

基于边缘智能优化的高性能模式转换器逆设计

杨子荣¹, 田野^{1*}, 廖俊鹏¹, 康哲², 张晓伟¹, 金庆辉¹¹宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211;²浙江大学光学科学与工程学院, 浙江 杭州 310058

摘要 模式转换器是实现模分复用技术(MDM)的关键部件。基于伴随法对器件边缘进行智能优化,从而在绝缘体上硅(SOI)平台上设计了高性能 TE_0 - TE_1 模式转换器。经仿真验证,在中心波长 1550 nm 处,模式转换效率达 99.6%,消光比达 31.2 dB,而损耗仅为 0.01 dB。在 1500~1600 nm 带宽范围内, TE_0 - TE_1 的转换效率保持在 96.6% 以上,消光比保持在 15.7 dB 以上,而损耗保持在 0.14 dB 以下。当器件尺寸变化在 ± 20 nm 以内时,器件在 1550 nm 处的转换效率保持在 97.2% 以上,消光比保持在 16.5 dB 以上,插入损耗维持在 0.12 dB 以下。在片上设计了 TE_1 模式的测试装置,并利用商业流片对转换器进行制备。实验结果表明,在 60 nm 的带宽范围内, TE_0 - TE_1 转换器的转换效率保持在 90% 以上,插入损耗维持在 0.4 dB 以下。因此,所提出的转换器具有高转换效率、宽带宽、低插入损耗和高制作容差等特点,为高性能片上模式转换器的高效设计提供了新思路。

关键词 集成光学; 硅基模式转换器; 模分复用; 逆设计; 伴随法

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221276

1 引言

数字信息技术的高速发展对数据中心的传输容量以及能耗提出了更高的要求。为实现高容量、低损耗以及低成本的片上数据传输,基于硅基光子平台模式复用/解复用技术成为了科研界和工业界的研究热点^[1-2]。其中,具有高转换效率、低损耗、宽带宽的硅基模式转换器是实现这一技术的重要基础。目前已报道的模式转换器多采用传统的设计方法,利用特定的结构[如定向耦合器(DC)^[3]、非对称 Y 分支(AYJ)^[4-5]、多模干涉耦合器(MIC)^[6]及非对称定向耦合器(ADC)^[7]等]来实现片上的模式转换^[8]。其中, Paredes 等^[7]利用锥形非对称定向耦合结构实现了片上横向电场基模(TE_0)至一阶模(TE_1)的转换,插入损耗保持在 1.2 dB 以下。以上设计方法往往依赖于设计人员的经验,需要在结构设计和参数优化上耗费大量时间。此外,当设计目标(目标模式)发生变化时,往往需要针对结构重新设计和优化,大量的重复性工作导致设计效率较低。

利用智能算法对器件结构进行逆向设计,可以有效降低器件的设计成本,提升设计效率^[9]。已有研究利用逆设计方法在硅基平台上实现了多种功能器件,如功率分配器^[10-11]、偏振分束器^[12]、波长解复用器^[13]、

模式转换器^[14]等。实现模式转换的方法主要包括粒子群算法(PSA)^[15]、遗传算法^[16]、直接二分搜索(DBS)法^[17]、伴随法^[18]等。其中,粒子群算法、遗传算法及直接二分搜索法常受限于优化参数的规模,并且在附加自由度时扩展性差。伴随法不受优化参数规模的限制,每次迭代时只通过一次正向模拟和一次伴随模拟,就可以提供拓扑或形状梯度信息^[19],并且对计算机的性能要求相对较低。利用逆向设计方法实现的器件结构可分为内部打孔型^[20]和边缘优化型^[21]。通过内部打孔实现的模式转换器往往对制作工艺要求严格,且内部孔洞容易在光传输时形成反射和散射,致使器件损耗相对较大。相较于内部打孔型器件,通过边缘优化实现的器件往往具有较高的传输效率和较大的工艺容差。

此外,模式转换器通常采用外部设备^[22]或者片上系统进行测量^[23]。外部设备测量需要利用复杂的光学系统以及电荷耦合器件(CCD)成像系统,并且无法直观得到模式功率;而片上测量系统则是直接将待测器件或者其他结构的模式转换器作为测量结构,由于这些器件本身可能存在串扰问题,因此测量结果的可靠性降低。

综上所述,本文利用基于伴随法的边缘优化方法,对 TE_0 - TE_1 转换器进行逆设计。器件设计区域尺寸为

收稿日期: 2022-09-26; 修回日期: 2022-10-14; 录用日期: 2022-11-25; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(62105167, 62075188, 61974078)、浙江省自然科学基金(LQ22F050008, LY21F050007, LY21F040002)、江苏省重点研发计划(BE2021082)、宁波市自然科学基金(2021J074, 2021J059)

通信作者: *tianye@nbu.edu.cn

10.0 μm \times 1.5 μm 。仿真结果表明,在中心波长 1550 nm 处, TE_0 - TE_1 转换器的转换效率为 99.6%, 消光比为 31.2 dB, 插入损耗为 0.01 dB。在 1500~1600 nm 带宽范围内, TE_0 - TE_1 转换器的转换效率保持在 96.6% 以上, 消光比保持在 15.7 dB 以上, 且插入损耗保持在 0.14 dB 以下。本文通过调整器件宽度研究了制作容差, 当器件尺寸变化在 ± 20 nm 以内时, 在 1550 nm 处 TE_0 - TE_1 的转换效率保持在 97.2% 以上, 消光比保持在 16.5 dB 以上, 插入损耗保持在 0.12 dB 以下。利用商业流片制备该器件, 并利用新型的片上测试结构进行测量。实验结果表明, 在 1500~1560 nm 带宽范围内, TE_0 - TE_1 转换器的转换效率保持在 90% 以上, 插入损耗维持在 0.4 dB 以下。

2 器件设计原理

本文所设计的器件基于硅材料, 其折射率约为 3.47。在周围覆盖二氧化硅包层, 其折射率约为 1.44。根据现有多项目晶圆 (MPW) 服务提供的标准, 波导厚度设定为 220 nm, 单模波导宽度设定为 0.5 μm 。由于

本文设计的器件面向通信波段, 因此中心波长设定为 1550 nm, 带宽范围设定为 100 nm。本文在波长 (λ) 1500、1550、1600 nm 处, 对 TE_0 和 TE_1 模式的截止宽度 (W) 进行了分析。由图 1(a)~(c) 可以看出, 对于 TE_0 模式, 三个波长下的截止宽度分别为 0.21、0.23、0.27 μm 。因此, 为了确保在 1500~1600 nm 带宽范围内 TE_0 模式可以稳定传输, 将输入波导的宽度设置为 0.5 μm 。同样, 对于 TE_1 模式, 三个波长下的截止宽度分别为 0.41、0.44、0.48 μm 。为了确保在 1500~1600 nm 带宽范围内 TE_1 模式可以稳定传输, 将输出波导的宽度设置为 1.5 μm 。综合以上分析, 器件的输入波导宽度设置为 0.5 μm , 输出波导宽度设置为 1.5 μm , 优化设计区域面积设置为 10.0 μm \times 1.5 μm 。在 1500~1600 nm 波长范围内, TE_0 模式在高度为 0.22 μm 、宽度为 0.5 μm 的波导中的有效折射率, 以及 TE_1 模式在高度为 0.22 μm 、宽度为 1.5 μm 的波导中的有效折射率如图 1(d) 所示。可以看出, 在 100 nm 范围内, TE_0 和 TE_1 模式的有效折射率均大于 1.44, 进一步验证了 TE_0 和 TE_1 模式在相应的波导中可以稳定传输。

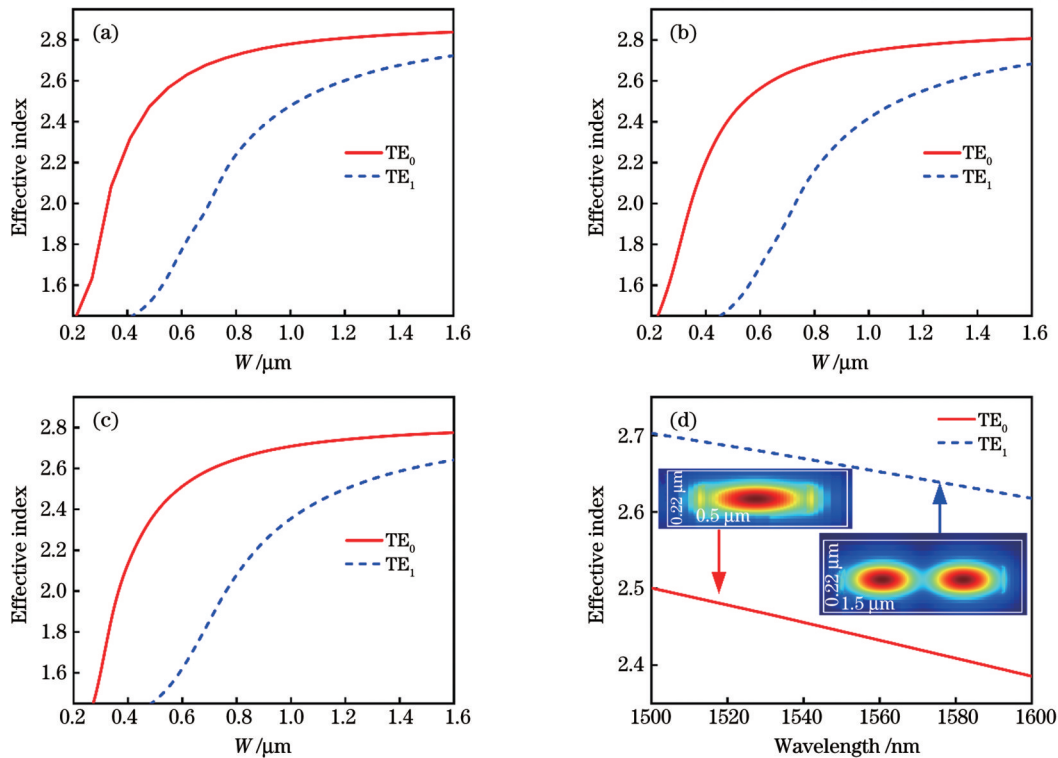


图 1 TE_0 和 TE_1 模式的有效折射率随 W 和波长的变化。(a) 波长为 1500 nm 时有效折射率随 W 的变化; (b) 波长为 1550 nm 时有效折射率随 W 的变化; (c) 波长为 1600 nm 时有效折射率随 W 的变化; (d) 有效折射率随波长的变化

Fig. 1 Effective refractive indexes of TE_0 and TE_1 modes versus W and wavelength. (a) Effective refractive index versus W when wavelength is 1500 nm; (b) effective refractive index versus W when wavelength is 1550 nm; (c) effective refractive index versus W when wavelength is 1600 nm; (d) effective refractive index versus wavelength

为了实现 TE_0 和 TE_1 模式之间的转换, 设置的器件的初始形状如图 2(a) 所示。在设计区域内, 器件下边界与输入/输出波导平行; 器件上边界呈斜线状将输入和输出波导连接。同时, 在上边界

插入 100 个离散优化点 (x_1, x_2, \dots, x_{100}), 调整优化点在 y 轴方向上的位置, 使器件的上边界形状发生变化, 进而设计区域上的介电常数发生改变, 引起输出光场的变化。利用梯度下降法, 可以不断

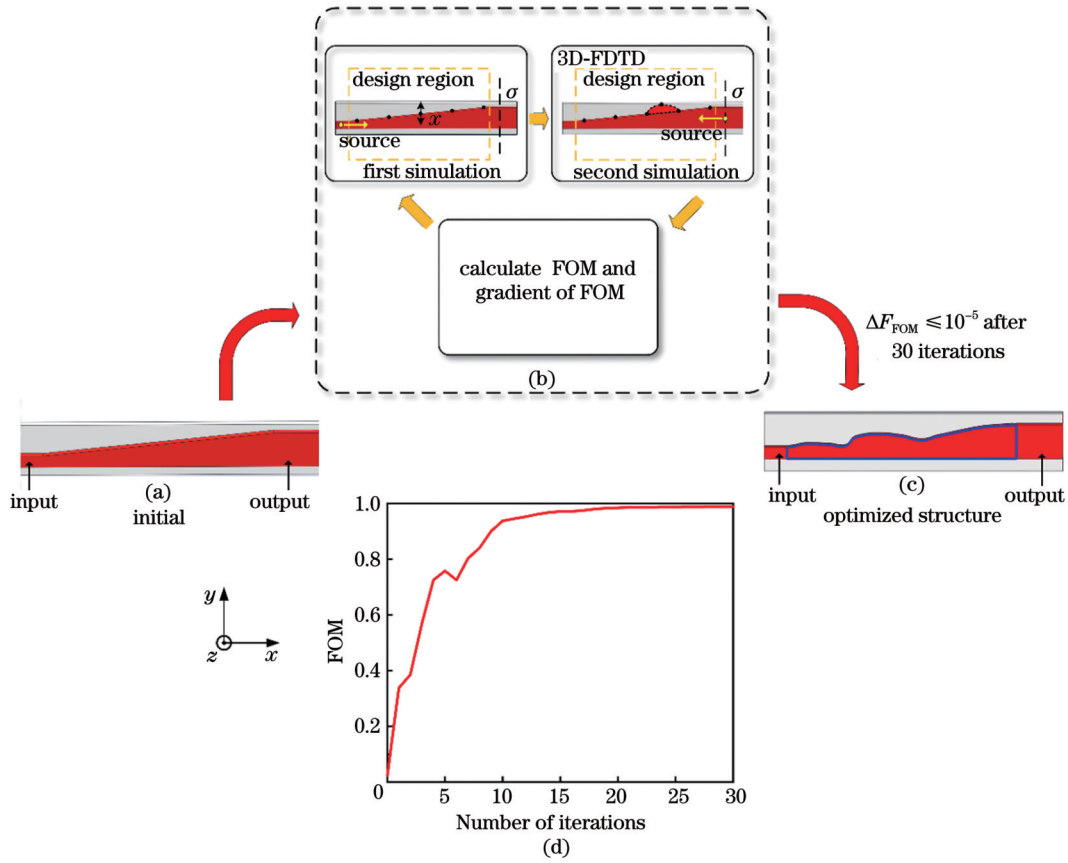


图 2 基于伴随法边缘优化原理设计模式转换器的流程图。(a) TE₀-TE₁转换器的初始结构;(b)伴随法对 TE₀-TE₁转换器进行逆向设计的过程;(c) TE₀-TE₁转换器的优化结构;(d) TE₀-TE₁转换器的 FOM 值演化曲线

Fig. 2 Flow chart of designing mode converter based on edge optimization principle of adjoint method. (a) Initial structure of TE₀-TE₁ converter; (b) process of inverse design for TE₀-TE₁ converter by adjoint method; (c) optimized structure of TE₀-TE₁ converter; (d) FOM evolution curve of TE₀-TE₁ converter

地调整上边界形状,并使输出逐渐接近目标光场。对于 TE₀-TE₁ 模式转换器,将品质因数 (FOM) 定

义为输出光场中 TE₁ 模式的归一化强度,表达式为

$$F_{\text{FOM}} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T^*(\lambda) |d\lambda - \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |T(\lambda) - T^*(\lambda)| d\lambda, \quad (1)$$

式中: λ_1 和 λ_2 是目标带宽范围的上、下限; $T(\lambda)$ 是传输到输出波导中的 TE₁ 模式的归一化功率; $T^*(\lambda)$ 是传输到输出波导中的目标功率。为了使 F_{FOM} 最大化,本文利用麦克斯韦方程计算品质因数 F_{FOM} 相对于优化点的梯度^[24]:

$$\frac{\Delta F_{\text{FOM}}}{\Delta x_n(x)} = 2\text{Re} \left\{ \int \left[(\epsilon_{\text{Si}} - \epsilon_{\text{SiO}_2}) E_{\parallel}(x) \cdot E_{\parallel}^{\text{adj}}(x) + \left(\frac{1}{\epsilon_{\text{SiO}_2}} - \frac{1}{\epsilon_{\text{Si}}} \right) D_{\perp}(x) \cdot D_{\perp}^{\text{adj}}(x) \right] dA \right\}, \quad (2)$$

式中: $\Delta x_n(x)$ 为第 n 个优化点在边界法线方向上的位置的变化量; ϵ_{Si} 为硅材料的介电常数; ϵ_{SiO_2} 为二氧化硅材料的介电常数; $E_{\parallel}(x)$ 为优化点初始电场的切向分量; $D_{\perp}(x)$ 为优化点初始电位移矢量的法向分量; $E_{\parallel}^{\text{adj}}(x)$ 为优化点伴随电场的切向分量; $D_{\perp}^{\text{adj}}(x)$ 为优化点电位移矢量的法向分量; A 为初始边界。

图 2(b) 展示了利用伴随法对模式转换器进行逆向设计的过程,其中 σ 为上方输出波导的横截面。首先,光从输入波导正向传输到输出波导,利用三维时域有限差分 (3D-FDTD) 法对 TE₀-TE₁ 转换器进行一次正向传输仿真,获取设计区域中优化点处的稳态电场。利用 Python 调用正向模拟结果,计算设计区域中优化

点处的初始电场的切向分量 $E_{\parallel}(x)$ 和初始电位移矢量的法向分量 $D_{\perp}(x)$, 并且计算输出波导中 TE₁ 模式的归一化功率 $T(\lambda)$, 根据式 (1) 计算品质因数 F_{FOM} 。然后,在输出端加载光源,光源逆向辐射至优化点,利用 3D-FDTD 法进行第二次伴随仿真,利用 Python 调用伴随仿真结果,计算设计区域中优化点处伴随电场 $E_{\parallel}^{\text{adj}}(x)$ 的切向分量及伴随电位移矢量的法向分量 $D_{\perp}^{\text{adj}}(x)$, 根据式 (2) 计算品质因数 F_{FOM} 相对于优化点的梯度。通过有限内存拟牛顿法 (L-BFGS-B) 结合计算得到的梯度将 F_{FOM} 值最大化。当相邻两次迭代间的品质因数变化值小于 10^{-5} 时停止迭代, TE₀-TE₁ 转换器经过 30 次迭代后,得到调整后的优化点 x 在 y 轴方

向上的最佳位置,利用调整后的优化点结合样条插值拟合得到 TE_0 - TE_1 转换器的边界曲线。 TE_0 - TE_1 转换器的优化结构如图 2(c) 所示。图 2(d) 展示了 TE_0 - TE_1 转换器的 F_{FOM} 值演化曲线趋势。可以看到, F_{FOM} 值在前几次迭代过程中快速提升,并在第 10 次迭代后达到 0.9,在 20 次迭代后趋于平稳。由此可见,利用伴随法进行逆设计可以有效减少迭代次数,提升设计效率。

3 器件仿真分析

3.1 器件性能分析

本文通过 3D-FDTD 法对优化后的 TE_0 - TE_1 转换器进行仿真,从转换效率、消光比及插入损耗等方面对器件的性能进行分析。当波长为 1550 nm 时, TE_0 - TE_1 转换器的电场分布如图 3(a) 所示。当输入模场为 TE_0 时,可以观测到输出的模场为 TE_1 模式,如图 3(b) 所示。在 1500~1600 nm 带宽范围内,模式转换器的转换效率曲线如图 3(c) 所示。转换效率的表达式为

$$T = \frac{P_{output}^{TE_1}}{P_{input}^{TE_0}}, \quad (3)$$

式中: $P_{output}^{TE_1}$ 为输出的 TE_1 模式功率; $P_{input}^{TE_0}$ 为输入功率。由图 3 可知,在 1550 nm 处,转换器的转换效率高 达 99.6%; 在 1500~1600 nm 的带宽范围内,转换效率保持在 96.6% 以上。图 3(d) 为 TE_0 - TE_1 转换器在 100 nm 带宽内的消光比(ER)曲线图。消光比表达式为

$$E_{ER} = 10 \cdot \lg(M), \quad (4)$$

式中: M 为输出功率中 TE_1 模式与其他串扰模式的比值。由图 3 可知,在 1550 nm 处,消光比可达 31.2 dB; 在 100 nm 带宽范围内,消光比保持在 15.7 dB 以上。图 3(e) 为 TE_0 - TE_1 转换器在 1500~1600 nm 带宽范围内的插入损耗(IL)曲线图。插入损耗表达式为

$$I_{IL} = -10 \cdot \lg(T), \quad (5)$$

式中: T 为转换效率。在 1550 nm 处,器件的插入损耗为 0.01 dB; 在 100 nm 带宽范围内,插入损耗保持在 0.14 dB 以下。

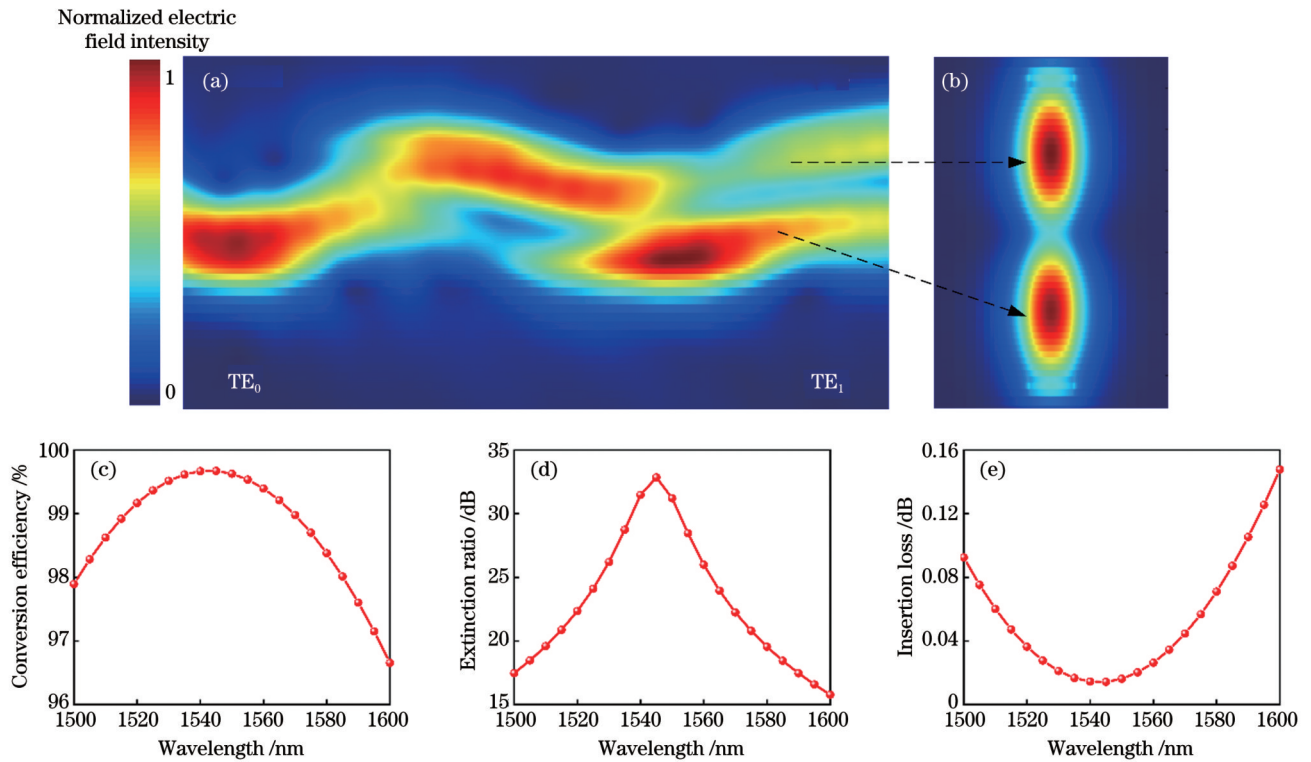


图 3 在 1500~1600 nm 带宽范围内 TE_0 - TE_1 转换器的性能分析。(a) 在 1550 nm 处 TE_0 - TE_1 转换器的电场分布图; (b) TE_0 - TE_1 转换器的输出模场图; (c) 转换效率; (d) 消光比; (e) 插入损耗

Fig. 3 Performance analysis for TE_0 - TE_1 converter in bandwidth range of 1500-1600 nm. (a) Electric field distribution of TE_0 - TE_1 converter at 1550 nm; (b) output mode field of TE_0 - TE_1 converter; (c) conversion efficiency; (d) extinction ratio; (e) insertion loss

3.2 制作容差分析

在器件制作过程中,由于刻蚀精度问题,难免会产生制作误差。为了研究制作误差对模式转换器的性能影响,对器件的尺寸进行一定的调整,宽度变化范围(ΔW)为 ± 20 nm,并针对 1550 nm 处器件的性能进行仿真分析,结果如图 4 所示。可以看到,当器件宽度变

化范围为 ± 20 nm 时,转换效率保持在 97.2% 以上,消光比保持在 16.5 dB 以上,而插入损耗保持在 0.12 dB 以下。由此可见,该器件具有较高的制作容差。由以上分析可知,本文通过逆向设计得到的 TE_0 - TE_1 转换器在较宽的带宽上具有高转换效率、高消光比、低损耗、高容差等优势。

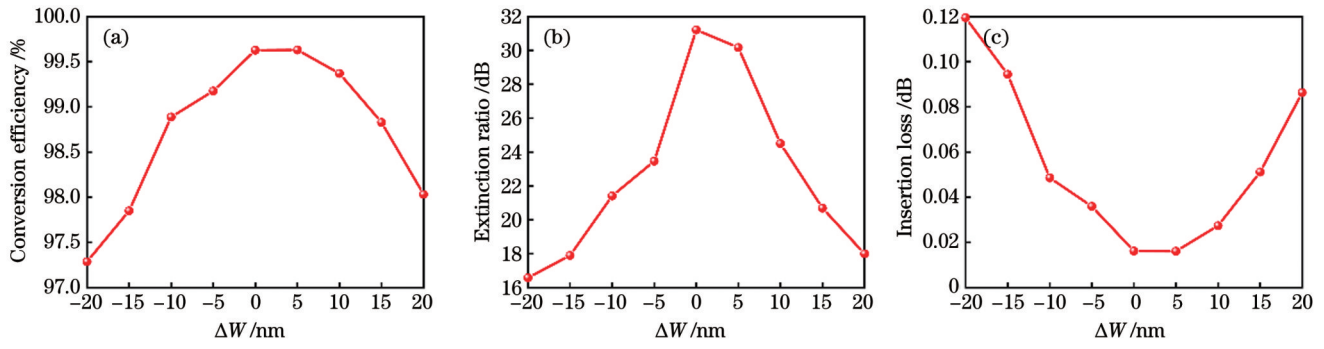


图4 1550 nm处转换效率、消光比及插入损耗随 $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ 转换器 ΔW 的变化。(a)转换效率;(b)消光比;(c)插入损耗

Fig. 4 Conversion efficiency, extinction ratio, and insertion loss versus ΔW of $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ converter at 1550 nm. (a) Conversion efficiency; (b) extinction ratio; (c) insertion loss

4 器件制作与测试

4.1 制备与表征方法

器件的制作由中科微光子科技公司(HOPHO)代工完成。该制作基于8英寸(1 inch=2.54 cm)互补金属氧化物半导体(COMS)工艺线,采用了200 mm厚绝缘体上硅(SOI)衬底[掩埋氧化物(BOX)层厚度为 $2\ \mu\text{m}$,顶层硅厚度为 $220\ \text{nm}$],刻蚀精度为 $180\ \text{nm}$ 。在器件的输入和输出端,采用了光栅垂直耦合器作为光路输入/输出通道,每个端口的耦合损耗约为5 dB。本次测试利用可调谐激光器作为光源,利用片上测试结构对 TE_1 模式进行解析,并利用光电探测器接收输出信号。器件结构以及片上测试结构如图5所示,其中SEM表示扫描电镜。片上测试结构的工作原理如下:图5(a)为通过逆设计得到的模式转换器,当注入

TE_0 模式时,在该器件的输出端生成了 TE_1 模式。 TE_1 的模场是由两个强度相等、相位相差 π 的模斑组成。该模场通过图5(b)所示结构形成了两束相位相差 π 的 TE_0 模式光,并平行注入至图5(c)所示结构的上、下波导中。如图5(c)所示,在上波导与下波导之间插入一根波导,其与上、下波导的间隙均为 $200\ \text{nm}$,形成了耦合结构。由于上、下波导中的 TE_0 模式光相位差为 π ,因此在任意耦合长度下,光无法耦合至中间波导。通过测试三个端口的输出光功率,可以判断所设计器件的输出是否为 TE_1 模式。也可利用上、下端口的功率来估算出 TE_1 模式的光功率,进而计算出转换效率和插入损耗。利用本文所设计的片上测试结构,可以对模式转换器的转换效率和插入损耗进行直接测试,无须再接入复杂的外部测试系统,如红外CCD、光学透镜等,在片上高阶模式的高效、精准测试方面具备优势。

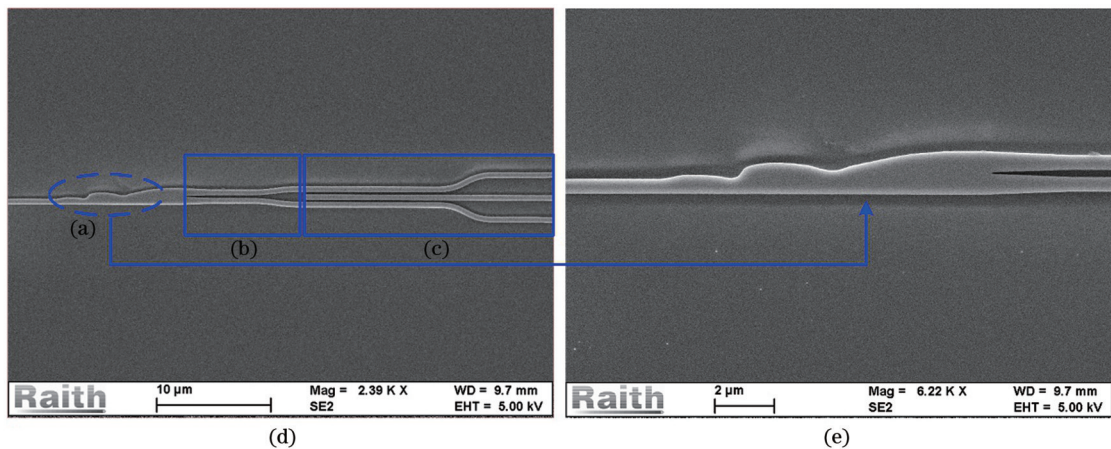


图5 $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ 转换器的SEM图。(a)模式转换器结构;(b)模斑分离结构;(c)平行测试结构;(d) $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ 转换器测试系统电镜扫描图;(e) $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ 转换器电镜扫描图

Fig. 5 SEM images of $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ converter. (a) Structure of mode converter; (b) structure of mode speckle separation; (c) parallel test structure; (d) SEM image of test system of $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ converter; (e) SEM image of $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ converter

由于光源的带宽限制以及光栅耦合器对波长的敏感性,本文将器件的测试范围限定为 $1500\sim 1560\ \text{nm}$ 。在测试过程中,首先,测量光栅耦合器的功率。然后,测量 $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ 转换器的透射率。最后,将 $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ 转换器测试透射率减去光栅耦合器测试透射率,得到

$\text{TE}_0\text{-TE}_1$ 转换器真正的透射率。通过数据处理去除光栅耦合器对测试结果的影响,所测得的 $\text{TE}_0\text{-TE}_1$ 转换器三个测量端口的透射率以及换算出的转换效率和插入损耗如图6所示。如图6(a)所示,在 $1550\ \text{nm}$ 处,上、下端口及中间端口的透射率分别为 $-3.5\ \text{dB}$ 、

-3.0 dB 和 -16.8 dB。在 1500~1560 nm 的带宽范围内,上端口透射率保持在 -4.3 dB 以上,下端口透射率保持在 -3.8 dB 以上,上、下端口透射率基本保持一致。中间端口透射率保持在 -15.2 dB 以下。由此可以证明器件的输出模式为 TE_1 。图 6(b) 展示了 1500~1560 nm 带宽范围内 TE_0 - TE_1 转换器的转换效率及插入损耗。在 60 nm 带宽范围内,转换效率保持

在 90% 以上,插入损耗维持在 0.4 dB 以下。 TE_0 - TE_1 转换器的测试结果与仿真结果相比有所衰减。主要原因有两个方面:一方面,在实际波导中会存在波导侧壁不光滑的现象,由此引入了额外的损耗,降低了转换效率;另一方面,由于存在制作误差,我们所提出的片上测试结构会存在一定的分光不均,因此测试结果存在偏差。

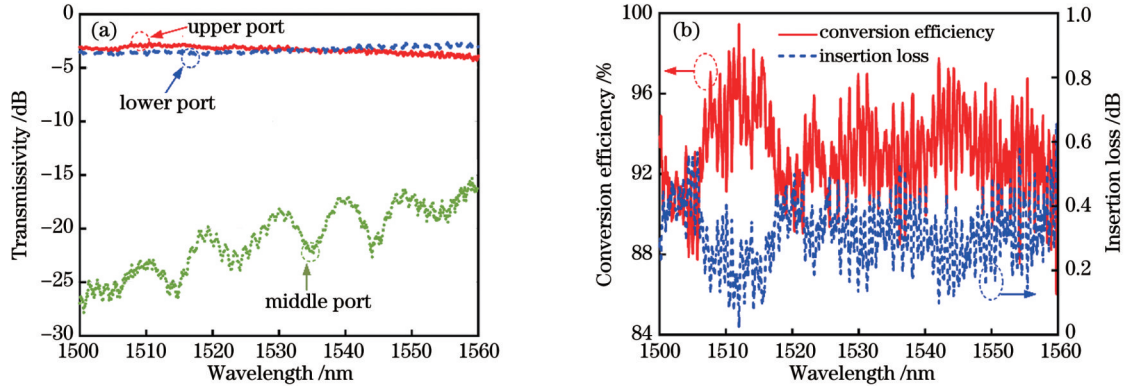


图 6 TE_0 - TE_1 转换器的透射率、转换效率及插入损耗曲线图。(a)透射率;(b)转换效率及插入损耗

Fig. 6 Transmission, conversion efficiency, and insertion loss curves of TE_0 - TE_1 converter. (a) Transmissivity; (b) conversion efficiency and insertion loss

4.2 模式转换器性能对比

表 1 展示了近五年文献中基于逆向设计和实验验证的模式转换器性能对比,其中带宽为满足各项性能

的波长范围。可以看出,本文所设计的模式转换器在带宽、损耗方面具有优势。

表 1 基于逆向设计和实验验证的模式转换器性能对比

Table 1 Performance comparison of mode converters based on inverse design and experimental verification

Reference	Footprint	Design method	Insertion loss /dB		Bandwidth /nm	
			Simulation	Measurement	Simulation	Measurement
[25]	$3.4 \mu\text{m} \times 1.4 \mu\text{m}$	Topology optimization	<0.50	<2.0	100	100
[26]	$2.4 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$	Direct binary search	<0.91	<1.0	60	60
[27]	$4 \mu\text{m} \times 1.6 \mu\text{m}$	Direct binary search	<1.70	<2.3	40	40
[28]	$1.542 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$	Shortcuts to adiabaticity	<1.10	<1.3	100	100
Our work	$10 \mu\text{m} \times 1.5 \mu\text{m}$	Adjoint method	<0.14	<0.5	100	65

5 结 论

通过伴随法设计并实现了宽带宽、高转换效率、高消光比、低损耗、高制作容差的紧凑型模式转换器。经仿真证明,在中心波长 1550 nm 处,器件 TE_0 - TE_1 转换效率为 99.6%,消光比达到 31.2 dB,而损耗仅为 0.01 dB。在 1500~1600 nm 带宽范围内, TE_0 - TE_1 转换器的转换效率保持在 96.6% 以上,消光比保持在 15.7 dB 以上,而插入损耗保持在 0.14 dB 以下。考虑到制作工艺对器件性能的影响,通过调整器件宽度研究了制作容差。当器件尺寸变化范围为 ± 20 nm 时,在 1550 nm 处,器件的转化效率保持在 97.2% 以上,消光比保持在 16.5 dB 以上,插入损耗维持在 0.12 dB 以

下。实验测试结果表明,在 60 nm 带宽范围内,上端口输出功率保持在 -4.3 dB 以上,下端口输出功率保持在 -3.8 dB 以上,中间端口输出功率保持在 -15.2 dB 以下。由上、下端口输出功率估算的 TE_0 - TE_1 转换器的转换效率保持在 90% 以上,插入损耗维持在 0.4 dB 以下。所提出的设计方法可实现任意模式的转换,为高性能片上光学复用系统的实现提供了新思路。

参 考 文 献

- [1] Yamashita Y, Fujisawa T, Makino S, et al. Design and fabrication of broadband PLC-based two-mode multi/demultiplexer using a wavefront matching method[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(11): 2252-2258.
- [2] 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 couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(13): 1323004.
- [3] Ding Y H, Xu J, da Ros F, et al. On-chip two-mode division multiplexing using tapered directional coupler-based mode multiplexer and demultiplexer[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 10376-10382.
- [4] Driscoll J B, Chen C P, Grote R R, et al. A 60 Gb/s MDM-WDM Si photonic link with <0.7 dB power penalty per channel [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18543-18555.
- [5] Wang J, Qi M H, Xuan Y, et al. Ultrabroadband silicon-on-insulator polarization beam splitter based on cascaded mode-sorting asymmetric Y-junctions[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(6): 2700608.
- [6] Zheng Z H, Chen Y, Chen H Y, et al. Ultra-compact reconfigurable device for mode conversion and dual-mode DPSK demodulation via inverse design[J]. *Optics Express*, 2021, 29(12): 17718-17725.
- [7] Paredes B, Mohammed Z, Villegas J, et al. Dual-band (O & C-bands) two-mode multiplexer on the SOI platform[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(3): 6600309.
- [8] 项彤, 陈鹤鸣, 胡宇宸. 硅基光电调制与模分复用集成器件[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1106001.
- Xiang T, Chen H M, Hu Y C. Silicon-based integrated device for electro-optic modulation assembly with mode-division multiplexing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1106001.
- [9] Molesky S, Lin Z, Piggott A Y, et al. Inverse design in nanophotonics[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(11): 659-670.
- [10] Tian Y, Qiu J F, Yu M B, et al. Broadband 1×3 couplers with variable splitting ratio using cascaded step-size MMI[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 6601008.
- [11] 李映函, 吕杰, 江琳, 等. 基于混合粒子群算法的光子器件逆向设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 1113001.
- Li Y H, Lü J, Jiang L, et al. Reverse design of photonic devices based on a hybrid particle swarm algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1113001.
- [12] Shen B, Wang P, Polson R, et al. An integrated-nanophotonics polarization beamsplitter with $2.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$ footprint[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(6): 378-382.
- [13] Verduyck D, Sapra N V, Su L, et al. Analytical level set fabrication constraints for inverse design[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 8999.
- [14] Ren Y M, Zhang L X, Wang W Q, et al. Genetic-algorithm-based deep neural networks for highly efficient photonic device design[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(6): 893-898.
- [15] Chen D G, Xiao X, Wang L, et al. Low-loss and fabrication tolerant silicon mode-order converters based on novel compact tapers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11152-11159.
- [16] Shen B T, Shu H W, Zhou L J, et al. A design method for high fabrication tolerance integrated optical mode multiplexer[J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 63(6): 160409.
- [17] Xu Y H, Ma H S, Xie T, et al. Ultra-compact power splitters with low loss in arbitrary direction based on inverse design method [J]. *Photonics*, 2021, 8(11): 516.
- [18] Su L, Verduyck D, Skarda J, et al. Nanophotonic inverse design with SPINS: software architecture and practical considerations[J]. *Applied Physics Reviews*, 2020, 7(1): 011407.
- [19] Wang K Y, Ren X S, Chang W J, et al. Inverse design of digital nanophotonic devices using the adjoint method[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(4): 528-533.
- [20] Piggott A Y, Lu J, Lagoudakis K G, et al. Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(6): 374-377.
- [21] Lalau-Keraly C M, Bhargava S, Miller O D, et al. Adjoint shape optimization applied to electromagnetic design[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21693-21701.
- [22] Zhang G W, Liboiron-Ladouceur O. Scalable and low crosstalk silicon mode exchanger for mode division multiplexing system enabled by inverse design[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13 (2): 6601013.
- [23] Zhang Z R, Yu Y, Fu S N. Broadband on-chip mode-division multiplexer based on adiabatic couplers and symmetric Y-junction [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 6600406.
- [24] Dennis M O. Photonic design: from fundamental solar cell physics to computational inverse design[D]. Berkeley: University of California-Berkeley, 2012.
- [25] Frelsen L F, Ding Y H, Sigmund O, et al. Topology-optimized mode converter in a silicon-on-insulator photonic wire waveguide [C]//2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), June 5-10, 2016, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016.
- [26] Chang W J, Lu L, Ren X S, et al. Ultra-compact mode (de) multiplexer based on subwavelength asymmetric Y-junction[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8162-8170.
- [27] Jia H, Chen H X, Yang J H, et al. Ultra-compact dual-polarization silicon mode-order converter[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4179-4182.
- [28] Guo D F, Chu T. Silicon mode (de)multiplexers with parameters optimized using shortcuts to adiabaticity[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9160-9170.

Inverse Design of High Performance Mode Converter Based on Edge Optimization

Yang Zirong¹, Tian Ye^{1*}, Liao Junpeng¹, Kang Zhe², Zhang Xiaowei¹, Jing Qinghui¹

¹Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China;

²College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China

Abstract

Objective The rapid development of digital information technology has placed higher requirements on the transmission capacities and energy consumption of data centers. Mode multiplexing/demultiplexing (MUX/DEMUX) technology based on silicon-on-insulator (SOI) platforms is highly promising for realizing on-chip data transmission with high capacity, low loss, and low cost and has thus become a research hotspot in scientific research and industry. As the basic unit of the MUX/DEMUX technique, mode converters with high conversion efficiency, low loss, and larger bandwidth are indispensable. Thus far, most of the reported mode converters are realized by using specific structures such as directional couplers, asymmetric Y-junctions, multimode interference couplers, and asymmetric directional couplers. The designs of these mode converters rely on designer experience and require

considerable time to optimize structural parameters. In addition, when the design target (target mode) changes, redesigning and optimizing the structure are often necessary, where the repetitive work leads to low design efficiency. However, inverse design of device structures through intelligent algorithms can effectively reduce the design costs of devices and improve design efficiency. In this study, a highly efficient mode converter based on edge shape optimization is presented on an SOI platform. The footprint of the device is $10.0\ \mu\text{m} \times 1.5\ \mu\text{m}$. TE_0 - TE_1 converter has the advantages of high conversion efficiency, high extinction ratio, low insertion loss, and high fabrication tolerance within a larger bandwidth using an adjoint method. Furthermore, the mode converter is fabricated using a commercial multi-project wafer (MPW) program, and measurements are executed using a novel on-chip test structure.

Methods First, the initial structure of the device was designed while 100 discrete boundary optimization points were simultaneously inserted into the top boundary of the design region of the TE_0 - TE_1 device. The edge of the mode converter was then optimized by adjusting the position of the optimization points in the y -axis direction using the adjoint method. After 30 iterations, the optimal positions of the optimization points were obtained in the y -axis direction. The boundary curve was defined by connecting the points using spline interpolation fitting. The number of iterations was effectively reduced and design efficiency was improved using the adjoint method. Based on the effects of the fabrication process on device performance, the fabrication tolerance of mode converters was investigated by adjusting the widths of devices, where the change in width was within $\pm 20\ \text{nm}$. In addition, the prepared devices were measured using an on-chip test structure to characterize the high performance of TE_0 - TE_1 converter.

Results and Discussions For TE_0 - TE_1 converter, the conversion efficiency reaches 99.6% at the central wavelength of 1550 nm, while the extinction ratio reaches 31.2 dB. The insertion loss is calculated as 0.01 dB (Fig. 3). As the wavelength varies from 1500 nm to 1600 nm, the conversion efficiency and extinction ratio can be maintained at greater than 96.6% and 15.7 dB, respectively, whereas the insertion loss is maintained at less than 0.14 dB (Fig. 3). It is noteworthy that the optimized devices are insensitive to wavelength variations. The fabrication tolerance of the devices was also analyzed. For TE_0 - TE_1 converter, the conversion efficiency and extinction ratio can be maintained at greater than 97.2% and 16.5 dB, respectively, whereas the insertion loss is less than 0.12 dB under a width variation of $\pm 20\ \text{nm}$ at 1550 nm (Fig. 4). These results show that the optimized devices are highly tolerant to fabrication tolerance. Experimental results show that the output power of up, down, and middle ports is $-3.5\ \text{dB}$, $-3.0\ \text{dB}$, and $-16.8\ \text{dB}$ at 1550 nm, respectively. As the wavelength varies from 1500 nm to 1560 nm, the output power of the up and down ports is maintained at greater than $-4.3\ \text{dB}$ and $-3.8\ \text{dB}$, respectively (Fig. 6). The output power of up and down ports is basically the same. The output power of the middle port is less than $-15.2\ \text{dB}$ (Fig. 6). It can be proved that the output mode of the device is TE_1 . In the 60-nm bandwidth range, the conversion efficiency of TE_0 - TE_1 converter is greater than 90%, and the insertion loss is less than 0.4 dB (Fig. 6). To compare the performances of mode converters with those in the forefront, this study reports on the mode converters designed using inverse design methods over the last five years. Results show that the TE_0 - TE_1 converter designed in this study has advantages in terms of bandwidth and loss.

Conclusions A compact mode converter with large bandwidth, high conversion efficiency, high extinction ratio, low insertion loss, and high fabrication tolerance is experimentally demonstrated. The adjoint method allows for a highly effective design of the mode converter. Simulation results show that the conversion efficiency and extinction ratio are greater than 96.6% and 15.7 dB, respectively, and the insertion loss is less than 0.14 dB within the wavelength range of 1500 nm to 1600 nm. A novel test structure is designed on the chip to characterize the output TE_1 mode, with results showing a conversion efficiency maintained at greater than 90% and insertion loss at less than 0.4 dB within a 60-nm bandwidth. The proposed design method can be extended to realize the conversion of arbitrary modes, thus providing a means for the efficient design of high-performance on-chip mode converters.

Key words integrated optics; silicon-based mode converter; mode multiplexing; inverse design; adjoint method