 TE_1 、 TE_2 、 TE_3 and TE_4 modes at an operating wavelength of 1 550 nm

图 5 是所设计的多模弯曲波导在 1 500 nm 至 1 600 nm 波长范围内的传输谱线。可知,在 1 500 nm 至 1 600 nm 的波长范围内,当输入 TE_0 模式时,器件的插入损耗 (Insertion Loss, IL) 低于 0.087 dB,串扰 (Crosstalk, CT) 低于 -20.72 dB; 当输入 TE_1 模式时,器件的插入损耗低于 0.27 dB,串扰低于 -19.81 dB; 当输入 TE_2 模

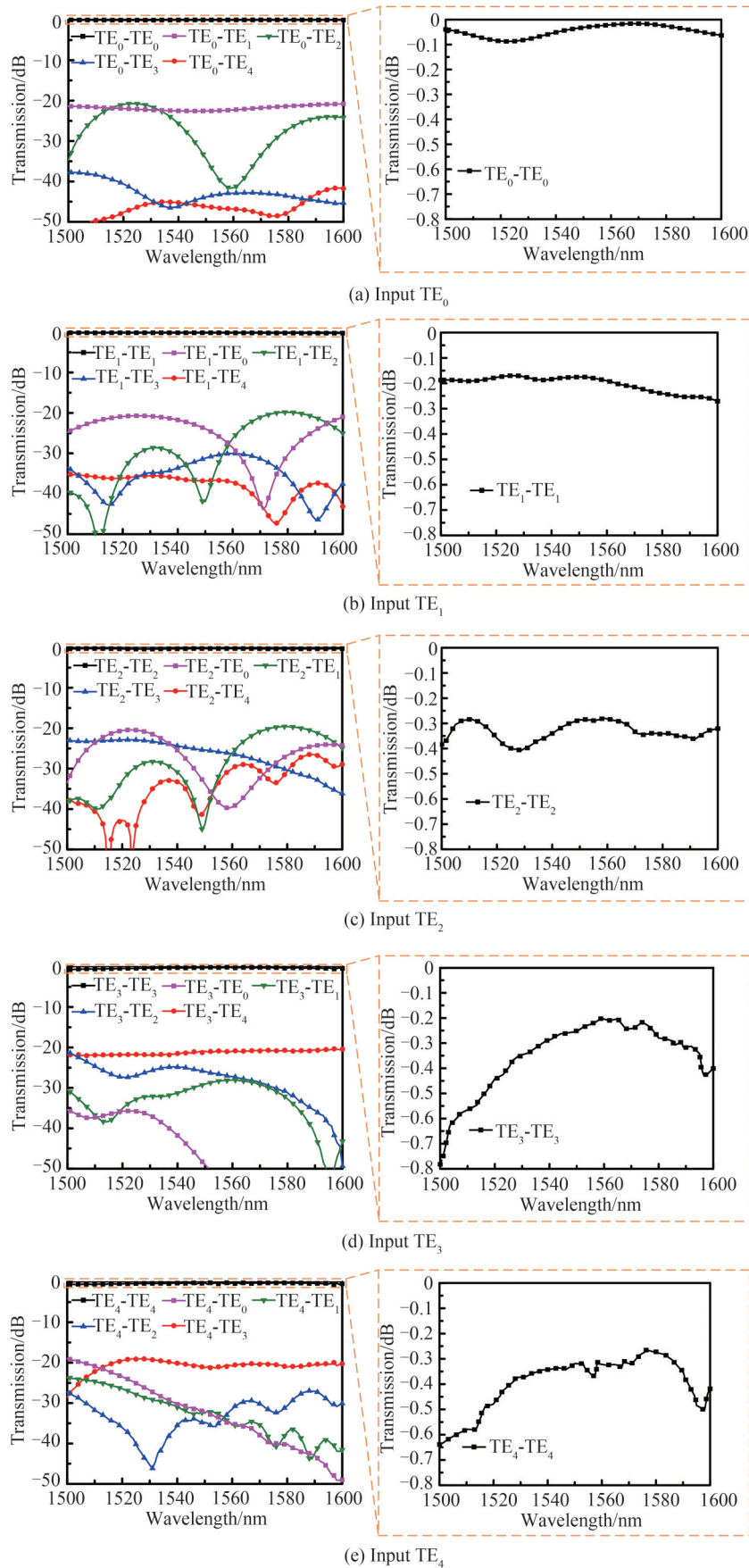


图5 所设计多模弯曲波导的仿真传输谱线

Fig. 5 Simulated transmission spectra of the designed multimode waveguide bend

式时,器件的插入损耗低于0.40 dB,串扰低于-19.60 dB;当输入 TE_3 模式时,器件的插入损耗低于0.78 dB,串扰低于-20.34 dB;当输入 TE_4 模式时,器件的插入损耗低于0.75 dB,串扰低于-19.03 dB。插入损耗和串扰的计算公式为

$$IL_{TE_k} = -10\log(P_{TE_{k-Output}}/P_{TE_{k-Input}}) \quad (k=0,1,\dots,4) \quad (4)$$

$$CT_{TE_k} = 10\log(\sum_{j=0(j \neq k)}^4 (P_{TE_{j-Output}})/(P_{TE_{k-Input}})) \quad (k=0,1,\dots,4) \quad (5)$$

式中, $P_{TE_{k-Input}}$ 是在输入端口处输入 TE_k 模式的功率值, $P_{TE_{k-Output}}$ 和 $P_{TE_{j-Output}}$ 是在输出端口处检测到的 TE_k 和 TE_j 模式的对应功率值。

考虑到实际制备过程中工艺因素导致器件结构偏差,造成所设计多模弯曲波导的性能有所变化,所以需对器件的工艺容差做进一步分析与讨论。图6表示在1550 nm波长处,各输入模式在多模弯曲波导内传输效率与波导宽度偏差 ΔW 的变化关系。仿真结果表明, ΔW 由-20 nm变化到20 nm的情况下, TE_0 、 TE_1 、 TE_2 、 TE_3 以及 TE_4 模式的传输效率分别保持在88.78%、94.67%、84.76%、93.38%、94.45%以上。由此可以得出,在波导宽度偏差 ΔW 为 ± 20 nm 的范围内, TE_1 、 TE_3 和 TE_4 模式的传输效率受 ΔW 影响较小;而 TE_0 和 TE_2 受 ΔW 影响较大,但总体仍在可接受的范围内。

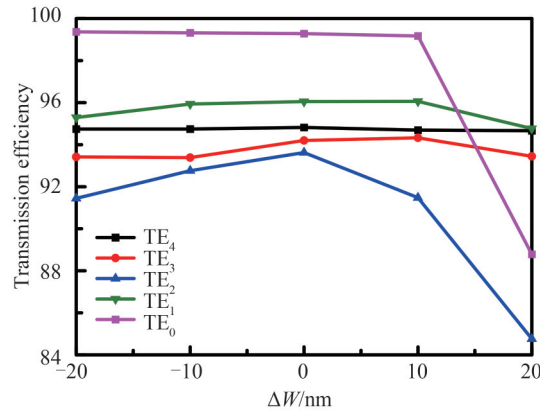


图6 在1550 nm处,各输入模式的传输效率随容差 ΔW 变化关系

Fig. 6 Transmission efficiency of the designed multimode waveguide bend changing with ΔW at 1550 nm

图7表示1550 nm波长处,各输入模式在多模弯曲波导内传输效率与波导高度偏差 ΔH 的变化关系。当 ΔH 由-20 nm变化到20 nm, TE_0 、 TE_1 、 TE_2 、 TE_3 、 TE_4 模式的传输效率分别保持在90.17%、93.52%、85.71%、91.59%、92.18%以上。通过分析比较,在容差 ΔH 为 ± 20 nm 的范围内, TE_1 、 TE_3 和 TE_4 模式的传输效率受 ΔH 影响较小;而 TE_0 和 TE_2 受 ΔH 影响较大。为了考虑波导宽度偏差 ΔW 和波导高度偏差 ΔH 同时作用时对器件性能的影响,将波导宽度容差 ΔW 设置为20 nm,将波导厚度容差 ΔH 设置为-20 nm,进行仿真分析。结果表明,在1550 nm工作波长处, $TE_0 \sim TE_4$ 模式的传输效率分别为69.25%、70.23%、57.68%、

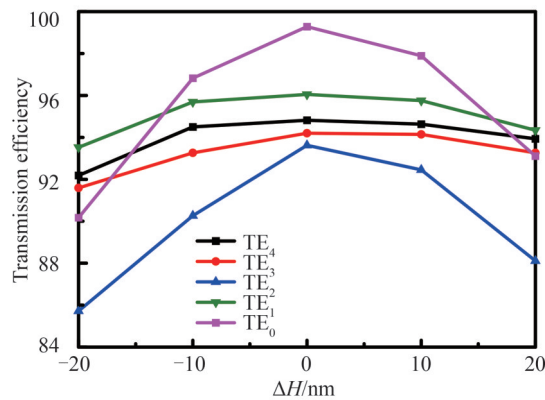


图7 在1550 nm处,各输入模式的传输效率随容差 ΔH 变化关系

Fig. 7 Transmission efficiency of the designed multimode waveguide bend changing with ΔH at 1550 nm

68.66%、67.52%。由此可见,波导宽度偏差 ΔW 和波导高度偏差 ΔH 同时发生变化对于器件的性能影响较大。

3 实验结果与分析

所设计基于锥形渐变耦合结构的多模弯曲波导采用商用的兼容CMOS工艺进行制备^[18]。图8是在高倍电子显微镜下拍摄的多模弯曲波导图像,包括一个 5×5 通道的多模弯曲波导和一对基于级联锥形渐变耦合结构的模式复用器/解复用器。该器件在垂直耦合测试平台上进行测试,具体步骤为:1)将载物台调整到合适位置,调整并固定光源,调整显微镜焦距;2)放置芯片,调整放大倍数使其在电脑上呈现清晰的像;3)将输入光纤对接宽带光源,并将输出光纤连接功率分器后再分别对接光功率计和光谱仪;4)移动光纤位置使之对准芯片上的输入输出耦合光栅;5)扫描然后记录功率计和光谱仪的数据。图9是所制备的多模弯曲波导的光功率传输谱线。采用可调谐半导体激光器(SANTEC TSL-550)和多端口光功率计(SANTEC MPM-210)

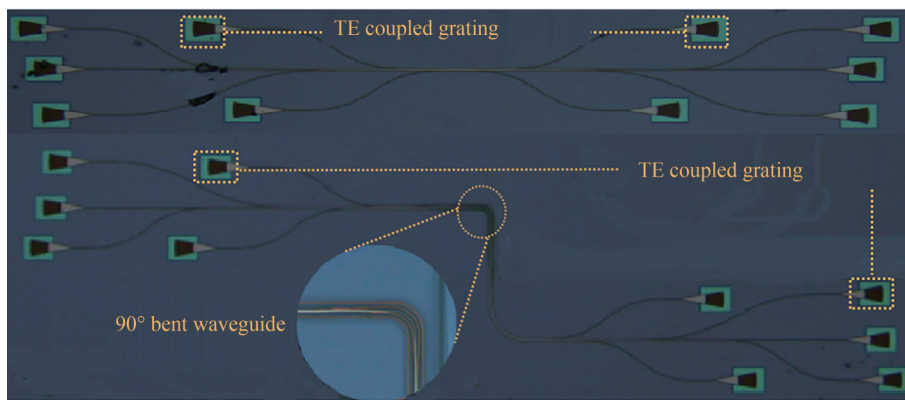


图8 制作的多模弯曲波导显微图像

Fig. 8 Microscopic image of the fabricated multimode waveguide bend

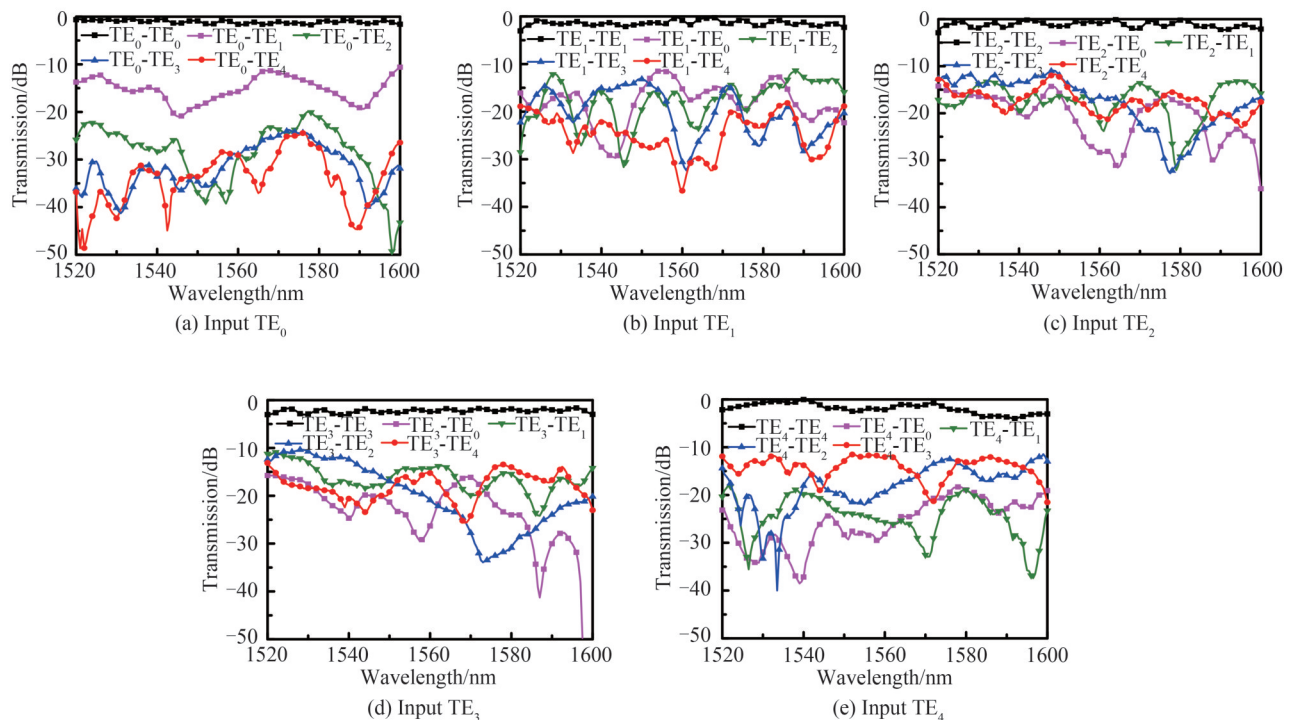


图9 制备的多模弯曲波导的传输谱线

Fig. 9 Measured transmission spectra of the fabricated multimode waveguide bend

对器件性能进行表征。当光束从端口输入时,分别测量各个端口接收到的传输谱线,并通过一对基于级联锥形渐变耦合结构的模式复用器/解复用器的透射光谱进行归一化。在1 520 nm到1 600 nm波长范围内,当输入TE₀模式时,器件的插入损耗低于1.71 dB,串扰低于-10.60 dB;当输入TE₁模式时,器件的插入损耗低于3.04 dB,串扰低于-11.35 dB;当输入TE₂模式时,器件的插入损耗低于2.9 dB,串扰低于-10.92 dB;当输入TE₃模式时,器件的插入损耗低于3.16 dB,串扰低于-10.35 dB;当输入TE₄模式时,器件的插入损耗低于4.00 dB,串扰低于-11.45 dB。

通过仿真和实验的数据分析可以发现两者结果有所不同。一方面,由于光源带宽的限制,测试所得带宽略小于仿真所得带宽;另一方面,导致性能差距的因素主要来自于实际制备器件时的工艺误差。波导内壁非均匀的粗糙程度导致散射损耗,实际波导的宽度偏离最佳值,以及波导刻蚀厚度的变化导致模式之间的转化和耦合能力下降,从而使实物测试的性能大打折扣。

表2描述的是所提出的多模弯曲波导和已报道的多模弯曲波导性能对比情况。可以发现,本文所提出的多模弯曲波导具有较大的工作带宽和最多的模式承载数量,并且该器件还可通过级联拓展继续增加所承载的模式数量;有较小的有效半径,可以更加紧凑地完成集成光路系统中的器件部署;但是受工艺制作水平的限制,实际测试的插入损耗和串扰偏大,可通过进一步提升工艺制作水平来改善器件的插入损耗和串扰。

表2 多模弯曲波导性能对比情况

Table 2 A comparison of the presented multimode waveguide bend with other reported multimode waveguide bends

Ref.	Modes	Effective radius/ μm	Simulation			Measurement		
			IL/dB	CT/dB	BW/nm	IL/dB	CT/dB	BW/nm
10	2	5	<0.12	<-23.00	1 500~1 600	<0.20	<-22.00	1 500~1 600
11	4	10	<0.13	<-29.00	1 500~1 600	<0.72	<-25.00	1 520~1 600
12	4	45	<0.10	<-25.00	1 500~1 600	<0.50	<-20.00	1 520~1 610
13	4	30	<0.44	<-20.00	1 500~1 600	<1.00	<-20.00	1 520~1 600
14	2	3.6	<0.70	<-25.00	1 520~1 580	<0.80	<-24.00	1 520~1 580
15	3	3.9	<0.84	<-20.00	1 520~1 600	<0.95	<-20.00	1 520~1 600
16	3	10	<0.5	<-30.00	1 500~1 600	<0.7	<-22.00	1 520~1 600
17	4	5.6	<0.46	<-18.00	1 500~1 600	<1.00	<-14.00	1 510~1 580
This work	5	10	<0.78	<-19.03	1 500~1 600	<4.00	<-10.35	1 520~1 600

4 结论

本文提出、设计并分析了一种易级联、可扩展、基于锥形渐变耦合结构的多模弯曲波导结构。通过利用等效折射率匹配原理,在锥形渐变耦合结构区域,实现高阶模式与基模的相互转化,继而完成多模弯曲传输功能。以同时支持TE₀、TE₁、TE₂、TE₃和TE₄模式的多模弯曲波导为例,通过时域有限差分方法结合粒子群优化算法优化器件结构参数,减小器件的插入损耗和降低模间串扰。仿真结果表明,在1 500 nm至1 600 nm波长范围内,当输入TE₀、TE₁、TE₂、TE₃和TE₄模式时,所设计多模弯曲波导的插入损耗均低于0.78 dB,串扰均小于-19.03 dB;测试结果显示,在1 520 nm到1 600 nm的波长范围内,制备所得器件的插入损耗均低于4.00 dB,串扰均小于-10.35 dB。通过优化制备工艺,可进一步减少插入损耗并降低模间串扰。设计的多模弯曲波导是模分复用系统中的关键元件之一,有望集成其它元件,以应用于片上光互连,提升传输容量。

参考文献

- [1] GUNN C. CMOS photonics for high-speed interconnects[J]. IEEE Micro, 2006, 26(2): 58-66.
- [2] MILLER D A B. Device requirements for optical interconnects to silicon chips[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(7): 1166-1185.
- [3] KIRCHAIN R, KIMERLING L. A roadmap for nanophotonics[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 303-305.
- [4] MIZUNO T, MIYAMOTO Y. High-capacity dense space division multiplexing transmission[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 35(2): 108-117.

- [5] DAI D X. Silicon nanophotonic integrated devices for on-chip multiplexing and switching[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(4): 572-587.
- [6] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [7] LI G, BAI N, ZHAO N, XIA C. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2014, 6(4): 413-487.
- [8] DAI D, BOWERS J E. Silicon-based on-chip multiplexing technologies and devices for Peta-bit optical interconnects[J]. *Nanophotonics*, 2014, 3(4): 283-311.
- [9] GABRIELLI L H, LIU D, JOHNSON S G, et al. On-chip transformation optics for multimode waveguide bends[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1217): 1-6.
- [10] SUN C L, YU Y, CHEN G, et al. Ultra-compact bent multimode silicon waveguide with ultralow inter-mode crosstalk[J]. *Optics Letter*, 2017, 42(15): 3004-3007.
- [11] SUN S S, YANG Z Q, WANG J L, et al. Ultra-sharp silicon multimode waveguide bends based on double free-form curves[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(6): 1484-1490.
- [12] JIANG X H, WU H, DAI D X. Low-loss and low-crosstalk multimode waveguide bend on silicon[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17680-17689.
- [13] XU H N, SHI Y C. Ultra-Sharp multimode waveguide bending assisted with metamaterial-based mode converters[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(3): 1700240.
- [14] CHANG W J, LU L, LIU D, et al. Ultra-compact silicon multimode waveguide bend based on subwavelength asymmetric Y junction[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2018.
- [15] LIU Y J, XU K, WANG S, et al. Arbitrarily routed mode-division multiplexed photonic circuits for dense integration[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(3263): 1-7.
- [16] WU H, LI C L, SONG L J, et al. Ultra-Sharp multimode waveguide bends with subwavelength gratings[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(2): 1800119.
- [17] GAO S, WANG H W, YI X G, et al. Ultra-compact multimode waveguide bend with shallowly etched grooves[J]. *Optics Express*, 2021, 29(23): 38683-38690.
- [18] DAI T, SHEN A, WANG G, et al. Bandwidth and wavelength tunable optical passband filter based on silicon multiple microring resonators[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4807-4810.

Scalable Multimode Waveguide Bend Based on Tapered Couplers

LIN Jian¹, LIU Yuxiao¹, FU Qiang³, LI Jun¹, WANG Pengjun², CHEN Weiwei¹
 (1 *Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China*)
 (2 *College of Electrical and Electronic Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China*)
 (3 *College of Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315300, China*)

Abstract: To satisfy the ever-increasing bandwidth demands, silicon-based optical interconnects can offer a promising solution, thanks to the advantages of broad bandwidth, high speed, and excellent CMOS compatibility. Various advanced multiplexing technologies have been employed to further improve the transmission capacity, such as space division multiplexing, polarization division multiplexing, and wavelength division multiplexing. Among them, mode division multiplexing utilizing each mode to serve as an independent data channel has been drawing much attention. To construct the densely integrated mode division multiplexing system, multimode waveguide bends are one of the important functional components. Up to now, a number of structures, such as photonic crystal, multimode interference, and subwavelength grating, have been used to realize different multimode waveguide bends. Although these multimode waveguide bends can have good performance, they only support 2 to 4 modes and are not easy to expand. Thus, scalable multimode waveguide bends, which can support more modes, are highly desired. In this paper, a scalable multimode waveguide bend based on tapered couplers is presented. As an example, the multimode waveguide bend supporting TE_0 , TE_1 , TE_2 , TE_3 and TE_4 modes are designed and analyzed in detail. The proposed multimode waveguide bend is a symmetrical structure. It is composed of single-mode bend waveguides and a pair of five-mode multiplexer and demultiplexer. By utilizing the matching of the effective modal indexes, the mutual conversion between the fundamental mode and the high-order modes

can be realized in each tapered coupling region, and thus multimode bending transmission is achieved. To improve the performance, the particle swarm optimization algorithm and finite difference time domain method are used to optimize the structural parameters of the tapered coupling region. Simulation results show that, for the designed multimode waveguide bend, within a bandwidth from 1 500 nm to 1 600 nm, when the TE_0 mode is input, the insertion loss is smaller than 0.087 dB, and the crosstalk is less than -20.72 dB. As the TE_1 mode is launched into the input port, the corresponding insertion loss and crosstalk are respectively lower than 0.27 dB and -19.81 dB. The corresponding insertion loss and crosstalk are less than 0.40 dB and -19.60 dB when the TE_2 mode is injected into the input port. As the TE_3 mode is input, the corresponding insertion loss and crosstalk are lower than 0.78 dB and -20.34 dB. When the TE_4 mode is launched into the input port, the corresponding insertion loss and crosstalk are smaller than 0.75 dB and -19.03 dB. In order to verify the feasibility of our design, the optimized multimode waveguide bend is experimentally demonstrated on a silicon-on-insulator platform by using a commercial complementary metal-oxide-semiconductor compatible process. The experimental results reveal that, for the fabricated device, within a bandwidth from 1 520 nm to 1 600 nm, the insertion loss is lower than 1.71 dB, and the crosstalk is less than -10.60 dB when the TE_0 mode is injected into the input port. When the TE_1 mode is launched into the input port, the insertion loss and crosstalk are respectively lower than 3.04 dB and -11.35 dB. When the TE_2 mode is input, the insertion loss is smaller than 2.9 dB, and the crosstalk is less than -10.92 dB. The corresponding insertion loss and crosstalk are smaller than 3.16 dB and -10.35 dB when the TE_3 mode is injected into the input port. When the TE_4 mode is input, the insertion loss is lower than 4.00 dB and the crosstalk is less than -11.45 dB. The main reasons for the inconsistency between the experimental results and the simulation ones are as follows: firstly, the scattering loss can be induced by the sidewall roughness of the fabricated waveguide. Secondly, due to fabrication errors, the actual width of the fabricated waveguide could deviate from the optimal value, so that the insertion loss and crosstalk of the fabricated device would become worse. Thirdly, owing to the bandwidth limitation of the adopted light source, the measured bandwidth is not as wide as the simulated one. In future work, high-quality fabrication processes are required to further improve the crosstalk and insertion loss. To sum up, with the above characteristics, our presented scalable multimode waveguide bend based on tapered couplers can offer an attractive option for constructing the densely integrated mode division multiplexing system to improve the transmission capacity.

Key words: Integrated optics; Multimode waveguide bend; Particle swarm optimization algorithm; Tapered coupler; Finite difference time domain method

OCIS Codes: 130.3120; 200.4650; 130.5296