

超紧凑抛物线形硅基光模斑转换器

袁博¹, 姜浩¹, 刘艺林¹, 张赞允^{1,2}

(1. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 西青 300387; 2. 天津工业大学
天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 西青 300387)

摘要 在集成光路中, 光模斑转换器可实现两个截面尺寸不同的光波导器件之间的绝热光传输, 对于降低光链路损耗具有重要作用。在硅基光电子芯片中, 硅基光模斑转换器通常用来实现单模波导和多模波导之间的连接, 常用于光栅耦合器与单模波导之间的模斑转换。由于传统线性模斑转换器尺寸较长, 占用了大量宝贵的芯片面积, 为实现超紧凑光绝热模斑转换, 提出并实验验证了一种新型抛物线形模斑转换器, 测试结果显示, 该抛物线形模斑转换器在 O 波段和 C 波段均工作良好, C 波段下, 当尺寸长度为 54 μm 和 100 μm 时, 光插入损耗分别约为 0.25 dB 和 0.18 dB; O 波段下, 当尺寸长度为 64 μm 和 110 μm 时, 光传输损耗分别为 0.25 dB 和 0.09 dB。测试结果与仿真结果符合良好。

关键词 绝缘体上硅; 硅光波导; 抛物线形模斑转换器

中图分类号 TN256

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Ultra-compact Parabolic Silicon Based Optical Mode-spot Converter

YUAN Bo¹, JIANG Hao¹, LIU Yilin¹, ZHANG Zanyun^{1,2}

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Key
Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and Systems, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract In integrated photonic circuits, the optical mode-spot converter can realize the adiabatic optical transmission between two optical waveguide devices with different mode sizes, which plays an important role in reducing the insertion loss of optical link. In silicon photonic chips, silicon optical mode-spot converters are usually used to connect single-mode waveguides and multimode waveguides, and the most common application is the interconnect between grating couplers and single-mode waveguides. Due to the large size of the traditional linear mode-spot converter, valuable chip area is wasted. To realize ultra-compact adiabatic mode-spot conversion, a novel parabolic mode-spot converter is proposed and experimentally demonstrated. The test results show that the parabolic mode spot converters work well in O-band and C-band. When the size length is 54 μm and 100 μm , the optical insertion losses for C-band device are 0.25 dB and 0.18 dB, respectively. When the size length is 64 μm and 110 μm , the optical insertion losses for O-

收稿日期: 2023-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61974099, 62022081)资助

通信作者: 张赞允, 男, 汉族, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 硅基光电集成, E-mail: zhangzanyun@tiangong.edu.cn.

band device are 0.25 dB and 0.09 dB, respectively. The measurement results agree well with the simulation results.

Key words silicon-on-insulator; silicon optical waveguide; parabolic mode-spot converter

0 引言

光芯片的小型化和更高集成度有赖于更加紧凑的光波导结构设计^[1]。绝缘体上硅(SOI)材料由于较高的折射率差、光通信波段透明以及 CMOS 工艺兼容等突出优势成为了光子集成的新研究热点。随着对硅光子学研究的兴起^[2],多种硅基光波导器件^[3-5]被研制出来并能够基于标准 CMOS 工艺进行制造,大大提升了光芯片的集成度和大批量生产能力^[6]。然而,由于硅材料在发光方面的先天不足^[7-9],硅光芯片通常需要通过片外光源对芯片进行供光,这就需要借助高效率的光耦合手段来实现单模光纤和亚微米光波导之间的高效光耦合^[10,11]。光栅耦合器^[12,13]是一种常用于片外光纤和片上光波导之间的光耦合器,然而由于光纤模场和光波导模场存在着巨大失配,光栅耦合器通常需要借助模斑转换器实现光模场的绝热转换^[14]。由于线性模斑转换器设计简单且易于制造,业界通常会选用线性模斑转换器^[15]实现这一功能。然而,线性模斑转换器为实现绝热光传输,其设计尺寸通常较大,限制了该器件在高密度集成芯片中的应用。为解决这个问题,研究人员提出了采用聚焦型光栅耦合器的结构设计^[16,17],通过光栅线条的弯曲实现了对光场的聚焦,从而大大降低了模斑转换的长度。然而,聚焦型光栅并不适用于所有的光耦合应用情形(如双向光栅耦合等)。为了实现超紧凑的绝热模斑转换器,科学家们在传统的锥形模斑转换器的基础上又提出了很多不同的形状设计,如指数形^[18]、倒锥形^[19]、空心锥形^[20]等。2014 年,ZOU 等人^[21]提出并验证了一种 C 波段的紧凑型分段式模斑转换器,器件两端波导宽度分别为 12 μm 以及 0.5 μm ,长度仅需 20 μm ,然而该器件仅有 86% 的传输效率并不能满足低损耗的绝热传输需求。同年,FU 等人^[22]提出了一种硅基抛物线形模斑转换器,该器件采用与前者相同两端波导宽度条件下能够实现 98.3% 的传输效率,但是器件设计长度为 120 μm ,过大的器件尺寸并不利于器件集成。2019 年,ABDEEN 等人^[23]提出了一种指数型模斑转换器,该器件两端波导宽度分别为 15 μm 以及 0.5 μm ,器件设计长度仅为 22 μm ,但是传输损耗为 92%,其器件设计仍需进一步优化。综合来看,现有的器件方案大多结构复杂,设计变量较多,导致仿真优化较为耗时,同时制造容差能力有待检验。

为解决现有方案的不足,设计并实验验证了一种硅基抛物线形模斑转换器,器件基于具有 220 nm 顶层硅厚度和 2 μm 埋氧层厚度的 SOI 晶圆设计制造,采用本征模式扩展算法(EME, Eigenmode expansion method)对器件进行了仿真优化,仿真结果显示该抛物线形模斑转换器相比线性模斑转换器在更紧凑的尺寸下可以工作良好。为了验证该结构设计,仿真优化并实际制造了应用于 O 波段和 C 波段的光模斑转换器。测试结果显示 C 波段器件在长度为 54 μm 和 100 μm 时光插入损耗分别为 0.25 dB 和 0.18 dB;O 波段器件在长度为 64 μm 和 110 μm 时光插入损耗分别为 0.25 dB 和 0.09 dB。为了方便对比还测试了同等长度下的线性模斑转换器插入损耗,测试结果显示该抛物线形模斑转换器性能远远优于同等长度下传统线性模斑转换器。

1 设计与分析

基于 SOI 平台设计了一种结构简单易于制造的抛物线形模斑转换器,用以实现 12 μm 宽波导和 0.45 μm 宽的单模波导之间的绝热光传输,即波导的局部一阶模应该通过模斑转换器传播,同时使相对较少的模式转换为高阶模或辐射模。这种绝热传输可以在模斑转换器设计中通过非常缓慢地增加或减少模斑转换器截面尺寸来实现^[24]。

1.1 模斑转换器的结构设计

本文所设计的抛物线形模斑转换器结构示意图如图 1(a)所示,线形图如图 1(b)所示。

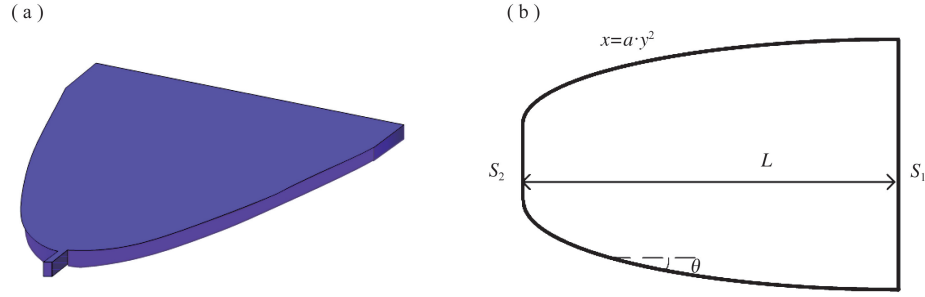


图 1 (a) 抛物线形模斑转换器结构示意图; (b) 抛物线形模斑转换器线形示意图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the proposed parabolic optical mode converter; (b) Schematic diagram of the parabolic line shape

模斑转换器两侧波导宽度尺寸为 S_1 和 S_2 , 模斑转换器长度 L 对于抛物线每个点的角度 θ 可以根据公式 $x = a \cdot y^2$ 进行推导解得, 如式(1)

$$\theta = \arctan \frac{dx}{dy} (a \cdot y^2), \quad (1)$$

其中 x, y 分别为形容抛物线形的自变量及函数值, a 为抛物线形函数中的一个变量用于形容抛物线结构的形状大小。此时模斑转换器的长度 L 可以通过化简可以由式(2)表示为

$$L = a \left[\left(\frac{S_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{S_2}{2} \right)^2 \right], \quad (2)$$

在进行抛物线形模斑转换器设计时, 选择 $S_2 = 0.45 \mu\text{m}$, $S_1 = 12 \mu\text{m}$ 作为模斑转换器两侧波导宽度尺寸, 此时 L 和 a 一一对应, 此次设计采用的为条形波导结构。

线形模斑转换器可以根据式(3)^[25]得到

$$S = \frac{\beta}{L^m} \left(\frac{L}{2} - x \right)^m + S_2, \quad (3)$$

其中 S 为模斑转换器宽波导一侧宽度, β 为两侧波导尺寸之差, m 为描述抛物线形状的量。

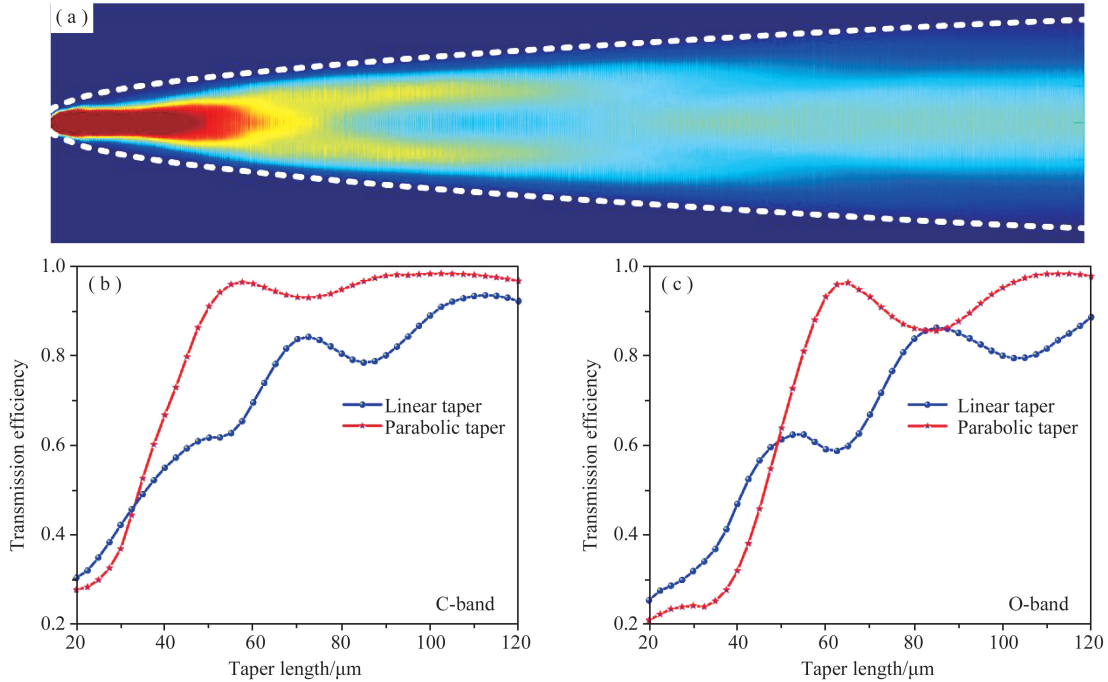


图 2 (a) 计算所得 $110 \mu\text{m}$ 长 O 波段抛物线形模斑转换器传输光场图; (b) 计算所得 C 波段抛物线形和线性模斑转换器光传输效率与器件长度的关系对比图; (c) 计算所得 O 波段抛物线形和线性模斑转换器光传输效率与器件长度的关系对比图

Fig. 2 (a) Calculated optical field profile in the $110 \mu\text{m}$ -long O-band parabolic optical mode converter, (b) Calculated optical transmission efficiency of C-band parabolic and linear optical mode converters as a function of device length, (c) Calculated optical transmission efficiency of O-band parabolic and linear optical mode converters as a function of device length

1.2 仿真结果分析

基于 EME 数值分析方法对 O 波段和 C 波段的抛物线形模斑转换器进行了设计优化,通过脚本编写进行结构建模,可以实现器件结构参数的扫描优化和快速迭代。器件采用条形光波导结构,左侧窄光波导取 $S_2=0.45\text{ }\mu\text{m}$,右侧光波导取 $S_1=12\text{ }\mu\text{m}$ 为固定值。首先扫描了不同器件长度下模斑转换器的光传输效率,并将抛物线形模斑转换器与线性模斑转换器的仿真结果进行对比,如图 2(b)和图 2(c)所示。可以看到所设计的抛物线形模斑转换器光传输效率随着器件长度的增大而迅速变化,在同等器件长度下光传输效率远高于线性模斑转换器,同时其光传输曲线在不同长度上呈现出两个极值。对于 C 波段器件,两个极值分别出现在 $54\text{ }\mu\text{m}$ 和 $100\text{ }\mu\text{m}$ 长度处,峰值光传输效率分别为 96.4% 和 98.35% ,对应光传输损耗为 0.16 dB 和 0.07 dB ;而对于 O 波段器件,两个极值分别出现在 $64\text{ }\mu\text{m}$ 和 $110\text{ }\mu\text{m}$ 长度处,峰值光传输效率分别为 96.2% 和 98.2% ,对应光传输损耗为 0.17 dB 和 0.08 dB 。本文分别采用基模与高阶模作为输入光源对器件进行验证,其输出特性曲线一致。图 2(a)所示为计算所得器件长度为 $110\text{ }\mu\text{m}$ 的 O 波段抛物线形模斑转换器光场仿真结果,可以看到器件内部光场的绝热传递效果。

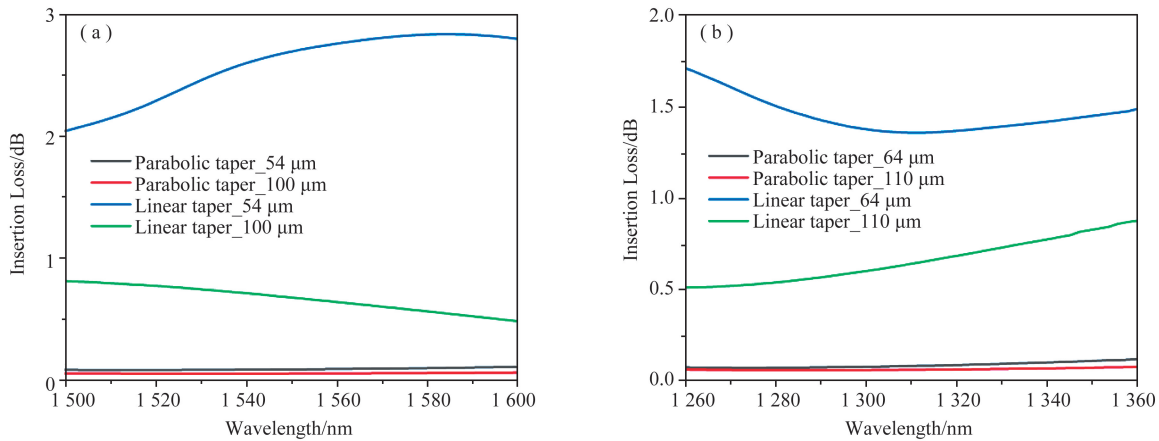


图3 (a) 计算所得 C 波段抛物线形模斑转换器与同等长度线性模斑转换器光传输损耗对比;
(b) 计算所得 O 波段抛物线形模斑转换器与同等长度线性模斑转换器光传输损耗对比

Fig. 3 (a) Comparison of calculated insertion loss of C-band parabolic and linear optical mode converter with the same device lengths; (b) Comparison of calculated insertion loss of O-band parabolic and linear optical mode converter with the same device lengths

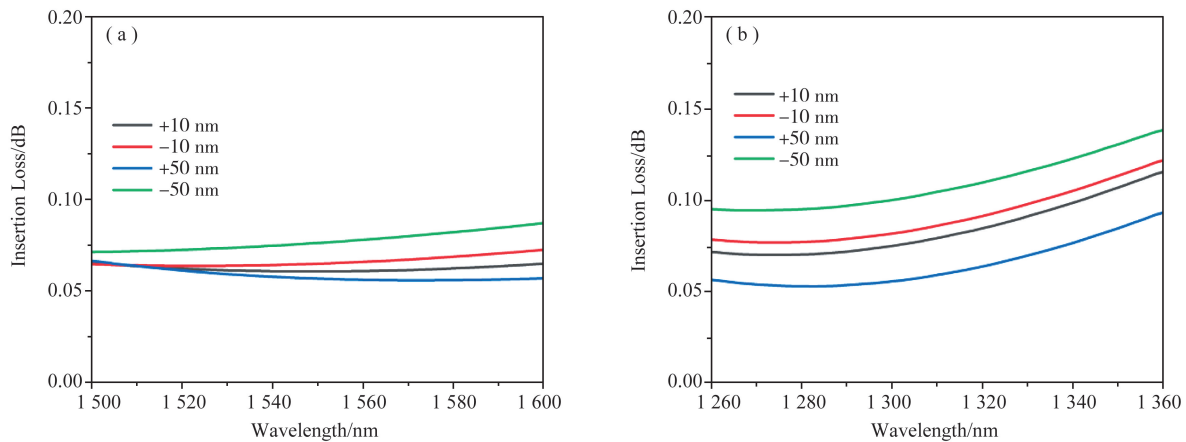


图4 (a) C 波段抛物线形模斑转换器在存在制造误差时的光传输损耗;
(b) O 波段抛物线形模斑转换器在存在制造误差时的光传输损耗

Fig. 4 (a) Calculated insertion loss of C-band parabolic optical mode converter with fabrication errors;
(b) Calculated insertion loss of O-band parabolic optical mode converter with fabrication errors

在得到最优的器件长度后,分别仿真计算了对应于两个极值长度处的器件性能。图 3(a)和图 3(b)分别显示了 C 波段和 O 波段抛物线形模斑转换器与同等长度线性模斑转换器的光传输谱计算结果,可以看到所设计的抛物线形模斑转换器与线性模斑转换器相比不光插入损耗大大降低,同时光传输效率的波长依赖性也大大改善。

1.3 制造容差设计分析

制造容差能力对于器件的可制造性和性能稳定性至关重要,尤其是考虑到器件制造所用到的深紫外光刻技术不可避免地会带来制造误差^[26]。对于光波导器件而言,光波导宽度的制造误差是较为常见的,也是对于器件性能影响较大的。因此,本文分析了该抛物线形模斑转换器对于工艺误差的容忍能力。为简化分析过程,假定整个器件的加工误差均匀一致,即不同长度位置的光波导宽度变化一致。图 4(a,b)分别显示了 O 波段器件和 C 波段器件在光波导宽度制造误差分别为 ± 10 nm 和 ± 50 nm 时的光插入损耗变化,仿真结果显示,当光波导宽度制造误差处于 ± 50 nm 范围内,抛物线形模斑转换器的传输损耗依然基本在 0.13 dB 以下,说明该器件具有良好的制造容差能力。

2 测试

器件采用重庆联合微电子有限公司(CUMEC)的硅光工艺进行流片制造,硅波导层厚度为 220 nm。制备流程图如图 5 所示。

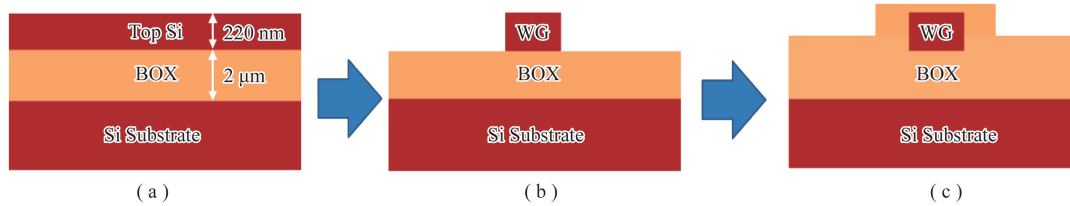


图 5 抛物线形模斑转换器制备流程图

Fig. 5 Flow chart for the preparation of a parabolic plaque converter

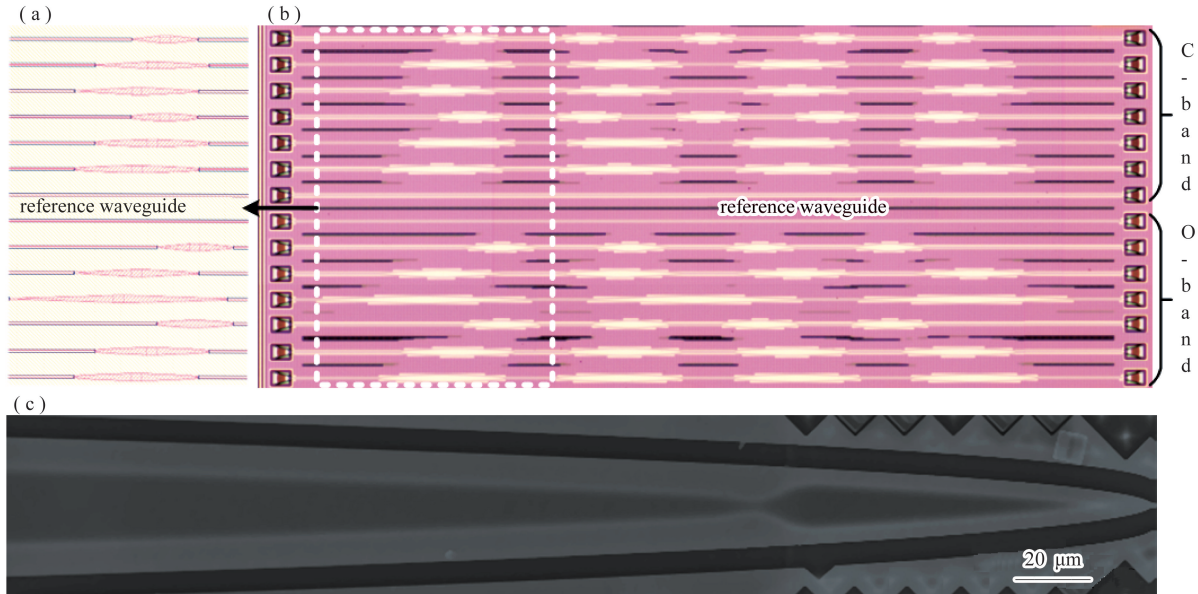


图 6 (a) 用于测试的模斑转换器版图设计; (b) 模斑转换器插损测试器件光学显微镜照片;

(c) 110 μm 长 O 波段模斑转换器 SEM 照片

Fig. 6 (a) Layout design of the test devices for characterization of the proposed parabolic mode converters;

(b) Microscope photo of the fabricated test devices; (c) Scanning electron microscope image of

the 110 μm -long O-band parabolic mode converter

测试器件组版图和芯片照片分别如图 6(a)和图 6(b)所示,测试器件采用聚焦型光栅耦合器作为光输入输出接口,中间级联多个模斑转换器结构。我们制造了没有插入任何模斑转换器结构的参考波导器件用以实现对光栅耦合损耗和光波导传输损耗的归一化。为了方便进行对比,分别制造了不同长度的线性模斑转换器和抛物线形模斑转换器。对 C 波段器件分别设计制造了长度为 $54\ \mu\text{m}$ 、 $100\ \mu\text{m}$ 和 $110\ \mu\text{m}$ 的线形和抛物线形模斑转换器,对 O 波段器件分别设计制造了 $64\ \mu\text{m}$ 、 $100\ \mu\text{m}$ 和 $110\ \mu\text{m}$ 的抛物线形模斑转换器以及 $64\ \mu\text{m}$ 、 $110\ \mu\text{m}$ 和 $200\ \mu\text{m}$ 的线性模斑转换器。图 6(c)所示为 $110\ \mu\text{m}$ 长的抛物线形模斑转换器扫描电镜 (SEM) 照片,可以看到器件加工制造良好,光波导侧壁较为平滑。

器件测试装置由一个可调谐激光源 (Keysight N7776C)、一个偏振综合仪 (Keysight N7786C) 一个光学多端口功率计 (Keysight N7745C) 和一个高精度垂直光纤对准系统 (Apico AP-MA-GRT™) 组成。根据所测结果,在没有进行归一化处理之前,级联了 8 个 $100\ \mu\text{m}$ 长度 C 波段抛物线形模斑转换器的测试波导器件光纤到光纤总光传输损耗为 $10.7\ \text{dB}$,而级联了 8 个 $110\ \mu\text{m}$ 长度 O 波段抛物线形模斑转换器光纤到光纤总光传输损耗为 $9.48\ \text{dB}$,该光损耗包含了两个光栅耦合器的耦合损耗、8 个模斑转换器传输损耗以及单模波导传输损耗。将光栅耦合损耗和单模波导损耗去除后,我们得到了归一化后得到的 C 波段和 O 波段模斑转换器器件光插入损耗测试结果,如图 7(a)、(b) 所示。从图中可以看到 C 波段抛物线形模斑转换器在 $100\ \mu\text{m}$ 长度下光插入损耗最小(约为 $0.18\ \text{dB}$),器件长度为 $54\ \mu\text{m}$ 时光插入损耗也较小(平均约为 $0.25\ \text{dB}$),然而光谱波纹较大,反映出光传输过程中可能存在一定的反射。因此,综合来看 C 波段器件长度为 $100\ \mu\text{m}$ 下器件性能最佳。O 波段抛物线形模斑转换器在 $110\ \mu\text{m}$ 器件长度下光插入损耗最低,约为 $0.09\ \text{dB}$,其性能要略好于 $100\ \mu\text{m}$ 的抛物线形模斑转换器;而 $64\ \mu\text{m}$ 的抛物线形模斑转换器光插入损耗约为 $0.25\ \text{dB}$,其性能与 $200\ \mu\text{m}$ 的线性模斑转换器十分接近,这也进一步突显出我们所设计的抛物线形模斑转换器在器件小型化和性能上的巨大优势。

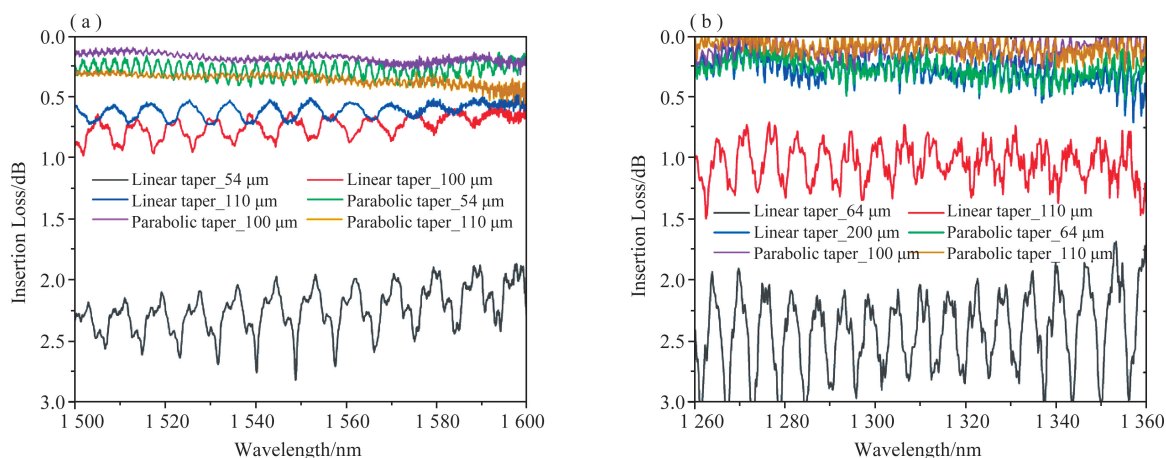


图 7 (a) C 波段抛物线形模斑转换器与线性模斑转换器插损测试对比;

(b) O 波段抛物线形模斑转换器与线性模斑转换器插损测试对比

Fig. 7 (a) Comparison of the measured insertion loss of the C-band parabolic and linear mode converters with the same device lengths; (b) Comparison of the measured insertion loss of the O-band parabolic and linear mode converters with the same device lengths

表 1 列举了已经报道的一些关于超紧凑绝热模斑转换器的研究结果以及我们的研究结果并进行了详细对比。我们基于本设计同时实现了 C 波段和 O 波段两种模斑转换器,且在设计变量数较少的情况下实现了较为可观的光传输效率。相比同样具有实测结果的文献[21]和文献[29],本设计器件尺寸虽然较大,但在光传输效率 and 设计复杂度上具有明显优势。

表 1 SOI 平台不同类型的模斑转换器参数对比

References	Type	Start-end waveguide width (μm)	Length (μm)	Transmission efficiency	Design variables count	Working Band
[21]	Segmented	12—0.5	20	86%(measured)	10	C
[27]	Parabolic	2—0.5	2.9	99.5%(simulation)	2	C
[22]	Parabolic	12—0.5	120	98.3%(simulation)	2	C
[28]	Segmented	10—0.56	15.4	70%(simulation)	10	C
[29]	Segmented	10—0.5	15	92%(measured)	4	C
[23]	Exponential	15—0.5	22	92%(simulation)	3	C
This work	Parabolic	12—0.45	54	94.4%(measured)	1	C
This work	Parabolic	12—0.38	64	94.4%(measured)	1	O

3 总结

综上,本文设计了一种结构简单易于制造的抛物线形模斑转换器并进行了仿真优化与实验验证。仿真结果显示:C波段抛物线形模斑转换器器件尺寸为 54 μm 时光传输效率为 96.4%,在 100 μm 时光传输效率为 98.35%,O 波段抛物线形模斑转换器器件尺寸为 64 μm 时传输效率为 96.2%,在 110 μm 时传输效率为 98.2%。器件具有较强的制造容差能力,当制造误差小于±50 nm 时,仿真结果显示器件插入损耗不超过 0.13 dB。测试结果显示,O 波段抛物线形模斑转换器的最佳器件长度为 110 μm,插入损耗约为 0.09 dB,C 波段抛物线形模斑转换器的最佳长度为 100 μm,插入损耗约为 0.18 dB。与同等长度线形模斑转换器相比,测试光谱不仅插入损耗大大降低,同时具有较小的纹波,这说明该模斑转换器性能极佳,在光传输过程中几乎不带来光反射。本设计可以较好适用于集成光路中的多模波导和单模波导之间的对接和模式转换,具有一定的实用价值。

参 考 文 献

[1] ZAIN A R M. One-dimensional photonic crystal / photonic wire cavities based on silicon-on-insulator (SOI)[D]. UK:University of Glasgow, 2009.

[2] ZHOU P J, LI Z Y, YU Y D, et al. Research progress of silicon-based photonic integration[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(10): 104218-104218.

[3] 冉娜,陈昕阳,汪正坤,等. 氮化硅片上光栅耦合器的优化和实验[J]. 光学学报,2023,43(1): 158-165.

[4] 彭灿福,李文昊,张伟,等. 等周期变倾角干涉条纹复用扩展增强现实耦合元件体光栅角度带宽[J]. 中国光学(中英文),2023,16(5): 1157-1167.

[5] 张赞允,朱华,李鸿强. 高效率低向上反射的氮化硅光栅耦合器[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2018, 31(4):31-36.

[6] MARTINEZ A, BLASCO J. Ultrafast all-optical switching in a silicon-nanocrystal-based silicon slot waveguide at telecom wavelengths [J]. Nano Letters, 2010, 10(4):1506-1511.

[7] 熊锡成,谢泉,姜淳,等. 硅膜厚度对 Si/β-FeSi₂/Si 在宽光谱范围的传输特性影响[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版),2023,36(3): 428-432.

[8] 李木琛,王新江,颜家豪,等. 光电半导体材料的理论设计[J]. 科学通报,2023,68(17):2221-2238.

[9] 谷林,张庆华,于浦,等. 5d 电子材料新奇物性研究中的关键科学问题[J]. 中国科学基金,2023,37(1): 107-114.

[10] TAJIMA M, IBUKA S. Luminescence due to electron-hole condensation in silicon-on-insulator and its application to defect and interface characterization[J]. Materials Science Forum, 1997, 258:1731-1736.

[11] ZEHE A, A Ramirez. Photon energy shift in the luminescence of highly excited Ga1-xAlxAs;Si due to auger effect involvement[J]. Su-

- perficies Y Vacio, 2003, 16(4):34.
- [12] 张赞允,程倩,刘宏伟,等. 基于二维光栅的四通道完全垂直光学接口[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2020,33(2):28-34.
- [13] 向美华,于硕,李德阳,等. 薄膜铌酸锂反向锥形端面耦合器[J]. 北京工业大学学报,2023,49(7): 737-745.
- [14] ZHOU M, ZHAO Z, SUN C. Optical waveguide structure and manufacturing method, optical waveguide module, optical switching device, and system; WO2021CN100734[P]. 2023-11-06.
- [15] Guo Z Z, Xiao J B. Ultracompact mode-order converting power splitter for mid-infrared wavelengths using an MMI coupler embedded with oblique subwavelength grating wires[J]. Optics Communications, 2021, 488:126850
- [16] 刘云启,姜晨,刘祖耀,等. 长周期光纤光栅[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(9):11-54.
- [17] 张赞允,程倩,刘宏伟,等. 应用于CWDM的四通道角度多模干涉耦合器的仿真设计[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2021,34(3):33-39.
- [18] KIM H J, JI W S. Characterization of a focusing waveguide grating coupler using a bloch-wave analysis-based local linear grating model and near-field scanning optical microscope[J]. Journal- Korean Physical Society, 2005, 46(4):1013-1019.
- [19] JOSE R G, SUSANA F F. Electromagnetic properties of inverted II dielectric waveguides[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2008, 62(5):349-355.
- [20] ASADUZZAMAN M, BAKAUL M, et al. A compact silicon grating coupler based on hollow tapered spot-size converter[J]. Scientific reports, 2018, 8(1): 2540
- [21] ZOU J H, YU Y, YE M Y, et al. Short and efficient mode-size converter designed by segmented-stepwise method[J]. Optics Letters, 2014, 39(21): 6273-6276.
- [22] FU Y F, TANG W J. Efficient adiabatic silicon-on-insulator waveguide taper[J]. Photonics Research, 2014, 2(3):A41-A44.
- [23] ABDEEN A S. Compact Adiabatic Taper for SOI Waveguide[C]. //2019 6th International Conference on Advanced Control Circuits and Systems (ACCS), Hurgada, Egypt, 2019, 176-179.
- [24] EHSAN A A, SHAARI S, RAHMAN M K A. Low Cost 1X2 Acrylic-based Plastic Optical Fiber Coupler with Hollow Taper Waveguide [J]. PIERS Online, 2009, 5(2):129-132.
- [25] CHEN Y J, CHEN R Y, FANG Y H, et al. Hybrid III-V-on-SOI optical spot size converter by self-aligned selective undercut dry etching of Si[J]. Optics Letters, 2020, 45(15): 4188-4191.
- [26] BOGAERTS W. SOI nanophotonic waveguide structures fabricated with deep UV lithography - ScienceDirect[J]. Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications, 2004, 2(2):81-86.
- [27] YE T, FU Y F. Low-crosstalk Si arrayed waveguide grating with parabolic tapers[J]. Optics Express, 2014, 22(26): 31899-31906.
- [28] LUYSSAERT B. A versatile optical spot-size converter design[C]. // Proceedings of European Conference on Optical Communication, 2004.
- [29] PURNIMA S, ANUBHAB H. Ultra-compact low-loss broadband waveguide taper in silicon-on-insulator[J]. Optics Express, 2017, 25(9): 10196-10203.

(责任编辑:赵海军)