

基于边界变形的硅波导逆向三模式循环转换器

赫妍妍^{1*}, 马汉鹏², 余佳亮¹

¹应急管理大学矿山安全学院, 河北 廊坊

²应急管理大学安全工程学院, 河北 廊坊

收稿日期: 2026年8月22日; 录用日期: 2026年9月15日; 发布日期: 2026年9月23日

摘要

模式转换器是片上模分复用(MDM)系统的核心器件, 其性能直接影响系统传输容量与集成密度。本文设计了一种基于绝缘体上硅(SOI)平台的逆向三模式循环转换器, 实现了TE0-TE2、TE2-TE1、TE1-TE0的循环转换。采用边界变形逆向设计框架, 核心创新在于引入两步差异化权重优化策略, 实现各模式转换效率与串扰的均衡提升。仿真结果表明, 器件功能区域尺寸仅 $7\text{ }\mu\text{m} \times 1.65\text{ }\mu\text{m}$, 在1530~1570 nm波段内性能优异。1550 nm中心波长处传输效率模式纯度均高于97%, 全波段非目标串扰低于-15 dB。工艺误差分析表明, 在 $\pm 10\text{ nm}$ 尺寸偏差及局部随机误差下, 器件性能波动小于0.8%, 具备良好的工艺容差性。

关键词

光学器件, 模式转换器, 模分复用, 逆向设计, 三模式循环转换器

Inverse Triple-Mode Cyclic Converter of Silicon Waveguide Based on Boundary Deformation

Yanyan He^{1*}, Hanpeng Ma², Jialiang Yu¹

¹School of Mine Safety, University of Emergency Management, Langfang Hebei

²College of Safety Engineering, University of Emergency Management, Langfang Hebei

Received: August 22, 2026; accepted: September 15, 2026; published: September 23, 2026

Abstract

Mode converters are the core components of on-chip mode-division multiplexing (MDM) systems,

*通讯作者。

文章引用: 赫妍妍, 马汉鹏, 余佳亮. 基于边界变形的硅波导逆向三模式循环转换器[J]. 建模与仿真, 2026, 15(9): 89-100. DOI: 10.12677/mos.2026.159136

and their performance directly affects the system's transmission capacity and integration density. This paper presents the design of a reverse three-mode cyclic converter based on a silicon-on-insulator (SOI) platform, which enables cyclic conversion between TE0-TE2, TE2-TE1, and TE1-TE0. Using a boundary-deformation reverse-design framework, the core innovation lies in the introduction of a two-step differentiated weight optimization strategy, which achieves a balanced improvement in mode conversion efficiency and crosstalk. Simulation results show that the device's functional area measures only $7\ \mu\text{m} \times 1.65\ \mu\text{m}$ and exhibits excellent performance in the 1530~1570 nm wavelength band. At the center wavelength of 1550 nm, both transmission efficiency and mode purity exceed 97%, and off-target crosstalk across the entire wavelength band is below -15 dB. Process error analysis indicates that, under dimensional deviations of $\pm 10\ \text{nm}$ and local random errors, device performance variation is less than 0.8%, demonstrating good process tolerance.

Keywords

Optical Devices, Mode Converter, Mode-Division Multiplexing, Inverse Design, Triple-Mode Cyclic Converter

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着通信技术的迅猛发展, 通信系统传输容量受数据流量激增与频谱资源紧缩的双重压力, 模分复用(MDM)技术通过在单波导中并行传输正交空间模式以提升容量与频谱效率[1]-[4], 绝缘体上硅(SOI)平台因其高折射率差、CMOS 工艺兼容性 & 高集成密度等优势, 成为片上 MDM 系统的理想载体[5] [6]。其中, TE0、TE1 与 TE2 作为硅基波导中易于激发且可稳定传输的低阶横电模, 已被广泛用于构建高容量 MDM 链路, 为提升片上光互连能力奠定了坚实基础。

模式转换器作为 MDM 系统的核心功能器件, 负责特定输入模式与目标输出模式的精准转换, 是保障多模式信号有效传输的关键[7]-[13]。近年来, 研究者提出了多种设计方法: 文献[7]以混合形状优化方法, 融合粒子群优化与伴随方法优化 S 弯波导结构, 在 $13\ \mu\text{m}$ 长的器件中实现了 TE0 至 TE3 的任意阶模式转换。文献[12]利用亚波长光栅与锥形波导的相位匹配效应, 设计了偏振不敏感模式转换器, 在 $7 \times 1.58\ \mu\text{m}^2$ 的紧凑结构中实现了 TE0/TM0-TE1/TM1 模式转换。文献[13]基于伯恩斯坦多项式参数化描述最终优化形状所具有的变形, 结合移动渐近线优化算法, 通过直接重构硅波导结构, 在 $6 \times 1\ \mu\text{m}^2$ 的功能区内实现了 TE0-TE1 与 TE1-TE2 的模式转换。然而, 上述方案多针对单一模式对的定向转换, 难以在总线波导中灵活调配多个模式信道, 无法满足 MDM 系统动态路由需求。因此, 模式交换器件应运而生, 其能够在单一器件中实现特定模式的选择性交换与其他模式的直通传输, 为复杂信号路由提供了新路径[14]-[16]。文献[17]基于伴随变量法与水平集方法, 设计了三组模式交换单元: U_1 ($9.5\ \mu\text{m} \times 2.1\ \mu\text{m}$)实现 TE0 与 TE1 交换、TE2 直通, U_2 ($9.8\ \mu\text{m} \times 2.2\ \mu\text{m}$)实现 TE1 与 TE2 交换、TE0 直通, U_3 ($9.8\ \mu\text{m} \times 2.5\ \mu\text{m}$)实现 TE0 与 TE2 交换、TE1 直通, 级联后可构建三模式系统的任意信号路由, 但结构复杂且需考虑单元间匹配。文献[18]提出模式循环转换器的概念, 采用有限元法结合伯恩斯坦多项式参数化描述硅-空气边界最终优化形状所具有的变形的逆向设计框架, 在 $7\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 的功能区域内实现了双向循环转换器以及 TE0-TE1、TE1-TE2、TE2-TE0 的三模式循环转换器, 无需级联即可完成多模式动态调配, 简化了器件结构并提升了系统集成密度与信号传输稳定性。

文献[18]提出的三模式循环转换器(TMCC)虽实现了三模式循环转换,但各通道性能存在不均衡问题(插入损耗分别为 -0.51 dB、 -0.85 dB、 -0.59 dB)。为突破此局限,本文在相同逆向设计框架下提出两步差异化权重优化策略:先通过基础优化获取各通道性能基线,再对性能短板通道施加强化约束,实现三模式转换效率与串扰的均衡提升。基于该方法,本文设计了 TE0-TE2、TE2-TE1、TE1-TE0 的逆向三模式循环转换器,在保持紧凑尺寸的同时显著改善了各通道性能的一致性。

2. 三模式循环转换器的结构与参量设计

2.1. 三模式循环转换器结构

本文设计的逆向三模式循环转换器基于绝缘体上硅(SOI)平台构建。核心功能是实现 TE0-TE2、TE2-TE1、TE1-TE0 的高效循环转换,器件的三维结构及功能区域的演化过程如图 1 所示。转换器沿光传播方向(x 轴方向)依次由输入直波导、功能区域和输出直波导无缝衔接而成。输入/输出直波导采用条形硅波导,几何参数设计如下:波导宽度 $W = 1\ \mu\text{m}$,厚度 $t = 340\ \text{nm}$,长度均为 $3\ \mu\text{m}$ 。中间的功能区域初始形态为长度 $L = 7\ \mu\text{m}$ 、宽度 $1\ \mu\text{m}$ 、厚度 $340\ \text{nm}$ 的直波导(如图 1 中下图所示),该尺寸可稳定支持 TE0、TE1、TE2 三种模式传输,波导下方为二氧化硅(SiO_2)衬底,高折射率差实现对光场形成强限制,有效抑制模式泄漏,降低传输损耗。设计过程中仅对功能区域的上下硅-空气边界进行变形优化,不引入任何额外纳米结构或异质材料,天然兼容于 CMOS 工艺,从而显著简化了制备流程。经多轮优化后,功能区域演变为满足目标模式循环转换要求的非对称不规则结构(如图 1 中上图所示)。

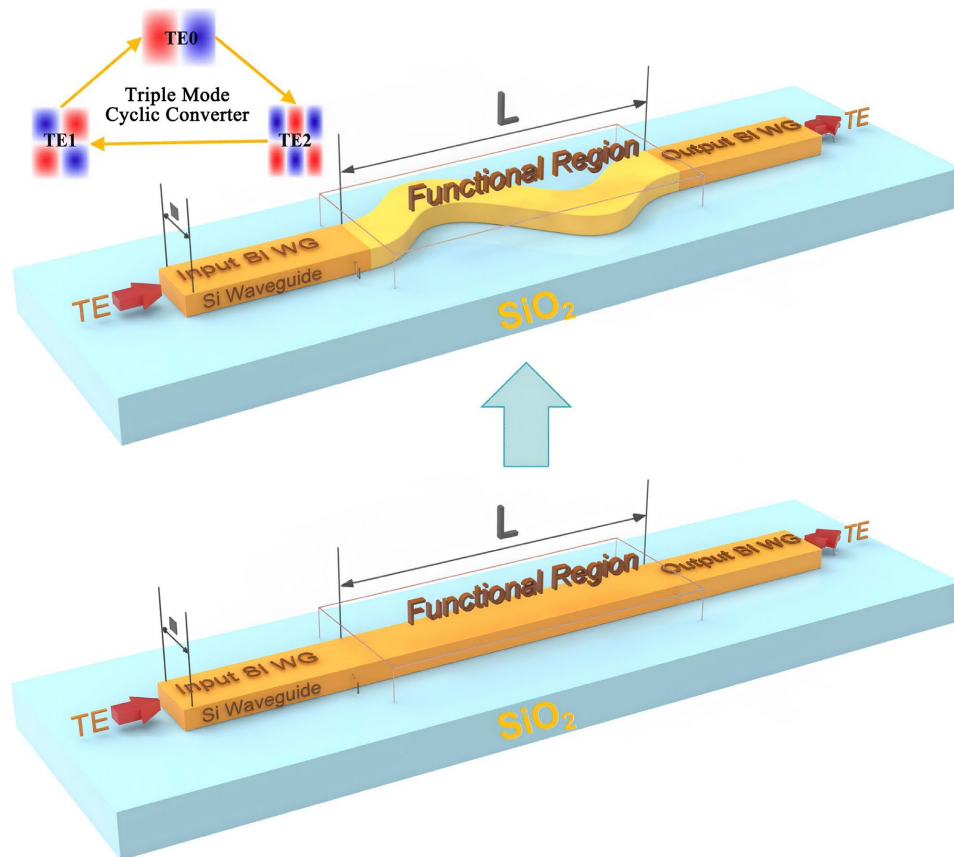


Figure 1. Schematic diagram of inverse-designed triple-mode cyclic converter and deformation evolution of the functional region
图 1. 逆向三模式循环转换器结构及功能区域变形演化示意图

图 2 展示功能区域经优化后的最终轮廓及关键坐标分布(x 轴为光传播方向, y 轴为垂直于传播方向的横向尺寸): 横向边界呈现连续平滑非线性变化, 最高点位于 $x = 2.9 \mu\text{m}$ ($y = 1.35 \mu\text{m}$); 最低点位于 $x = 5.4 \mu\text{m}$ ($y = -0.31 \mu\text{m}$)。当 TE0、TE2、TE1 模式分别输入后, 经 $7 \mu\text{m}$ 功能区域实现目标模式间的高效能量转移, 最终在输出端分别转换为 TE2、TE1、TE0, 完成三种模式循环。

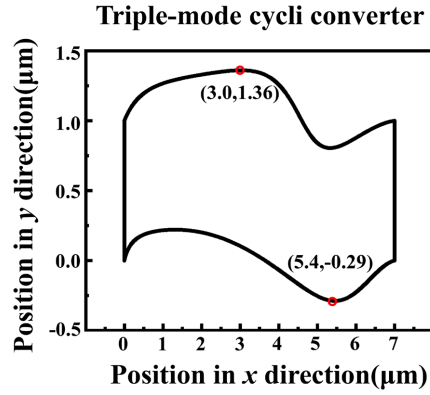


Figure 2. Geometric shapes and coordinates of the functional regions for the inverse-designed triple-mode cyclic converters
图 2. 逆向三模式循环转换器功能区域的几何形状及坐标

2.2. 理论模型

基于耦合模理论, TE0、TE1、TE2 在硅波导中的传播本质是模式间的能量耦合与转移。功能区域边界变形引发横向折射率周期性扰动, 打破模式简并状态, 使不同模式间满足相位匹配条件($\beta_i - \beta_k = 2\pi q/\Lambda$) (其中 q 为整数, Λ 为等效扰动周期), 实现能量的定向耦合。其关系可表示为:

$$-\frac{\partial A_i}{\partial x} = j \sum_{k \neq i} \kappa_{ik} A_k e^{j(\beta_i - \beta_k)x} \quad (1)$$

其中, A_i 、 A_k 分别为第 i 阶、第 k 阶模式的振幅; β_{ii} 、 β_k 为对应传播常数; κ_{ik} 为模式 i 、 k 间的耦合系数; x 为光传播方向坐标, 边界变形通过精准调控耦合系数 κ_{ik} 的空间分布, 实现目标模式循环耦合路径。

功能区域的边界变形采用伯恩斯坦多项式对最终优化形状所具有的变形进行参数化描述, 其表达式为:

$$\Delta = \sum_{d=1,2} \left[\hat{e}_d \sum_{j=1}^{n-1} \zeta_{d,j} s^j (1-s)^{n-j} \right] \quad (2)$$

其中, $d=1,2$ 对应二维平面内垂直于光传播方向的两个变形维度; $\hat{e}_d$ 为变形方向的单位向量; s 为边界参数(范围 0 到 1); $n=10$ 为多项式阶数; $\zeta_{d,j}$ 为多项式系数, 同时也是逆向设计的核心优化变量, 通过迭代调整可精准控制边界变形形态。初始状态下, 所有 $\zeta_{d,j} = 0$, 功能区域为标准直波导; 优化过程中, 边界变形始终受到双重约束: 最大变形量为 400 nm , 并且功能区域两端边界固定, 确保与输入/输出直波导无缝衔接。

目标函数以输出端口的正向功率通量积分为核心, 通过权重分配实现“增强目标转换通道、抑制非目标串扰通道”的优化目标, 其核心形式为:

$$F(\lambda) = \sum_j \sum_i \omega_{j,i} \int_{A_{j,i}} P_x(\lambda) ds \quad (3)$$

其中, j 代表输入模式, i 代表输出模式; $\omega_{j,i}$ 为各模式转换通道的权重系数, 其中希望功率通量聚集的积分区域(目标模式区域)设置为负值权重, 希望功率通量稀疏的积分区域(非目标模式区域)设置为正值权重;

$A_{j,i}$ 为积分区域; $P_x(\lambda)$ 为功率通量分布。

为优化三模式循环转换的性能均衡性, 采用两步差异化权重优化策略: 第一步统一设置目标模式区域与非目标模式区域的权重系数, 迭代收敛后获得各通道性能基线。发现不同模式转换通道存在性能差异, 部分通道转换效果未达预期; 第二步先提升非目标模式区域的正值权重以制作串扰, 再依据基线对性能较好、次之、最差通道施以不同权重增幅。在此基础上, 根据第一步的性能基线实施差异化调整, 对转换效果较好的通道保持权重不变, 对转换效果次之的通道适度增大权重, 对转换效果最差的通道大幅增大权重。通过对性能短板通道施加更强的优化约束, 同时保持对串扰通道的有效抑制实现各转换通道效率与串扰的均衡提升, 最终达到预期设计目标。

为平衡计算精度与效率, 采用基于有效折射率法的准 3D 分析: 将 340 nm 厚的硅波导等效为二维模型, 设定单晶硅的等效折射率为 3.0 [5] [14]-[16], 该取值通过求解平板波导的本征模方程获得, 与文献 [5] 中相同结构参数下的计算结果一致; 输入/输出端口设置长度 3 μm 的完美匹配层(PML)以抑制反射, 确保目标函数计算的准确性, 为后续优化算法提供可靠的仿真数据支撑。

2.3. 逆向设计算法

逆向设计算法是实现功能区域边界精准优化、达成三模式循环转换目标的核心工具。相较于传统“正向设计”需手动迭代调整结构参数的局限性, 逆向设计从器件目标功能出发, 通过算法探索高维设计空间, 高效筛选出最优结构, 已成为纳米光子器件设计的关键技术路径。

在逆向设计算法方面, 梯度类优化算法因其收敛速度快、优化精度高, 已成为复杂光子器件设计的首选方法[10] [13]-[16] [19] [20], 因此, 本文采用 MMA 梯度基优化算法, 结合伯恩斯坦多项式参数化与差异化权重目标函数, 构建完整的逆向设计流程(流程图如图 3 所示), 具体实现步骤严格遵循“参数配置 - 仿真计算 - 优化迭代 - 收敛判定 - 验证分析”的逻辑展开。

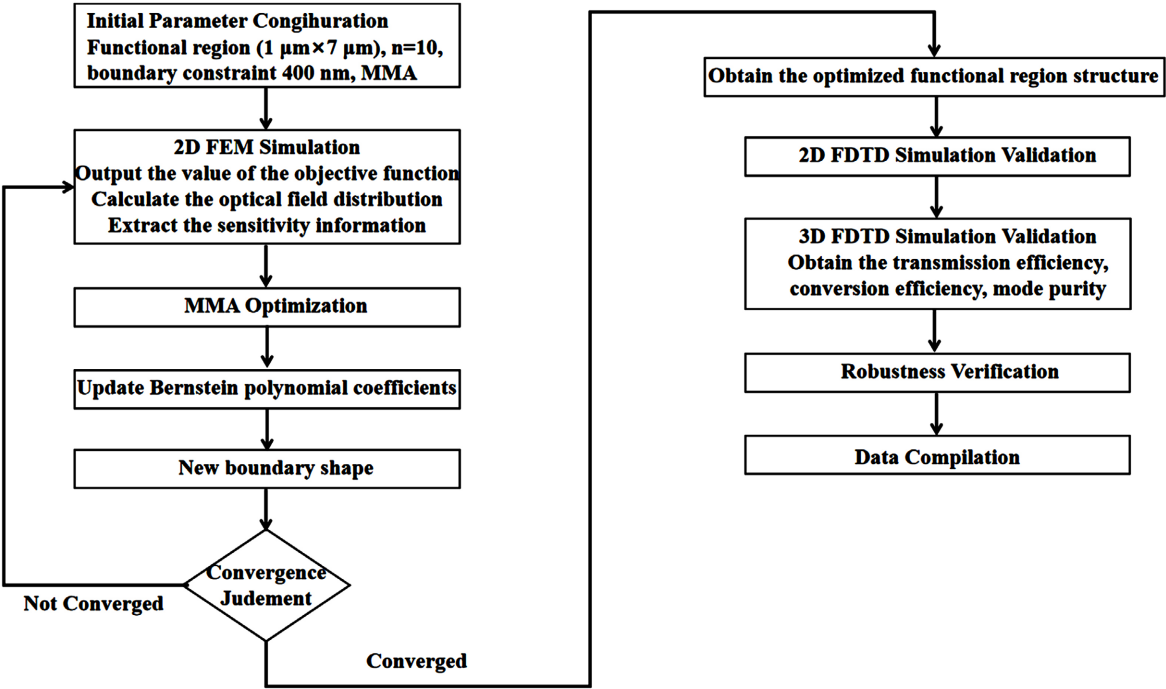


Figure 3. Flow chart of the algorithm
图 3. 算法流程图

1) 算法初始化：明确核心优化变量为伯恩斯坦多项式系数 $\zeta_{d,j}$ ，初始值均设为 0，对应功能区域为标准直波导；设定结构约束条件，即功能区域两端边界固定以避免与输入/输出波导产生不连续性、最大变形量为 400 nm，确保工艺可实现性；同时初始化 MMA 算法的相关迭代参数，保障优化过程稳定收敛；此外，确定伯恩斯坦多项式阶数 $n = 10$ ，平衡变形灵活性与计算复杂度。

2) 通过 COMSOL Multiphysics 软件进行二维有限元(FEM)仿真，分析功能区域的电磁场分布与光学传输特性，计算目标函数值与优化变量的灵敏度信息。仿真过程中采用准 3D 分析方法，将 340 nm 厚的硅波导等效为二维模型，设定单晶硅的等效折射率为 3.0，输入/输出端口设置 3 μm 长的完美匹配层(PML)，计算目标函数值与灵敏度。

3) 将 FEM 仿真得到的目标函数值与灵敏度信息输入 MMA 算法，算法基于梯度信息更新伯恩斯坦多项式系数 $\zeta_{d,j}$ ，进而调整功能区域的边界形态，确保约束条件。

4) 重复“FEM 仿真计算-MMA 优化迭代”的流程，直至目标函数收敛，输出最终优化的多项式系数，确定功能区域的最优边界轮廓。

5) 优化收敛后，首先通过二维时域有限差分(FDTD)方法进行初步验证，快速评估器件的基本转换性能；随后构建绝缘体上硅(SOI)结构的 3D 模型，采用 3D FDTD 方法进行精确仿真验证。从仿真结果中提取转换效率、传输效率及模式纯度三个关键性能指标，三者取值均介于 0 和 1 之间。

6) 为保障器件的实际制备可行性，对优化后的结构进行鲁棒性分析。

7) 整理仿真验证与鲁棒性分析的数据，若性能指标未达设计目标，重新调整权重系数后再次优化迭代，直至器件满足三模式循环转换的高效性、低串扰与高鲁棒性要求。

本研究的核心创新在于将上述流程与两步差异化权重优化策略相结合，具体体现在优化迭代阶段。该流程沿用了硅基模式转换器的经典设计框架，保证了与已有研究的一致性；同时通过差异化权重策略解决了三模式循环转换中各通道性能不均衡的问题，在保证优化精度的同时缩短了设计周期，为紧凑型多模式循环转换器的高效研发提供了可靠支撑。

3. 数值模拟

为验证所设计逆向三模式循环转换器的性能，基于绝缘体上硅(SOI)平台构建三维模型，采用时域有限差分(FDTD)方法进行数值仿真，通过 Lumerical FDTD 软件完成。仿真区域沿 x 、 y 、 z 三个方向均设置完美匹配层(PML)边界条件，PML 层数设为 8 层，距结构边界 0.6 μm 。采用非均匀网格划分策略：全局网格尺寸为 20 nm，对功能区域(7 $\mu\text{m} \times 1.65 \mu\text{m}$)进行局部加密，网格尺寸设为 5 nm。光源采用模式光源(mode source)，从输入波导端口注入，光谱覆盖 1530~1570 nm 波段。仿真收敛判据设为自动关断电平 1×10^{-5} ，确保时域场充分衰减至稳定状态后提取输出端口的模式功率。核心性能指标定义：传输效率(T)定义为输出总功率与输入功率的比值($T = P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$ ，百分比形式)，转换效率(CE)为目标模式输出功率与输入功率的比值($\text{CE} = P_{\text{mode}}/P_{\text{in}}$ ，dB 形式)，模式纯度(Purity)为目标模式输出功率与总输出功率的比值($\text{Purity} = P_{\text{mode}}/P_{\text{out}}$ ，百分比形式)。

该器件的优化过程分为两步，图 4(a)为归一化目标函数的收敛曲线，其中上图是第一步基础优化，下图是第二步差异化权重优化。第一步优化中，目标函数在第 10 次迭代起快速收敛，至第 48 次迭代达到阶段性稳定；以此为初始条件启动第二步优化，目标函数进一步快速下降，在第 24 次迭代(累计 72 次)实现全局收敛。图 4(b)~(d)展示了 2D FEM 仿真得到的 x 方向能流分布，分别对应 TE0-TE2、TE2-TE1、TE1-TE0 三种转换，输入模式经 7 μm 功能区域后被有效压缩与重塑，能量沿设计的循环路径定向转移至目标模式，直观验证了三模式循环转换功能的实现。

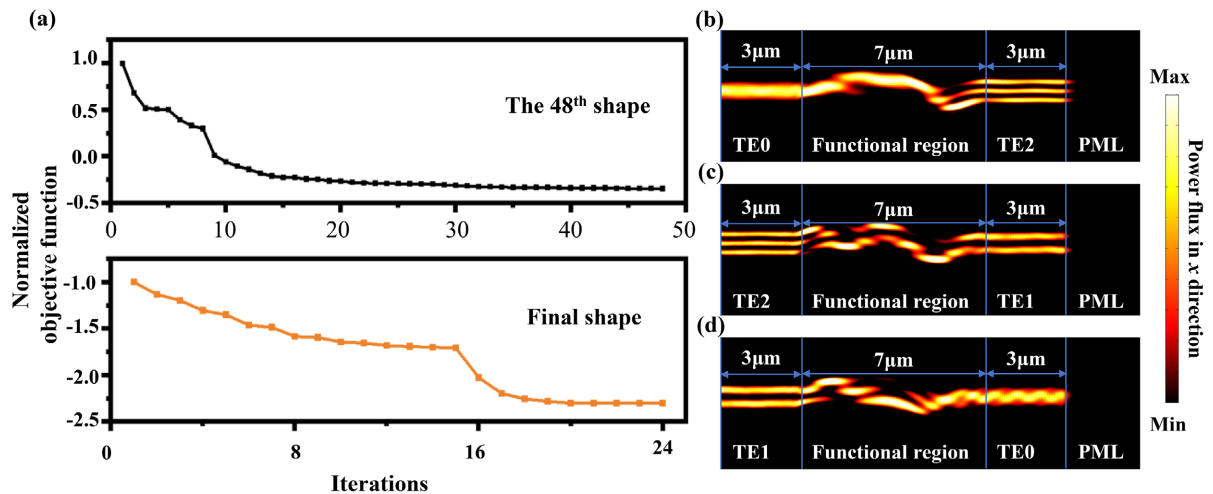


Figure 4. Optimization convergence and FEM simulation results of the inverse-designed triple-mode cyclic converter. (a) Convergence diagram of the inverse-designed triple-mode cyclic converter: Within each optimization stage, the objective function value at each iteration step is normalized by dividing it by the absolute value of the objective function value at the 1st iteration step of the corresponding stage. (b)~(d) Power flux distributions along the x-direction: Power flux distributions of (b) TE0-TE2, (c) TE2-TE1, and (d) TE1-TE0 mode conversions

图 4. 逆向三模式循环转换器的优化收敛特性与有限元法仿真结果。(a) 逆向三模式循环转换器的收敛曲线图：每个优化阶段内，各迭代步的目标函数值均除以该阶段第 1 步的目标函数值(取绝对值)，得到归一化结果。(b)~(d) x 方向功率通量分布：(b) TE0-TE2、(c) TE2-TE1、(d) TE1-TE0 模式转换的功率通量分布

图 5(a)为 3D FDTD 仿真得到的 1550 nm 中心波长处磁场分布，分别对应 TE0-TE2、TE2-TE1、TE1-TE0 三种转换场景，从图中可清晰观察到输入模式在功能区域重塑后在输出波导中形成稳定的目标模式场分布，且传输过程中光场泄漏少，验证了转换功能的有效性及其光场限制效果良好。图 5(b)为 TE0 模式输入时的转换性能：在 1530~1570 nm 波段内，TE0-TE2 转换效率保持在 -0.39 dB 以上；在 1550 nm 处达到 -0.33 dB，对应的传输效率为 94.1%；非目标串全波段低于 -22 dB，1550 nm 处 TE0-TE0 串扰为 -37.7 dB，TE0-TE1 串扰为 -25.3 dB；目标模式转换效率为 92.5%，模式纯度高达 98.3%，展现出高效的主模式转换能力和优异的抗串扰性能。图 5(c)为 TE2 模式输入时的结果：TE2-TE1 在 1530~1570 nm 波段内转换效率最低值为 -1.2 dB，1550 nm 处为 -1.0 dB，对应的传输效率为 81.5%；非目标串全波段低于 -15 dB，1550 nm 处 TE2-TE0 串扰为 -25.4 dB，TE2-TE2 串扰为 -25.2 dB；目标模式转换效率 79.2%，模式纯度达到 97.2%，满足高纯度模式转换的应用需求。图 5(d)为 TE1 模式输入时的结果：TE1-TE0 在 1530~1570 nm 波段内转换效率最低 -0.77 dB；1550 nm 处优化至 -0.57 dB，传输效率为 90.2%；非目标串全波段内低于 -15 dB；1550 nm 处 TE1-TE1 串扰为 -23.4 dB，TE1-TE2 串扰为 -29.2 dB；目标模式转换效率为 87.6%，模式纯度为 97.1%，进一步验证了器件在三种循环转换路径的一致性和可靠性。

为直观呈现本文设计器件的核心性能指标，表 1 汇总了所提逆向三模式循环转换器与已报道的模式循环转换器件在功能、尺寸、插入损耗、转换效率及串扰等关键参数的对比结果。

4. 工艺误差模拟分析

为评估器件的工艺容差性与实际可制造性，采用 3D FDTD 方法模拟 y 方向整体尺寸偏差(膨胀 10 nm、收缩 10 nm)及随机局部结构偏差对器件性能的影响，重点分析转换效率、传输效率及磁场分布变化。

图 6(a)为 TE0 输入时 y 方向膨胀 10 nm、收缩 10 nm 与理想状态下的模式转换效率对比。三种情况下目标通道 TE0-TE2 的转换效率显著高于非目标通道 TE0-TE0 与 TE0-TE1，在 1530~1570 nm 波段内 TE0-TE2 的转换效率稳定在 -0.34 dB 至 -0.41 dB，非目标通道串扰均低于 -15 dB，仅中心波长轻微偏移，

未出现显著劣化。图 6(b)为相应磁场分布及 1550 nm 处的传输效率：三种状态下输出端均形成稳定的 TE2 模式场分布，无明显泄漏，理想状态下传输效率 94.1%，膨胀 10 nm 时 93.6%，收缩 10 nm 时 94.4%，变化幅度不超过 0.8%。

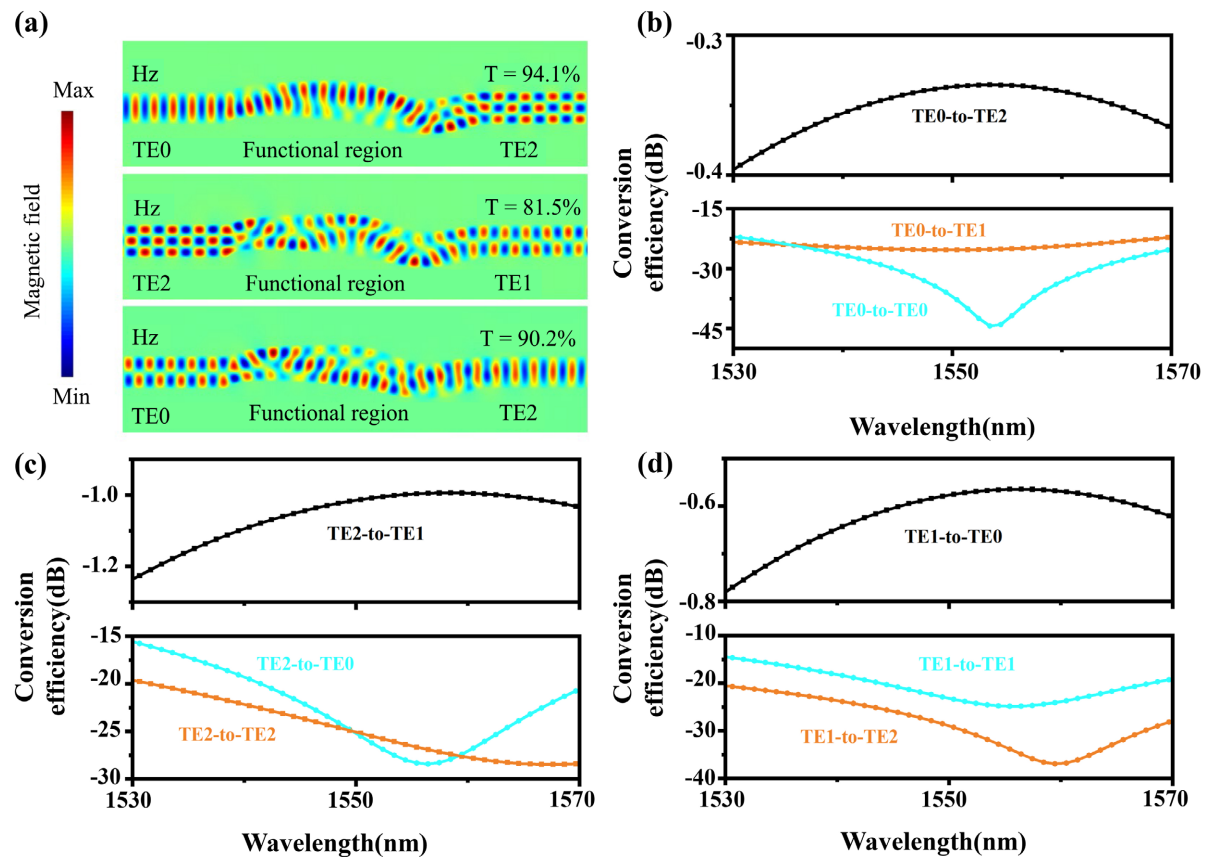


Figure 5. Mode conversion efficiencies and magnetic field distributions in the inverse-designed triple-mode cyclic converter. (a) Magnetic field distributions for TE0-TE2, TE2-TE1, and TE1-TE0 mode conversions. (b)~(d) Conversion efficiencies for different input modes: Conversion efficiencies for (b) TE0 input mode, (c) TE2 input mode, (d) TE1 input mode to all three output modes

图 5. 逆向三模式循环转换器的模式转换效率与磁场分布。(a) TE0-TE2、TE2-TE1 及 TE1-TE0 模式转换的磁场分布。(b)~(d) 不同输入模式对应的转换效率：(b) 输入 TE0 模式、(c) 输入 TE2 模式、(d) 输入 TE1 模式至三种输出模式的转换效率

Table 1. Performance comparison between this work and previously reported mode cyclic converter devices

表 1. 本工作与已报道模式循环转换器件的性能对比

	Functionality	Device Size (μm^2)	Insertion Loss (dB)	Conversion Efficiency (dB)	Crosstalk (dB)
Ref [16]	TE0-to-TE1/TE1-to-TE0 (DMCC)	7.0×1.48	-0.028/-0.017	-0.053/-0.043	$<-31.8/<-31.8$
	TE0-to-TE1/TE1-to-TE2/TE2-to-TE0 (TMCC)	7.0×1.65	-0.51/-0.85/-0.59	-0.67/-1.13/-0.67	$<-15.3/<-13.7/<-20$
This Work	TE0-to-TE2/TE2-to-TE1/TE1-to-TE0	7.0×1.65	-0.26/-0.90/-0.44	-0.34/-1.01/-0.57	$<-22/<-15/<-15$

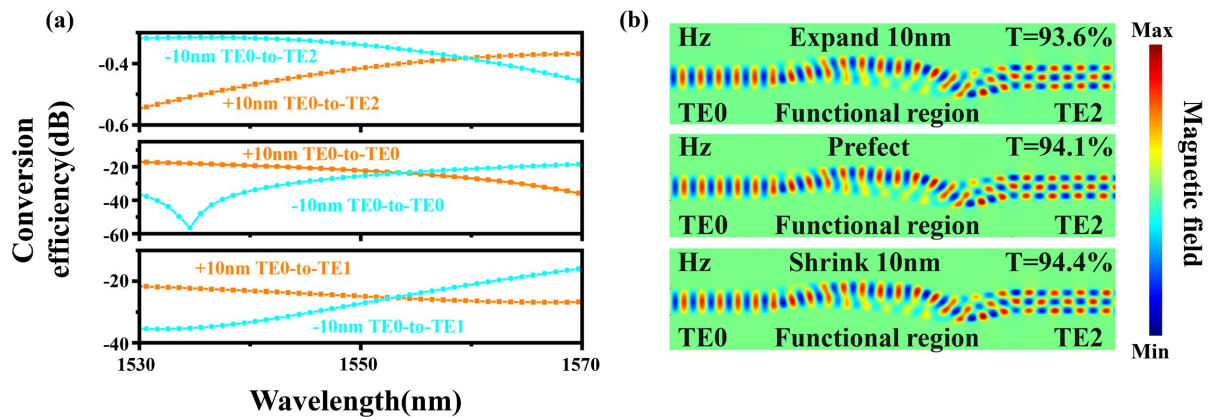


Figure 6. Mode conversion efficiencies of TE0-TE2, TE0-TE0, and TE0-TE1, and magnetic field distribution of TE0-TE2 for the inverse-designed triple-mode cyclic converter under geometric deviations

图 6. 几何偏差下逆向三模式循环转换器的 TE0-TE1、TE0-TE0、TE0-TE2 模式转换效率与 TE0-TE2 磁场分布

图 7(a)为 TE2 输入时的模式转换效率对比结果。TE2-TE1 在三种结构状态下均保持良好的宽带性能，1530~1570 nm 波段内转换效率波动不超过 0.17 dB，1550 nm 处，理想状态为 -1.01 dB，膨胀 10 nm 时为 -1.18 dB，收缩 10 nm 时为 -1.04 dB，非目标通道 TE2-TE0 与 TE2-TE2 的串扰均低于 -15 dB，结构偏差对模式选择性能影响极小。图 7(b)呈现了 TE2-TE1 转换的磁场分布与传输效率。三种结构状态下输入 TE2 模式经功能区域后均能高效转换为 TE1 模式，磁场分布形态高度吻合，1550 nm 处理想状态传输效率为 81.5%，膨胀 10 nm 时为 81.4%，收缩 10 nm 时为 81.2%，数值波动极小。

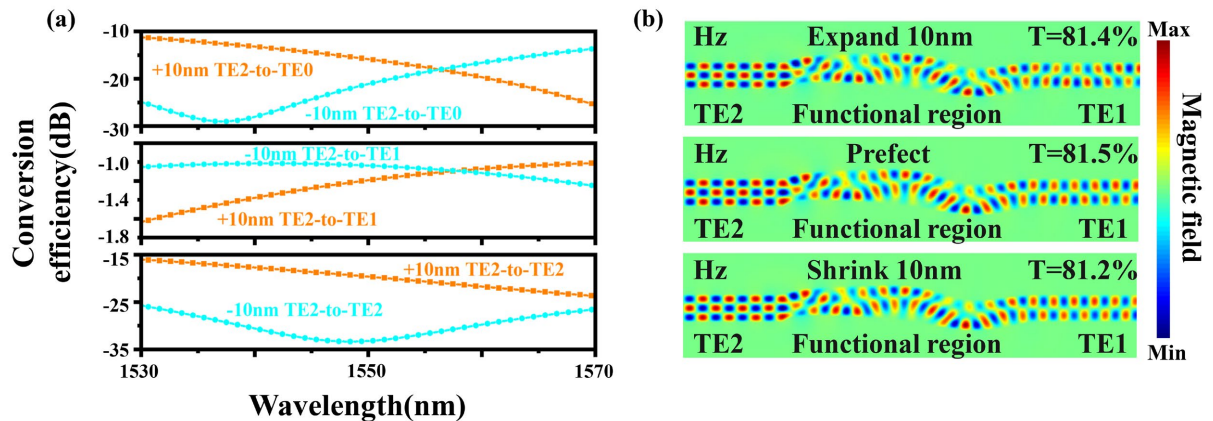


Figure 7. Mode conversion efficiencies of TE2-TE1, TE2-TE0, and TE2-TE2, and magnetic field distribution of TE2-TE1 for the inverse-designed triple-mode cyclic converter under geometric deviations

图 7. 几何偏差下逆向三模式循环转换器的 TE2-TE1、TE2-TE0、TE2-TE2 模式转换效率与 TE2-TE1 磁场分布

图 8(a)为 TE1 输入时的模式转换效率变化。目标转换 TE1-TE0 在 1530 nm~1570 nm 全波段内表现出优异的稳定性，膨胀 10 nm 与收缩 10 nm 时的转换效率与理想状态的 -0.57 dB 相比，最大衰减不超过 0.18 dB，非目标通道串扰始终低于 -18 dB。图 8(b)为 TE1-TE0 转换的磁场分布与传输效率对比。三种情况下光场均能沿设计路径完成模式转换，输出端 TE0 模式场分布规整，1550 nm 处，传输效率分别为理想状态时 90.2%，膨胀 10 nm 时 90.0%，收缩 10 nm 时 90.5%，保持高度稳定。

为更贴近实际制备中的随机误差，进一步模拟了 50%边界位置随机膨胀或收缩 10 nm 的局部偏差场景，三组独立随机样本核心性能指标汇总于表 2。结果显示，三组随机偏差样本的转换效率与传输效率均

与理想状态高度接近：TE0-TE2 的转换效率稳定在-0.34 dB，传输效率保持在 94.1%；TE2-TE1 的转换效率波动不超过 0.01 dB，传输效率维持在 81.3%~81.5%；TE1-TE0 的转换效率介于-0.56 dB 至-0.58 dB 之间。所有随机样本的非目标通道串扰均未超过-15 dB，上述结果表明，该器件对整体尺寸偏差与局部随机工艺误差均具有较强的容错能力。

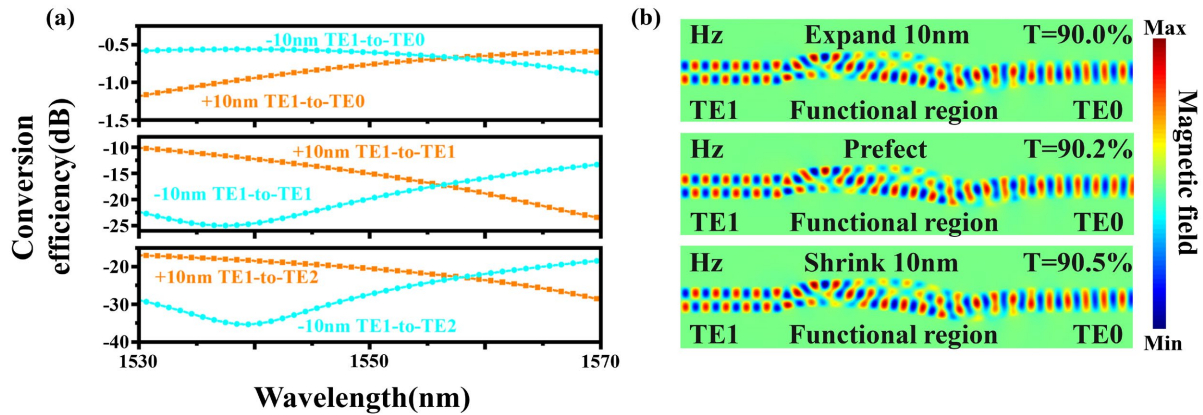


Figure 8. Mode conversion efficiencies of TE1-TE0, TE1-TE1, and TE1-TE2, and magnetic field distribution of TE1-TE0 for the inverse-designed triple-mode cyclic converter under geometric deviations

图 8. 几何偏差下逆向三模式循环转换器的 TE1-TE0、TE1-TE1、TE1-TE2 模式转换效率与 TE1-TE0 磁场分布

Table 2. Mode conversion efficiencies and transmission efficiencies under different structural deviations at 1550 nm wavelength (unit: dB)

表 2. 1550 nm 波长下不同结构偏差的模式转换效率与传输效率(单位: dB)

	TE0-to-TE2 (CE)	TE2-to-TE1 (CE)	TE1-to-TE0 (CE)	TE0-to-TE2 (T)	TE2-to-TE1 (T)	TE1-to-TE0 (T)
Perfect	-0.34	-1.01	-0.57	94.1%	81.5%	90.2%
Expand 10 nm	-0.41	-1.18	-0.75	93.6%	81.4%	90.0%
Shrink 10 nm	-0.34	-1.04	-0.60	94.4%	81.2%	90.5%
Random 50% & Random $\pm 10\text{nm}$ (#1)	-0.34	-1.02	-0.58	94.1%	81.3%	90.2%
Random 50% & Random $\pm 10\text{nm}$ (#2)	-0.34	-1.01	-0.56	94.1%	81.5%	90.4%
Random 50% & Random $\pm 10\text{nm}$ (#3)	-0.34	-1.02	-0.58	94.1%	81.4%	90.3%

经工艺误差模拟分析表明：所设计的逆向三模式循环转换器在 y 方向上 $\pm 10\text{ nm}$ 几何尺寸偏差及局部随机结构偏差下，转换效率、传输效率与磁场分布均无显著劣化，展现出优异的工艺容差性与实际可制造性，为后续器件制备与系统集成提供了可靠保障。

5. 总结

本文针对片上模分复用系统中多模式信号动态路由的需求，基于 SOI 平台设计了一款逆向三模式循环转换器。通过在边界变形逆向设计框架中引入两步差异化权重优化策略，该器件在 $7\text{ }\mu\text{m} \times 1.65\text{ }\mu\text{m}$ 的紧凑尺寸内实现了 TE0-TE2、TE2-TE1、TE1-TE0 三种模式的高效循环转换。仿真结果表明：1550 nm 中心波长处三通道转换效率分别为-0.33 dB、-1.0 dB、-0.57 dB，模式纯度均高于 97%；全通信波段非目标串扰低于-15 dB。工艺容差性分析表明，在 $\pm 10\text{ nm}$ 尺寸偏差及局部随机误差下，器件性能波动小于 0.8%。与已有模式循环转换器相比，本器件无需单元级联即可完成三模式动态调配，显著简化了 MDM 系统结构。

需要指出的是,本研究存在以下局限性:第一,器件设计仅针对横电(TE₀, TE₁, TE₂)模式,未考虑横磁(TM)模式的转换与串扰问题,在实际 MDM 系统中若同时存在 TM 模式传输,可能会引入额外的模式串扰;第二,三通道转换效率仍存在一定的不均衡,TE₂-TE₁ 通道的效率相对偏低,差异化权重策略虽已改善但未完全消除这一差异;第三,本研究基于纯仿真验证,尚未进行流片制备与实验测试。

未来工作可从以下方向展开:一是将设计拓展至 TM 模式,探索偏振不敏感的三模式循环转换方案;二是进一步优化差异化权重策略的权重增幅函数,实现三通道转换效率的完全均衡;三是开展器件的流片制备与实验测试,验证仿真结果的可靠性。此外,所提出的两步差异化权重优化策略具有通用性,可推广至任意多模式逆向设计器件的性能均衡优化,为高密度集成 MDM 系统提供可扩展的设计方法论。

参考文献

- [1] Dai, D. (2018) Advanced Passive Silicon Photonic Devices with Asymmetric Waveguide Structures. *Proceedings of the IEEE*, **106**, 2117-2143. <https://doi.org/10.1109/jproc.2018.2822787>
- [2] Liu, Z., Xia, F., Yan, R., Wang, P. and Jiang, Y. (2025) Multi-Dimensional Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer for WDM-MDM Systems. *Optics Express*, **33**, Article 15532. <https://doi.org/10.1364/oe.555827>
- [3] 潘万乐, 陈鹤鸣, 胡宇宸. 三信道石墨烯电光调制和模分复用集成器件[J]. 光子学报, 2023, 52(2): 258-269.
- [4] 裴丽, 徐文轩, 王建帅, 等. 模式调控及其在模分复用光纤通信中的应用(特邀) [J]. 光学学报, 2025, 45(13): 75-86.
- [5] 吕元帅, 汪成根, 袁伟, 等. 基于相变材料的可重构模式复用光波导开关[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 124-134.
- [6] Yi, X., Li, C., Zhao, W., Zhang, L., Shi, Y. and Dai, D. (2023) On-Chip Mode-Selective Manipulation Based on the Modal-Field Redistribution Assisted with Subwavelength Grating Structures. *Nanophotonics*, **12**, 1809-1821. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2023-0111>
- [7] Liao, J., Huang, D., Lu, Y., Li, Y. and Tian, Y. (2024) Low-Loss and Compact Arbitrary-Order Silicon Mode Converter Based on Hybrid Shape Optimization. *Nanophotonics*, **13**, 4137-4148. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2024-0301>
- [8] Li, Z., Cao, L., Wu, H. and Shen, W. (2017) Sensitivity Analysis for the Weighting Factor in the Least-Square Method for the PWR On-Line Power-Distribution Monitoring. *Annals of Nuclear Energy*, **109**, 675-683. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.06.008>
- [9] Cheng, Z., Wang, J., Yang, Z., Zhu, L., Yang, Y., Huang, Y., *et al.* (2019) Sub-Wavelength Grating Assisted Mode Order Converter on the SOI Substrate. *Optics Express*, **27**, Article 34434. <https://doi.org/10.1364/oe.27.034434>
- [10] An, J., Chen, L., Ye, H., Liu, Y. and Chen, Z. (2024) Digital Metamaterials with Nanoscale Silicon/Sb₂Se₃ Pixels for Reconfigurable Integrated Mode Converters. *Optical Materials*, **148**, Article 114835. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.114835>
- [11] 王琳, 高阳, 石昊, 等. 基于超表面结构的紧凑型铌酸锂波导模式转换器[J]. 光学学报, 2023, 43(16): 322-329.
- [12] Yu, Y., Guo, Z., Zhang, L., Zhang, J., Zhu, M., Wu, S., *et al.* (2025) Compact and Fabrication Tolerant Polarization Insensitive Mode-Order Converter for MDM Systems. *Optics & Laser Technology*, **181**, Article 111780. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111780>
- [13] Li, J., Wang, M. and Ye, H. (2023) Heuristic Inverse Design of Integrated Mode Converter by Directly Reshaping Silicon Waveguide. *Optics & Laser Technology*, **165**, Article 109573. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109573>
- [14] Zhou, M., Lan, M., Chen, L., Ye, H. and Liu, Y. (2024) Reshaping Compact Waveguide Bend for Mode Transmission and Conversion. *Optics Express*, **32**, Article 37758. <https://doi.org/10.1364/oe.538820>
- [15] Luo, X., Ye, H., Zhou, M., Zhang, S., Sun, Y., Wang, X., *et al.* (2023) Inverse Design of Deformed Sb₂Se₃ Stripes in Silicon Waveguide for Reconfigurable Mode Converters. *Optical Materials Express*, **13**, Article 2834. <https://doi.org/10.1364/ome.498883>
- [16] Zhang, S., Ye, H., Chen, L., Li, J., Liu, Y. and Chen, Z. (2024) Integrated Hybrid Mode-Wavelength Demultiplexers Based on Cascaded Digital Metamaterials. *Advanced Photonics Research*, **5**, Article 2300264. <https://doi.org/10.1002/adpr.202300264>
- [17] Yang, S., Jia, H., Niu, J., Fu, X. and Yang, L. (2022) Guided-Mode Based Arbitrary Signal Switching through an Inverse-Designed Ultra-Compact Mode Switching Device. *Optics Express*, **30**, Article 15446. <https://doi.org/10.1364/oe.457842>
- [18] Hu, Z., Liu, S., Lan, M., Wang, Y., Chen, L. and Ye, H. (2026) Inverse Design of Deformed Silicon Waveguides for Multimode Cyclic Conversion. *Optics Express*, **34**, Article 4092. <https://doi.org/10.1364/oe.581899>

-
- [19] Wang, Y., Li, J., Wang, M., Zhang, S., Liu, Y. and Ye, H. (2021) Waveguide-Integrated Digital Metamaterials for Wavelength, Mode and Polarization Demultiplexing. *Optical Materials*, **122**, Article 111770. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111770>
- [20] Ye, H., Wang, Y., Zhang, S., Wang, D., Liu, Y., Wang, M., *et al.* (2021) Topology Design of Digital Metamaterials for Ultra-Compact Integrated Photonic Devices Based on Mode Manipulation. *Nanoscale Advances*, **3**, 4579-4588. <https://doi.org/10.1039/d1na00198a>