

基于硅基砖砌型亚波长光栅的紧凑型模式转换器*

陆梦佳 恽斌峰†

(东南大学, 先进光子学中心, 南京 210096)

(2023年4月26日收到; 2023年5月25日收到修改稿)

亚波长光栅可以等效为均匀介质, 具备可控的双折射、色散和各向异性等优势, 有利于设计高性能的光子器件. 尽管目前传统的亚波长光栅结构只需要单步刻蚀, 然而通常需要 100 nm 及以下的制造分辨率, 这对当前主流的晶圆级硅光子芯片制造技术来说比较困难. 亚波长光栅的各向异性可以通过引入砖砌型拓扑结构来进一步设计, 从而在设计中提供额外的自由度, 同时还可以降低制造分辨率需求 (> 100 nm). 本文提出并研究了基于硅基砖砌型亚波长光栅的紧凑型 TE_0 - TE_1 和 TE_0 - TE_2 模式转换器, 其中砖砌型亚波长光栅的最小特征尺寸为 145 nm. 实现了 TE_0 模式到 TE_1 模式和 TE_2 模式的转换, 转换区域长度分别为 9.39 μm 和 11.27 μm . 测试结果表明, 在 68 nm (1512—1580 nm, 受限于激光器调谐范围和光栅耦合器) 带宽内, 插损和串扰分别小于 2.5 dB 和 -10 dB.

关键词: 亚波长光栅, 模式转换器, 绝缘体上硅, 各向异性

PACS: 42.82.-m, 42.79.Sz, 42.82.Et, 47.11.Bc

DOI: 10.7498/aps.72.20230673

1 引言

面对片上光互连日益增长的传输容量需求, 多模硅光子学通过引入高阶模式来实现模分复用 (mode-division multiplexing, MDM) 技术 [1-3], 这样即使采用单一波长也可以实现多通道数据通信. 目前已经报道了实现片上 MDM 系统的许多关键单元器件, 例如模式 (解) 多路复用器 [4,5]、模式转换器 [6,7]、多模波导弯曲 [8,9] 和多模波导交叉 [10]. 其中, 模式转换器是 MDM 中一个重要的单元器件, 可以实现不同阶数模式之间的转换. 国内外许多课题组报道了不同设计的硅基模式转换器, 主要包括非对称定向耦合器 (asymmetric direction couplers, ADC) [11]、Y 分支结构 [12]、马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) [13]、多模干涉耦合器 (multimode interference, MMI) [14] 和特殊波导结构 [15] 等. 其中使用最广泛的是基于 ADC 结

构的模式转换器, 但是这种设计需要满足相位匹配条件, 受结构参数影响较大, 同时受限工艺容差和相对较窄的带宽. 基于 MZI 的模式转换器具有结构简单、易于设计、低插损和高转换效率的优点. 2015 年, Oner 等 [13] 提出了一种基于非平衡 MZI 结构的模式转换器, 该转换器由具有相同臂长但不同横截面积的介质波导设计, 通过在不同宽度的等长波导之间引入所需的相位差, 实现了从基模到更高阶奇数模式的大带宽模式阶数转换. 在上述工作中, Y 分支被用来分解输入模式, 这通常会导致器件尺寸大. MMI 耦合器具有尺寸紧凑、损耗低和带宽相对较大的优点. 2020 年, Chack 等 [14] 在 SOI 平台上制作了一个基于级联 MMI 的模式转换器. 实验结果表明在 1520—1580 nm 范围内, TE_0 和 TE_1 模式之间的串扰小于 -20 dB. 但是带宽还可以进一步提升. 2019 年, Liu 等 [15] 提出了一种基于浅刻蚀菱形和三角形的紧凑型 TM_0 - TM_2 模式转换器, 其中菱形刻蚀部分用于分解输入 TM_0 模式, 两

* 国家自然科学基金 (批准号: 62171118) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ybf@seu.edu.cn

个三角形刻蚀部分用于在相邻的波导之间引入 π 的相位差. 该器件在 1458—1560 nm 范围内, 模式转换效率为 94%, 模式串扰小于 -15 dB. 但是该方案需要两步刻蚀和高精度浅刻蚀工艺.

亚波长光栅 (subwavelength grating, SWG), 是一种由高折射率和低折射率材料交替组成的周期性结构, 其光栅间距远小于结构中光的波长, 并且只需要一个刻蚀步骤^[16–20]. 其通常被等效为均匀介质, 其等效折射率可以通过调整占空比来自由调控. 当引入 SWG 时, 可以在很多方面操控导模的特性, 包括有效折射率、双折射和色散. 此外, 该 SWG 结构也具有较低的传输损耗 (~ 2 dB/cm), 与常规条形波导的传输损耗相当. 值得注意的是, 由于深亚波长尺寸, SWG 的制造比常规 SOI 波导更困难, 但是由于其独特的性质, 仍然非常有吸引力. 这种特殊的 SWG 结构提供了一种新的自由度, 可用于设计新型光子器件. 2018 年, He 等^[21] 提出了一种使用基于 SWG 的定向耦合器的高阶模式 (解) 多路复用器, 其插入损耗在 1520—1570 nm 内低于 5.2 dB, 器件尺寸约为 $507 \mu\text{m} \times 5.29 \mu\text{m}$. 同年, González-Andrade 等^[22] 提出了一种基于亚波长结构的双模转换器和 (解) 复用器, 该器件由 SWG 调控的 MMI、 90° 移相器和对称 Y 分支组成, 通过在上臂中背靠背地引入两个梯形锥形波导, 在下臂中引入一个直波导, 实现了 90° 的相移. 该器件尺寸为 $36.0 \mu\text{m} \times 3.7 \mu\text{m}$, 在 1400—1700 nm 的波长范围内, 仿真得到的模式转换效率小于 -20 dB, 插损小于 0.84 dB. 2020 年, 该课题组在 220 nm 的 SOI 平台上制备了基于亚波长结构的 MMI 耦合器的紧凑型宽带模式转换器和模式复用器^[23], 器件尺寸为 $38.6 \mu\text{m} \times 3.7 \mu\text{m}$. 实验结果表明, 在 120 nm (1520—1640 nm) 带宽下, TE_0 和 TE_1 模式的插损均小于 1.1 dB, 模间串扰均优于 -18 dB. 然而上述方案的器件尺寸均较大, 不利于集成化. 2019 年, Cheng 等^[24] 提出了一种基于 SWG 结构的紧凑型模式转换器, 使用 SWG 调控折射率来将 TE_0 模式转换为 TE_1 , TE_2 和 TE_3 模式. 器件长度分别为 $8.72 \mu\text{m}$, $4.98 \mu\text{m}$ 和 $14.54 \mu\text{m}$, 仿真得到在 1520—1580 nm 范围内, 模式转换效率分别大于 94.4%, 95.7% 和 83.7%, 模间串扰分别小于 -15.33 dB, -17.36 dB 和 -15.65 dB. 但是该方案还没有通过实验验证. 同年, Wang 等^[25] 提出了一种基于倾斜亚波长光栅结构的紧凑型波导模式转

换器, 可以将 TE_0 模式转换为 TE_1 和 TE_2 模式, 耦合长度分别为 $5.75 \mu\text{m}$ 和 $6.736 \mu\text{m}$. 在 1542—1563 nm 和 1545—1565 nm 的波长范围内, 插入损耗分别小于 1 和 0.5 dB, 模式串扰小于 -10 dB. 然而, 该方法需要两步刻蚀和高精度浅刻蚀工艺. 2021 年, Sun 等^[26] 提出了一种基于梯形 SWG 的超宽带功率耦合和模式转换器. 在 1507.2—1627.8 nm 波长范围内, 测试得到其转换损耗和串扰分别低于 1 dB 和 -12.5 dB. 然而, 由于波导之间的绝热耦合, 器件长度相对较长, 约为 $62.5 \mu\text{m}$, 且该结构的最小特征尺寸为 70 nm, 加工具有一定难度. 在当前主流的硅光晶圆级制造技术中, 充分利用 SWG 的潜力仍然具有挑战性. Luque-González 等^[27] 于 2021 年提出了一种砖砌亚波长光栅 (bricked subwavelength grating, BSWG) 结构, 它可以等效为可控的双轴晶体, 从而能够更加灵活地控制其各向异性和色散. 与传统的 SWG 相比, 其具有更大的最小特征尺寸, 有利于促进大规模制造.

最近, 我们在非对称输入/输出波导中引入 BSWG, 实现了 TE 基模到 TE 高阶模的转换^[28]. 在该方案中, 在 BSWG 区域会产生准 TE_0 模式, 该准 TE_0 模式可以被视为两个待转换 TE 模式之间的有效桥梁. 与传统 SWG 相比, BSWG 的色散平坦度更高, 因此可以实现更宽的工作带宽. 通过选择适当的结构参数可以实现输入/输出模式和准 TE_0 模式之间的特定模式转换. 结合三维时域有限差分 (finite difference time domain, FDTD) 方法和粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 方法, 优化设计了 TE_0 - TE_1 和 TE_0 - TE_2 模式转换器, 可以有效地将 TE_0 模式转换为 TE_1 模式和 TE_2 模式. 仿真结果表明, TE_0 - TE_1 和 TE_0 - TE_2 模式转换器的插入损耗均小于 1 dB, 串扰均小于 -15 dB, 相应的工作带宽为 128 nm (1511—1639 nm) 和 126 nm (1527—1653 nm). 通过实验验证了在 68 nm 带宽下, 插损和串扰分别小于 2.5 dB 和 -10 dB. 此外, 通过砖砌型结构获得了额外的自由度, 可以实现大于 100 nm 的特征尺寸.

2 方案设计

图 1(a)—(c) 分别为提出的模式转换器方案的结构示意图、BSWG 的部分放大图和扫描电子显微镜图 (scanning electron microscope, SEM).

该器件由 3 个部分组成, 包括输入锥形波导、输出锥形波导和 BSWG. 输入锥形波导宽度从 $W_1 = 500 \text{ nm}$ 逐渐变细至 $W_{T1} = 145 \text{ nm}$, 长度为 L_{T1} , 输出锥形波导宽度从 W_{T2} 逐渐变宽至 W_0 , 长度为 L_{T2} , 其位置由长度 W_D 表示, 如图 1(a) 所示. BSWG 由交替的 Si 和 SiO_2 组成, 沿传播方向 (z 轴) 以亚波长周期 $\Lambda_z = 290 \text{ nm}$ 排列, 硅条带沿 x 轴以周期 $\Lambda_x = 290 \text{ nm}$ 周期性划分, 形成的硅块在 z 方向上交替移动的距离为 Δz . 其中偏移量 $\overline{\Delta z} = \Delta z / \Lambda_z$, x 和 z 方向的占空比定义为 $f_x = a_x / \Lambda_x = 0.5$ 和 $f_z = a_z / \Lambda_z = 0.5$, 以产生最大的像素尺寸 ($145 \text{ nm} \times 145 \text{ nm}$). BSWG 的宽度为 W_{MMI} , 其中硅部分宽度为 a_x 和 a_z , $a_x = a_z$. Si 和 SiO_2 在 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 的折射率分别取 3.476 和 1.444^[29].

为了优化所提出的基于 BSWG 的模式转换器, 通过结合 3D FDTD 和 PSO 方法对 $1.55 \text{ }\mu\text{m}$ 波长处结构参数 (W_{MMI} , W_0 , W_{T2} , W_D , L_{T1} , L_{T2} , L_c , $\overline{\Delta z}$) 进行了优化, 优化采用的仿真软件为 Ansys-Lumerical FDTD. 将品质因子 (FOM) 定义为

$$\text{FOM} = -10 \lg (P_{\text{TE}_i} / P_{\text{in}}), \quad (1)$$

其中 $i = 1$ 或 2 , P_{TE_i} 表示在输出波导处获得的 TE 模式的光功率.

此处以 TE_0 - TE_1 模式转换器为例来简单说明优化过程. 将具有特定参数组合的 TE_0 - TE_1 模式转换器表示为“粒子”. 粒子的位置和速度可以通过使用下面给出的方程来更新^[30]:

$$v_{e_{j+1}} = \omega \times v_{e_j} + r_1 \times \text{rand}(n) \times (b_{p_j} - p_{s_j}) + r_2 \times \text{rand}(n) \times (g_{p_j} - p_{s_j}), \quad (2)$$

$$p_{s_{j+1}} = p_{s_j} + v_{e_j}, \quad (3)$$

其中 v_{e_j} 和 p_{s_j} ($j = 1, 2 \dots$) 代表粒子的速度和位置, g_{p_j} 和 b_{p_j} 代表全局最佳位置和个体最佳位置, $\text{rand}(n)$ 是均匀分布在 0—1 之间的随机数, r_1 和 r_2 分别是认知率和社会率, 惯性权重记为 ω . 开始优化时, 初始化粒子的 p_s 和向量 v_e , 其中 p_s 对应于 $[W_{\text{MMI}}, W_0, W_{T2}, W_D, L_{T1}, L_{T2}, L_c, \overline{\Delta z}]$, v_e 表示 p_s 在一次迭代后的变化. 首先, 选择种群中的粒子作为随机值, 范围如下: $1.8 \text{ }\mu\text{m} \leq W_{\text{MMI}} \leq 2.5 \text{ }\mu\text{m}$, $0.8 \text{ }\mu\text{m} \leq W_0 \leq 1.2 \text{ }\mu\text{m}$, $0.15 \text{ }\mu\text{m} \leq W_{T2} \leq 0.35 \text{ }\mu\text{m}$, $0 \text{ }\mu\text{m} \leq W_D \leq 0.8 \text{ }\mu\text{m}$, $1 \text{ }\mu\text{m} \leq L_{T1} \leq 3 \text{ }\mu\text{m}$, $1 \text{ }\mu\text{m} \leq L_{T2} \leq 4 \text{ }\mu\text{m}$, $2 \text{ }\mu\text{m} \leq L_c \leq 4 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $0 \leq \overline{\Delta z} \leq 0.5$. 关于结构参数搜索范围的选择理由如下: 1) 为了在目标模式 TE_1 模式和不需要模式的 TE_2 模式和 TE_0 模式之间取一个平衡, W_{MMI} , W_0 和 W_{T2} 的宽度不能太宽或太窄. 另外, 如图 1(a) 所示, W_D 的搜索范围应该小于 $W_{\text{MMI}} - W_0$. 2) 为了在模式传播损耗和紧凑的器件尺寸之间取一个权衡, L_{T1} , L_{T2} 和 L_c 的长度不应太长或太短. 3) 偏移量 Δz 的最大值为硅线波导的宽度 a_z 为 Λ_z 的一半. 根据 $\overline{\Delta z} = \Delta z / \Lambda_z$, 最大值 $\overline{\Delta z} = 0.5$. 最小值为 0, 对应于传统的 SWG. 图 2 给出了具体的优化步骤.

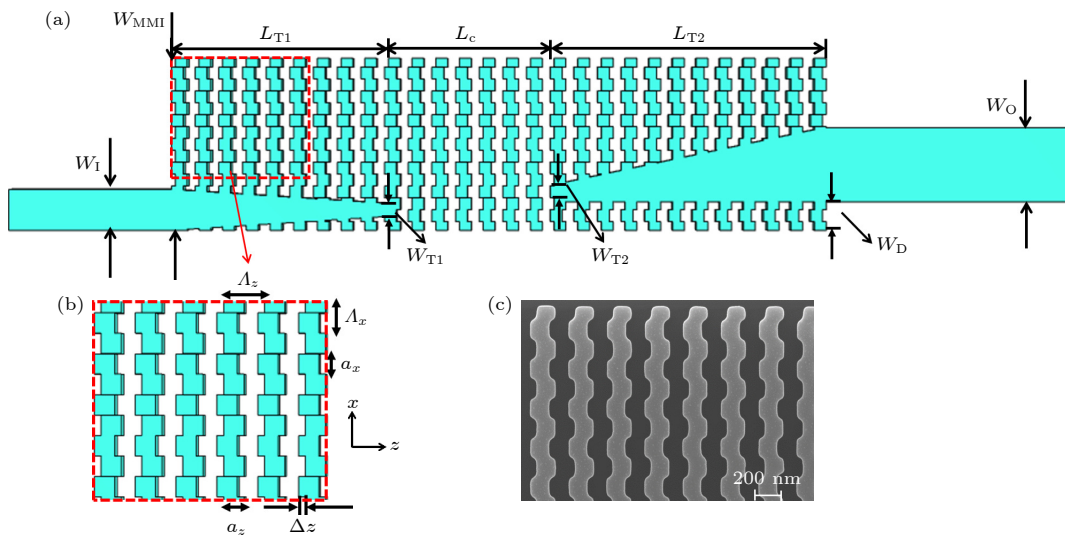


图 1 (a) 模式转换器方案的结构示意图; (b), (c) BSWG 的部分放大图与 SEM 图

Fig. 1. (a) Schematic of the mode converter; (b), (c) part enlarged view and SEM image of the BSWG.

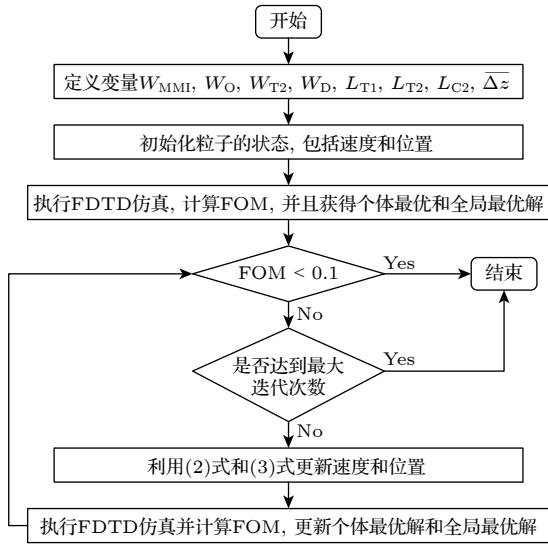


图 2 器件优化过程流程图

Fig. 2. Flow chart of the optimization process.

表 1 整理了优化后的参数, 其中 TE_0 - TE_1 和 TE_0 - TE_2 模式转换器的转换长度为 L_{T1} , L_{T2} , L_c 之和, 分别为 $9.39 \mu\text{m}$ 和 $11.27 \mu\text{m}$. 值得注意的是两种模式转换器输出波导的位置不同. 这是由于输入的 TE_0 模式在 BSWG 区域会产生准 TE_0 模式, 该准 TE_0 模式在输出区域通过模式演变转换为目标模式, 转换效果受到 W_D , L_{T2} , W_O , W_{T2} 等输出区域有关参数影响. 因为 TE_0 - TE_1 和 TE_0 - TE_2 模式转换器的目标输出模式不同, 具有不同的有效折射率, 所以模式演变过程存在差异, W_D 的值在 PSO

中也存在差别. 在 PSO 优化中, W_D 的取值为 $0-0.8 \mu\text{m}$, 通过迭代后得到 TE_0 - TE_1 模式转换器的 W_D 为 0 nm , TE_0 - TE_2 模式转换器的 W_D 为 373 nm .

图 3(a), (b) 为 TE_0 - TE_1 和 TE_0 - TE_2 模式转换器的透射光谱. 当插损低于 1 dB , 串扰低于 -15 dB 时, TE_0 - TE_1 模式转换器的带宽为 128 nm ($1511-1639 \text{ nm}$), TE_0 - TE_2 模式转换器的带宽为 126 nm ($1527-1653 \text{ nm}$) 的波长范围内. 在 1500 nm 附近的短波长边缘处, 插损下降, 串扰迅速增加. 这些可能是由布拉格反射引起的, 因为波长越来越接近布拉格波长.

3 制造与实验结果

为了验证提出的砖砌型亚波长光栅模式转换器, 在具有 220 nm 厚顶部硅层、 $2 \mu\text{m}$ 厚 SiO_2 埋氧层的绝缘体上硅 (silicon-on-insulator, SOI) 平台上, 采用 100 keV 电子束光刻 (electron-beam lithography, EBL) 和电感耦合等离子体诱导反应离子刻蚀 (ICP-RIE) 工艺制作了 TE_0 - TE_1 和 TE_0 - TE_2 模式转换器. 并利用化学气相沉积法 (plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 沉积了 $2.2 \mu\text{m}$ 厚度的 SiO_2 包层. 图 4(a), (b) 为制作的参考波导的显微图像和 SEM 照片. 这里使用了 TE 型光栅耦合器 (grating coupler, GC) 进行垂直耦合. 采用具有 8° 倾斜角的光栅耦合器, 在

表 1 模式转换器的优化设计参数

Table 1. Optimized design parameters for the mode converter.

模式转换功能	$W_{\text{MMI}}/\mu\text{m}$	$W_O/\mu\text{m}$	$W_{T2}/\mu\text{m}$	$W_D/\mu\text{m}$	$L_{T1}/\mu\text{m}$	$L_{T2}/\mu\text{m}$	$L_c/\mu\text{m}$	$\overline{\Delta z}$
TE_0 - TE_1	2.10	0.9	0.229	0	3.00	3.2	3.19	0.16
TE_0 - TE_2	2.67	1.4	0.350	0.373	3.21	4.0	4.06	0.14

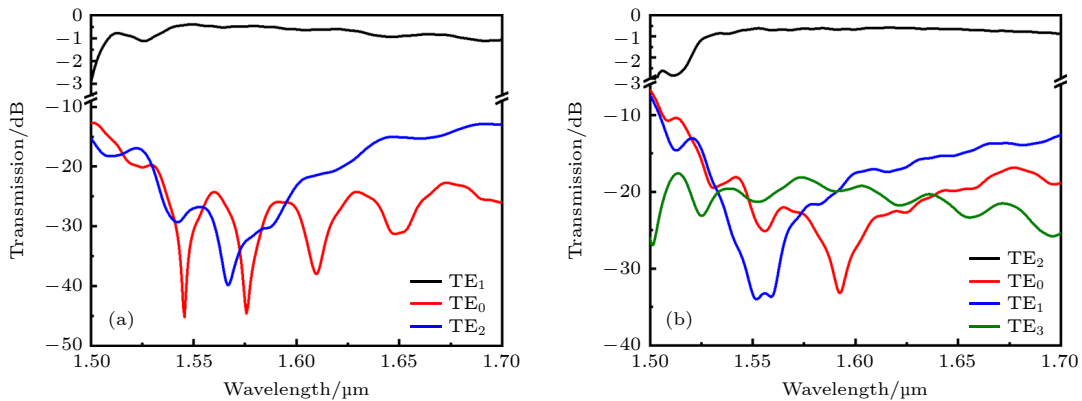


图 3 (a) TE_0 - TE_1 模式转换器的透射光谱; (b) TE_0 - TE_2 模式转换器的透射光谱

Fig. 3. (a) Transmission spectra for the TE_0 - TE_1 mode converter; (b) transmission spectra for the TE_0 - TE_2 mode converter.

1530 nm 的中心波长处测量到的耦合损耗为 6.9 dB/面, 如图 4(c) 中蓝线所示. 需要注意的是, 由于光栅耦合器的带宽有限, 为了测试宽带器件的光谱响应, 一般会在测试时对光纤探头的倾斜角度进行调节, 这样可以在一定程度上改变光栅耦合器响应光谱的中心波长, 从而满足在较宽的波长范围内对制备器件的光谱响应进行表征. 此处, 采用 4 种光纤角度对 TE 耦合光栅进行通光测试, 结果如图 4(c)

所示. 可以看出, 随着光纤倾斜角度减小, 光栅耦合器响应光谱的中心波长会红移. 但是在长波长范围 (> 1580 nm) 下, 测量光谱存在较大的振荡, 信噪比变差, 这可能是由于光栅耦合器的制造引起的, 也可能是耦合角度比较小引入了额外的反射.

图 5 为 TE_0 - TE_1 模式转换器和 TE_0 - TE_2 模式转换器的显微图和 TE_1 - TE_3 模式复用器的 SEM 图. 为了表征制备的模式转换器的插损和串扰, 在模式

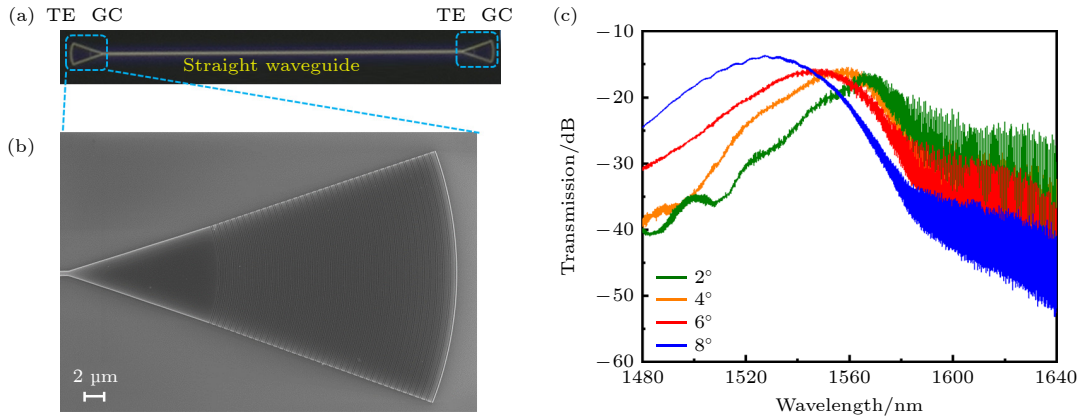


图 4 (a) 带有 TE GC 的直波导显微图; (b) TE GC 的 SEM 图; (c) 不同光纤角度下 TE 耦合光栅的传输光谱
Fig. 4. (a) Microscope image of the reference straight waveguide with TE-type grating couplers; (b) SEM image of TE-type grating coupler; (c) transmission spectra of TE-type grating couplers under different fiber angles.

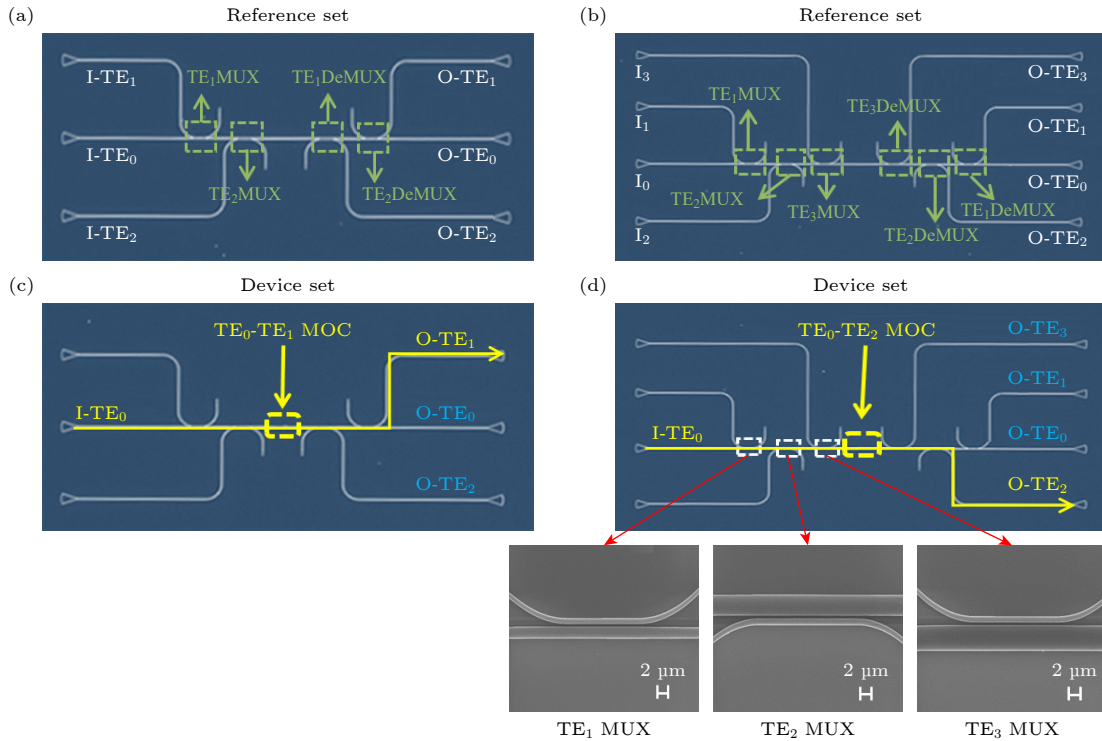


图 5 (a), (c) TE_0 - TE_1 模式转换器的测试方案显微图; (b), (d) TE_0 - TE_2 模式转换器的测试方案显微图以及 TE_1 - TE_3 模式复用器的 SEM 图

Fig. 5. (a), (c) Microscope images of the measure schemes for TE_0 - TE_1 mode converter; (b), (d) microscope images of the measure schemes for TE_0 - TE_2 mode converter and SEM images of TE_1 - TE_3 multiplexer.

转换器前后级联了基于非对称定向耦合器的模式(解)复用器, 以将输入的基模信号转换为高阶模信号并将输出的高阶模信号转换为基模信号进行测量. 模式(解)复用器的详细参数如表 2 所示. 对于 TE_0 - TE_1 模式转换器和 TE_0 - TE_2 模式转换器测量, 在同一个芯片上设计了一个器件组 (device set) 和参考组 (reference set) 用于对器件响应进行归一化. 其中, TE_i 复用器 (multiplexer, MUX) 能够将输入端口 I- TE_i 输入的 TE_0 模式耦合成总线波导中的 TE_i 模式, 并且 TE_i DeMUX 能够将 TE_i 模式转换为 TE_0 模式从 O- TE_i 输出端口输出. 根据图 5(a), (b) 中的参考组可以看出, 通过从 I- TE_i 端口入射光, 测量 O- TE_i 端口, 然后将测试结果除以 2, 就能够得到带有光栅耦合器的 TE_i 复用器的透射光谱. 而当 $i = 0$ 时, 则意味着是光栅耦合器本身的透射光谱. 因此, 在器件组中, 测量 TE_0 - TE_1 模式转换器和 TE_0 - TE_2 模式转换器的输出模式的传输特性, 可以通过在 I- TE_0 端口入射, 测量 O- TE_i 端口, 并对相应的 TE_i DeMUX 和光栅耦合器的传输进行归一化得到.

表 2 模式(解)复用器的详细参数
Table 2. Detail parameters for the mode (de) multiplexer.

模式(解)复用器	总线波导的宽度/ μm	接入波导宽度/ μm	间隔/ nm	耦合长度/ μm
TE1	0.835	0.4	200	15.5
TE2	1.29	0.406	200	21.3
TE3	1.63	0.38	200	18

以 TE_0 - TE_1 模式转换器为例.

1) 对于参考组来说, 当 TE_0 模式从 I- TE_0 输入时, 假设测得 O- TE_0 端口的值为 L_0 , 那么单个光栅耦合器的插损即为 $L_0/2$; 当 TE_0 模式从 I- TE_1 输入时, 假设测得 O- TE_1 端口的值为 L_1 , 那么单个 TE_1 DeMUX 和单个光栅耦合器的插损之和即为 $L_1/2$; 当 TE_0 模式从 I- TE_2 输入时, 假设测得 O- TE_2 端口的值为 L_2 , 那么单个 TE_2 DeMUX 和单个光栅耦合器的插损之和即为 $L_2/2$.

2) 对于器件组来说, 当 TE_0 模式从 I- TE_0 输入时, 假设测得 O- TE_1 端口的值为 L_3 , 待测的 TE_0 - TE_1 模式转换器的插损为 $L_{TL} = L_3 - L_1/2 - L_0/2$, 其传输路线如图 5(c) 黄线所示. 而另外两个端口 O- TE_0 和 O- TE_2 则为测量串扰端口, 假设测得这两个端口的值分别为 L_4 和 L_5 , 待测的 TE_0 - TE_1 模式转换器的串扰分别为 $L_{CT0} = L_4 - L_0$ 和 $L_{CT2} = L_5 - L_2/2 - L_0/2$.

制作得到的 TE_0 - TE_1 模式转换器以及 TE_0 - TE_2 模式转换器的 SEM 图及其放大的伪彩图如图 6 所示. 图 7 为实验测试链路图. 输出功率为 10 dBm 的可调谐激光 (tunable laser source, Santec, TSL-710) 从输入端口输入, 通过光纤偏振控制器 (polarization controller, PC) 对入射激光的偏振态进行调整以 TE 偏振态输入芯片. 通过器件传输后, 使用光功率计 (power meter, Santec, MPM-210) 测量输出端口的光功率输出. 基于该测试链路, 通过扫描激光波长, 即可得到器件的透射光谱响应.

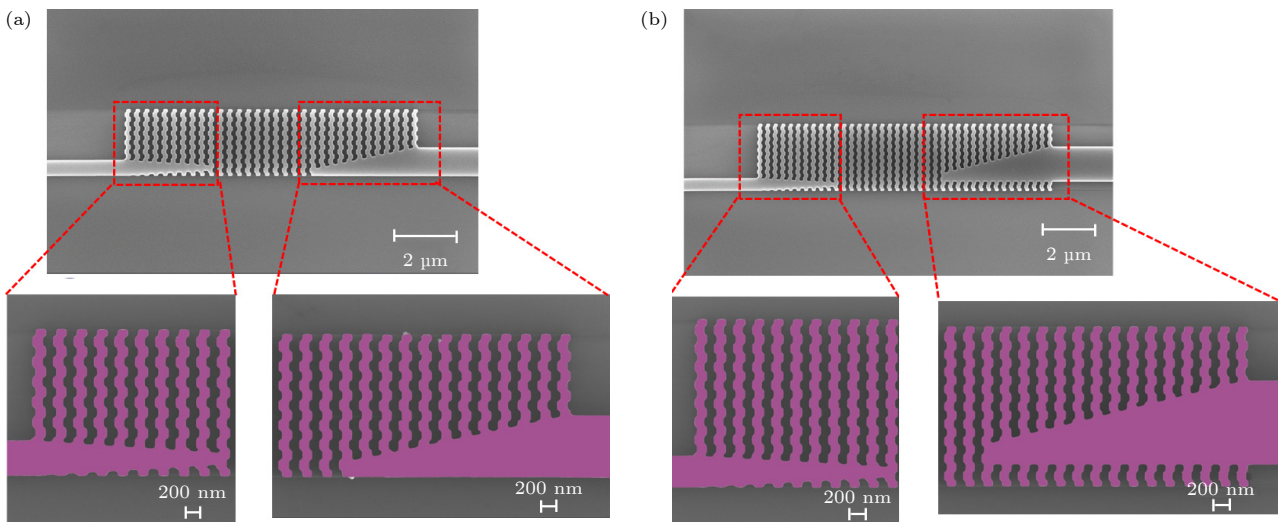


图 6 TE_0 - TE_1 模式转换器 (a) 和 TE_0 - TE_2 模式转换器 (b) 的 SEM 图及其放大的伪彩图

Fig. 6. SEM images and corresponding pseudocolor SEM images of TE_0 - TE_1 mode converter (a) and TE_0 - TE_2 mode converter (b).

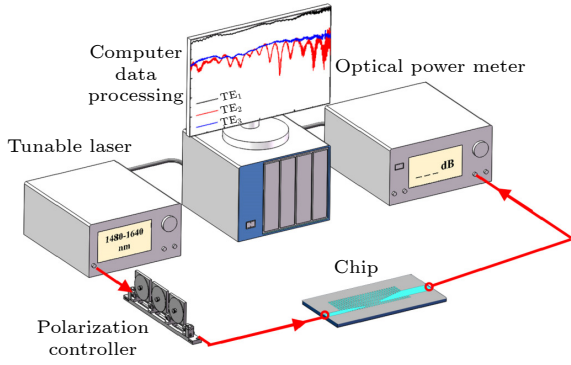


图 7 模式转换器的插损和串扰的测试链路图

Fig. 7. Experimental setup for measuring the insertion loss and crosstalk of mode converter.

图 8 为测试得到的传输光谱. 根据上述分析可知, 受光栅耦合器在长波段 ($> 1580 \text{ nm}$) 性能影响, 选取了工作波段为 $1500\text{--}1580 \text{ nm}$ 的光谱进行分析. 对于 $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ 模式转换器而言, 图 8(a) 中黑色曲线为 TE_1 模的透过率光谱, 代表插损. 图 8(a) 中红色和蓝色曲线分别为 TE_0 模、 TE_2 模的透过率光谱, 它们与 TE_1 模的透过率光谱 (黑色曲线) 的差值即为相应模式之间的串扰. 可以看出, 在 $1500\text{--}1580 \text{ nm}$ 的工作波长范围内, 插损小于 1.9 dB , 串扰小于 -10 dB . 对于 $\text{TE}_0\text{-TE}_2$ 模式转换器而言, 图 8(b) 中黑色曲线为 TE_2 模的透过率光谱, 代表插损. 图 8(b) 中红色、蓝色和绿色曲线分别为 TE_0 模、 TE_1 模、 TE_3 模的透过率光谱, 它们与 TE_2 模的透过率光谱 (黑色曲线) 的差值即为相应模式之间的串扰. 在 $1512\text{--}1580 \text{ nm}$ 的工作波长范围内, 插损低于 2.5 dB , 串扰值小于 -10 dB . 测试得到的透射光谱比仿真结果稍微差一些, 这可能是由于制造误差引起的, 例如波导侧壁不够平滑, 对光产生了一些散射. 此外, 由于光刻和刻蚀误差的存在, 制造的器件尺寸也可能偏离设计值, 比如基于非对称定向耦合器的模式复用器对制造的变化非常敏感, 且带宽较窄, 而测试过程中也会引入一定误差. 值得注意的是仿真结果和实验结果中的频谱均有振荡, 而且两者的自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 不同. 这是由于受限于工艺的不完美, 制备得到的器件尺寸与仿真没有完全一致, 导致谐振不一样, 即不同的 FSR, 但是数值上与仿真实接近, 可验证仿真结果. 类似的现象在文献 [31] 中也存在. 除此之外, 相比于仿真结果中 1500 nm 附近的插损和串扰增大, 实验测得的 1500 nm 附近的插损和串扰曲线较为平坦. 这是因

为受到工艺的影响, 在实际流片中器件的尺寸和仿真中存在差别, 同时在实验中测试结果也会受到耦合光栅的影响, 布拉格波长发生移动.

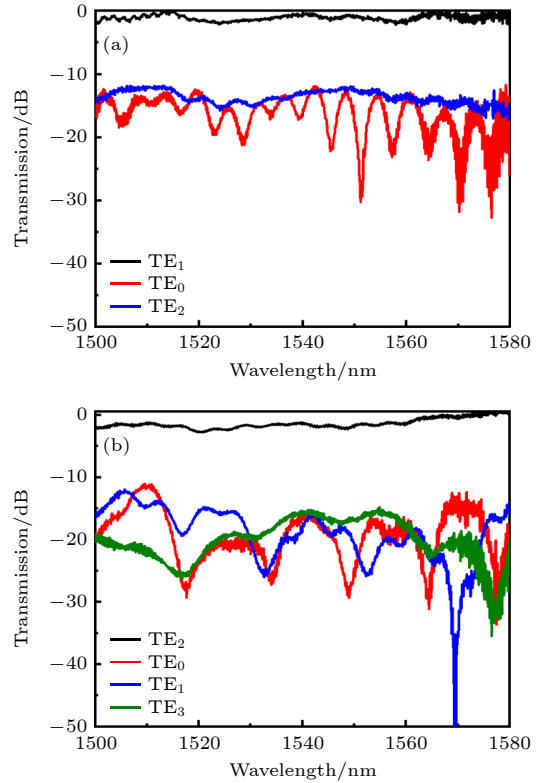


图 8 测试得到的器件传输谱 (a) $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ 模式转换器; (b) $\text{TE}_0\text{-TE}_2$ 模式转换器

Fig. 8. Measured transmission spectra: (a) $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ mode converter; (b) $\text{TE}_0\text{-TE}_2$ mode converter.

4 结 论

本文通过实验证明了基于 BSWG 结构调节材料各向异性的能力, 实现了具有大的最小特征尺寸 (145 nm) 的模式转换器. 得益于 BSWG 与输入/输出非对称锥形波导之间的模式演变和模式耦合, $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ 和 $\text{TE}_0\text{-TE}_2$ 模式转换器的转换长度分别为 $9.39 \mu\text{m}$ 和 $11.27 \mu\text{m}$. 测试得到 $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ 模式转换器在 $1500\text{--}1580 \text{ nm}$ 的光谱范围内的插损小于 1.9 dB 、串扰小于 -10 dB . $\text{TE}_0\text{-TE}_2$ 模式转换器在 $1512\text{--}1580 \text{ nm}$ 的光谱范围内插损小于 2.5 dB 、串扰小于 -10 dB . 在 68 nm ($1512\text{--}1580 \text{ nm}$, 受限于激光器调谐范围和光栅耦合器) 带宽下, 插损和串扰分别小于 2.5 dB 和 -10 dB . 此外, 该方案可以扩展以实现其余高阶波导模式转换, 在高密度片上 MDM 系统和光信号处理系统中具有潜在的应用.

参考文献

- [1] Luo L W, Ophir N, Chen C P, Gabrielli L H, Poitras C B, Bergmen K, and Lipson M 2014 *Nat. Commun.* **5** 3069
- [2] Li C L, Liu D J, and Dai D X 2019 *Nanophotonics* **8** 227
- [3] Hsu Y, Chuang C Y, Wu X R, Chen G H, Hsu C W, Chang Y C, Chow C W, Chen J, Lai Y C, Yeh C H, Tsang H K 2018 *IEEE Photonics Technol. L.* **30** 1052
- [4] Li H Q, Wang P J, Yang T J, Dai T, Wang G C, Li S Q, Chen W W, Yang J Y 2018 *Opt. Laser Technol.* **100** 7
- [5] Pan T H and Tseng S Y 2015 *Opt. Express* **23** 10405
- [6] Xu Y, Liu L P, Hu X, Dong Y, Zhang B, Ni Y 2022 *Opt. Laser Technol.* **151** 108028
- [7] Ohana D, Levy U 2014 *Opt. Express* **22** 27617
- [8] Gabrielli L H, Liu D, Johnson S G, Lipson M 2012 *Nat. Commun.* **3** 1217
- [9] Xu H N, Shi Y C 2018 *Laser Photonics Rev.* **12** 1700240
- [10] Chang W J, Lu L L Z, Ren X S, Lu L H, Cheng M F, Liu D M, Zhang M M 2018 *IEEE Photonics J.* **10** 4501008
- [11] Garcia-Rodriguez D, Corral J L, Griol A, Llorente R 2017 *Opt. Lett.* **42** 1221
- [12] Chen W W, Wang P J, Yang J Y 2014 *IEEE Photonics Technol. L.* **26** 2043
- [13] Oner B B, Ustun K, Kurt H, Okyay A K, Turhan-Sayan G 2015 *Opt. Express* **23** 3186
- [14] Chack D, Hassan S, Qasim M 2020 *Appl. Opt.* **59** 3652
- [15] Liu L P, Xu Y, Wen L, Dong Y, Zhang B, Ni Y 2019 *Appl. Optics* **58** 9075
- [16] Cheben P, Halir R, Schmid J H, Atwater H A, Smith D R 2018 *Nature* **560** 565
- [17] Luque-González J M, Sánchez-Postigo A, Hadij-ElHouati A, Ortega-Moñux A, Wangüemert-Pérez J G, Schmid J H, Cheben P, Molina-Fernández I, Halir R, 2021 *Nanophotonics* **10** 2765
- [18] Yu Z J, Xu H N, Liu D J, Li H, Shi Y C, Dai D X 2022 *J. Lightwave Technol.* **40** 1784
- [19] Wu F, Liu T T, Long Y, Xiao S Y, Chen G Y 2023 *Phys. Rev. B* **107** 165428
- [20] Mia M B, Jaidye N, Ahmed I, Ahmed S Z, Kim S 2023 *Opt. Express* **31** 4140
- [21] He Y, Zhang Y, Zhu Q M, An S, Cao R Y, Guo X H, Qiu C Y, Su Y K 2018 *J. Lightwave Technol.* **36** 5746
- [22] González-Andrade D, Gonzalo Wangüemert-Pérez J, Velasco A V, Ortega-Monux A, Herrero-Bermello A, Molina-Fernandez I, Halir R, Cheben P 2018 *IEEE Photonics J.* **10** 2201010
- [23] González-Andrade D, Dias A, Wangüemert-Pérez J G, Ortega-Monux A, Molina-Fernandez I, Halir R, Cheben P, Velasco A V 2020 *Opt. Laser Technol.* **129** 106297
- [24] Cheng Z, Wang J, Yang Z Y, Zhu L N, Yang Y Q, Huang Y Q, Ren X M 2019 *Opt. Express* **27** 34434
- [25] Wang H W, Zhang Y, He Y, Zhu Q M, Sun L, Su Y K 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1801191
- [26] Sun L, Hu R, Zhang Z H, He Y, Su Y K 2021 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **27** 8100308
- [27] Luque-González J M, Ortega-Moñux A, Halir R, Schmid J H, Cheben P, Molina-Fernández I, Wangüemert-Pérez J G 2021 *Laser Photonics Rev.* **15** 2000478
- [28] Lu M J, Deng C Y, Sun Y, Wang D Y, Huang L, Liu P C, Lin D D, Cheng W, Hu G H, Lin T, Yun B F, Cui Y P 2022 *Opt. Express* **30** 24655
- [29] Luque-González J M, Herrero-Bermello A, Ortega-Moux A, Sánchez-Rodríguez M, Velasco A V, Schmid J H, Cheben P, Molina-Fernández I, Halir R. 2020 *Opt. Lett.* **45** 3398
- [30] Yao R K, Li H X, Zhang B H, Chen W W, Wang P J, Dai S X, Liu Y X, Li J, Li Y, Fu Q, Dai T G, Yu H, Yang J Y, Pavasi L 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 6253
- [31] Mao S Q, Hu J Z, Zhang H Y, Jiang W F 2022 *IEEE J. Quantum Elect.* **58** 8400106

Silicon-based compact mode converter using bricked subwavelength grating*

Lu Meng-Jia Yun Bin-Feng[†]

(Advanced Photonics Center, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(Received 26 April 2023; revised manuscript received 25 May 2023)

Abstract

Facing the increasing capacity requirements of on-chip optical interconnects, mode division multiplexing technology (MDM), which fully uses the different spatial eigenmodes at the same wavelength as independent channels to transmit optical signals, has attracted tremendous interest. Mode-order converter that can convert the fundamental mode into high-order mode is a key component in MDM system. However, it is still very challenging to achieve compact mode-order converters with high performances. Subwavelength grating (SWG) can be equivalent to homogenous material, which has the prominent advantages such as controlling over birefringence, dispersion and anisotropy, thus making photonic devices possess high performance. Whereas the conventional SWG only needs single-etch step, but the implementation of SWG structure usually requires a fabrication resolution on the order of 100 nm and below, which is difficult for current wafer-scale fabrication technology. The anisotropic response of SWG can be further engineered by introducing bricked topology structure, providing an additional degree of freedom in the design. Meanwhile, the requirement for fabrication resolution can also be reduced (> 100 nm). In this work, we experimentally demonstrate compact TE_0 - TE_1 mode-order converter and TE_0 - TE_2 mode-order converter by using a bricked subwavelength grating (BSWG) based on a silicon-on-insulator (SOI) with the BSWG having a minimum feature size of 145 nm. In the proposed mode-order converter, a quasi- TE_0 mode is generated in the BSWG region, which can be regarded as an effective bridge between the two TE modes to be converted. Flexible mode conversion can be realized by only choosing appropriate structural parameters for specific mode transitions between input/output modes and the quasi- TE_0 mode. By combining three-dimensional (3D) finite difference time domain (FDTD) and particle swarm optimization (PSO) method, TE_0 - TE_1 mode-order converter and TE_0 - TE_2 mode-order converter are optimally designed. They can convert TE_0 mode into TE_1 and TE_2 mode with conversion length of 9.39 μm and 11.27 μm , respectively. The simulation results show that the insertion loss of < 1 dB and crosstalk of < -15 dB are achieved for both TE_0 - TE_1 mode-order converter and TE_0 - TE_2 mode-order converter, their corresponding working bandwidths being 128 nm (1511–1639 nm) and 126 nm (1527–1653 nm), respectively. The measurement results indicate that insertion loss and crosstalk are, respectively, less than 2.5 dB and -10 dB in a bandwidth of 68 nm (1512–1580 nm, limited by the laser tuning range and grating coupler).

Keywords: subwavelength grating, mode-order converter, silicon-on-insulator, anisotropy

PACS: 42.82.-m, 42.79.Sz, 42.82.Et, 47.11.Bc

DOI: 10.7498/aps.72.20230673

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62171118).

[†] Corresponding author. E-mail: ybf@seu.edu.cn



基于硅基砖砌型亚波长光栅的紧凑型模式转换器

陆梦佳 恽斌峰

Silicon-based compact mode converter using bricked subwavelength grating

Lu Meng-Jia Yun Bin-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 164203 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230673

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230673>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于亚波长光栅和三明治结构的偏振无关微环谐振器的设计与仿真

Design and simulation of polarization-insensitive ring resonator based on subwavelength grating and sandwiched structure

物理学报. 2021, 70(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201965>

新型绝缘体上硅静态随机存储器单元总剂量效应

Total ionizing dose effects on innovative silicon-on-insulator static random access memory cell

物理学报. 2019, 68(16): 168501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190405>

795 nm亚波长光栅耦合腔垂直腔面发射激光器的超窄线宽特性

Ultra-narrow linewidth characteristics of 795-nm subwavelength grating-coupled cavity vertical cavity surface emitting laser

物理学报. 2021, 70(22): 224207 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210293>

亚波长介质光栅对单层过渡金属硫化物的发光增强

Enhancement of photoluminescence of monolayer transition metal dichalcogenide by subwavelength TiO₂ grating

物理学报. 2022, 71(8): 087801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212358>

绝缘体上硅金属氧化物半导体场效应晶体管中辐射导致的寄生效应研究

Radiation induced parasitic effect in silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2018, 67(21): 216102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181372>

基于少模长周期光纤叠栅的模式转换器

Superimposed long period gratings based mode converter in few-mode fiber

物理学报. 2019, 68(5): 054204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181674>