

基于自适应直接二进制搜索算法的超紧凑型 8 通道模式-偏振复用器*

马汉斯^{1)†} 林振¹⁾ 何新²⁾ 侯海良¹⁾ 李雪垒¹⁾ 贺龙辉¹⁾
甘龙飞¹⁾ 赵娜¹⁾ 许辉¹⁾ 周灵钧³⁾ 吴加贵⁴⁾ 杨俊波^{2)‡}

1) (湖南工商大学微电子与物理学院, 长沙 410205)

2) (国防科技大学理学院, 长沙 410073)

3) (北京大学电子与计算机工程学院, 深圳 518055)

4) (西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2025 年 8 月 26 日收到; 2025 年 11 月 21 日收到修改稿)

针对模式复用器难以兼容低损耗、小尺寸、多通道的难题, 本文结合数字结构与波导结构, 设计、加工、测试了一种超紧凑 8 通道模式-偏振复用器, 以大幅度提升光互连的集成度和传输容量. 数字结构是由新颖的自适应直接二进制搜索 (adaptive direct binary search, ADBS) 算法优化, 用于 TE_0 , TE_1 , TE_2 和 TE_3 模式的复用和解复用. ADBS 算法通过引入池化算子和变异算子可以自适应地调节局部收敛, 在保障器件小尺寸的前提下, 大幅降低优化时间成本. 波导结构是由非对称定向耦合器 (asymmetrical directional coupler, ADC) 设计, 用于 TM_1 , TM_2 , TM_3 和 TM_4 模式的复用和解复用. ADC 结构通过级联策略, 在数字结构的基础上, 进一步扩展通道数量. 基于现有研究来看, 所设计数字-波导结构有效长度约为 $100\ \mu\text{m}$, 是尺寸最小的 8 通道复用器. 测试结果显示, 在 $1550\ \text{nm}$ 处, 测量的插入损耗和串扰分别小于 $1.2\ \text{dB}$ 和 $-12.5\ \text{dB}$. 同时, 在 $1540\text{--}1560\ \text{nm}$ 波长内, 插入损耗和串扰分别小于 $1.7\ \text{dB}$ 和 $-9.3\ \text{dB}$. 此外, 在 $256\ \text{Gbps}$ ($1\ \text{Gbps} = 125\ \text{MB/s}$) 数据传输实验中, 测试所得眼图呈现出清晰且开放的特征, 直观地反映出该器件具有优异的数据传输能力.

关键词: 8 通道模式-偏振复用器, 自适应直接二进制搜索算法, 非对称定向耦合器

DOI: [10.7498/aps.75.20251154](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251154)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251154](https://cstr.net.cn/32037.14.aps.75.20251154)

1 引言

硅光互连技术已应用于人工智能、物联网和机器学习等前沿领域^[1-3]. 波长复用技术对于满足大容量光互连日益增长的需求起着至关重要的作用^[4]. 为突破波长复用技术单波长的容量限制, 科研领域开展了广泛且深入的探索与实践. 众多科研

力量聚焦于各种多路复用技术的实现, 具体涵盖多芯空分复用技术^[5]、模分复用技术^[6]以及偏振复用技术^[7]. 模分复用技术可以通过多模式光波导内正交本征模来增强单波长容量. 为实现高性能模式复用器的设计目标, 一系列前瞻性的结构设计被提出, 如多模干涉器^[8]、非对称 Y 分支^[9]和非对称定向耦合器 (asymmetrical directional coupler, ADC)^[10]等. 其中, ADC 因其独特的光场调控能

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFF0706005)、国家自然科学基金 (批准号: 62305387, 12305268, 12075014)、国防科技大学基金 (批准号: ZK23-03)、湖南省自然科学基金 (批准号: 2023JJ40683, 2023JJ40223, 2024JJ6184, 2023JJ30195) 和湖南省教育厅科研基金 (批准号: 24B0575, 22B0655, 22A0435) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mahansi2024@163.com

‡ 通信作者. E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn

力, 成为模式复用器设计的重要选择. 在 ADC 相关研究中, Dai 等^[11]设计出一种 10 通道模式-偏振复用器, 在 90 nm 带宽内其插入损耗小于 1.8 dB, 串扰小于 -15 dB; He 等^[12]则提出了一种 16 通道模式复用器, 在 1550 nm 波长处, 其插入损耗小于 6.9 dB, 串扰低于 -10.3 dB. 然而, 随着模式和偏振数量的增多, 基于 ADC 复用器的尺寸会大幅增大. 同时, 设计过程也将变得极为复杂, 因为需要采用一些特殊结构来强化不同模式相位匹配与失配的调控.

近期, 得益于纳米尺度下灵活的折射率调控能力, 逆向设计方法为优化超紧凑、高性能和多功能的纳米光子器件开辟了一条有效途径^[13-15]. Shen 等^[16]采用拓扑优化 (topological optimization, TO) 方法设计了 $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ 的 4 通道模式-偏振复用器, 在 1500—1600 nm 的波长范围内, 插入损耗小于 2 dB, 串扰小于 -16 dB; Qiao 等^[17]利用直接二进制搜索 (direct binary search, DBS) 算法, 优化了 $13.8\ \mu\text{m} \times 2.4\ \mu\text{m}$ 的 6 通道模式-偏振复用器, 在 1500—1600 nm 的波长范围内, 插入损耗小于 1.8 dB, 串扰小于 -14 dB. 然而, 随着模式通道数的增加, 基于逆向设计的模式复用器在高阶模式传输性能上易出现显著下降. 类似 ADC 的波导结构器件, 凭借出色的模式扩展优势, 能够支持多通道的特性, 但器件尺寸、设计难度会随着通道数量的扩展而成倍增加; 逆向设计的数字结构器件, 凭借优化智能、自由度高、人工依赖低等优势, 能够实现小尺寸的特性, 但器件损耗、计算时间会随着优化目标数量的增加而大幅提升. 波导结构器件与数字结构器件各有其独特的优势与不足, 且二者优势互补. 二者相结合是突破低损耗、小尺寸、多通道模式复用器技术瓶颈的重要研究方向之一, 值得被进一步发掘.

本文设计、加工、测试了一种超紧凑 8 通道模式-偏振复用器. 该器件由基于逆向设计的数字结构和基于 ADC 的波导结构共同构成. 数字结构是由新颖的自适应直接二进制搜索 (adaptive direct binary search, ADBS) 算法优化, 用于 TE_0 , TE_1 , TE_2 和 TE_3 模式的复用和解复用. ADBS 算法通过引入池化算子和变异算子可以自适应地调节局部收敛, 在保障器件小尺寸的前提下, 大幅降低优化时间成本. 波导结构是由 ADC 设计, 用于 TM_1 , TM_2 , TM_3 和 TM_4 模式的复用和解复用. ADC 结

构通过级联策略, 在数字结构的基础上, 进一步扩展通道数量. 与传统基于 ADC 的 8 通道模式-偏振复用器相比, 数字-波导结构在保证优异性能的前提下, 尺寸缩减幅度超过 50%. 此外, 这种设计方法简化了整体设计布局, 无需深入考虑复杂的模式耦合问题, 为器件的设计与优化提供了更为便捷的途径.

2 设计与仿真

8 通道模式-偏振复用器设计在绝缘体上硅 (silicon on insulator, SOI) 平台, 其顶硅层厚度为 220 nm, 且覆盖有 SiO_2 包层. 如图 1 所示, 该器件由数字结构和波导结构组成. 在相同的耦合条件下, 由于 TE 模式的有效折射率更高且模场约束更强, 因此其所需的耦合长度比 TM 模式更长. 利用逆向设计方法对 TE 模式复用器进行优化, 可以更有效地减小器件的整体尺寸. 在逆向设计过程中, 数字结构通过 ADBS 算法进行优化, 实现 TE_0 , TE_1 , TE_2 和 TE_3 模式的复用和解复用. 波导结构通过 ADC 结构设计, 实现 TM_1 , TM_2 , TM_3 和 TM_4 模式的复用和解复用. 与基于 ADC 的 8 通道模式-偏振复用器相比, 该器件尺寸缩小了 50% 以上, 这是由于数字结构所占用的空间极小, 几乎可忽略不计. 此外, 随着模式和偏振态数量的增加, 传统复用器的设计过程将变得极为复杂. 例如, TM_0 - TM_1 耦合的 ADC 与 TE_0 - TE_2 耦合的 ADC 之间的相位失配并不大, 这使得不同模式的分离变得困难. 而在所设计结构中, 数字结构和波导结构采用不同的设计方案, 有效避免了相位失配程度小的问题. 因此, 该数字-波导复用器不仅兼具低损耗、小尺寸、多通道的特性, 且设计布局更为简洁.

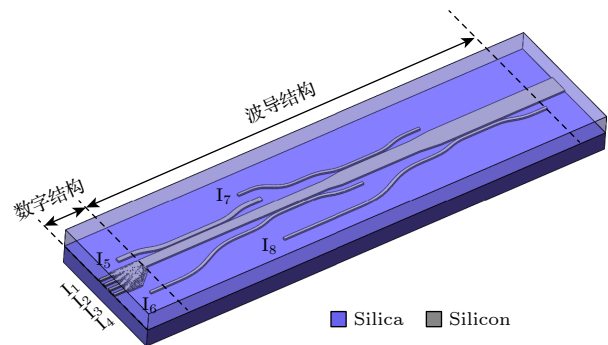


图 1 8 通道模式-偏振复用器示意图

Fig. 1. Schematic of the 8-channel mode-polarization multiplexer.

2.1 基于 ADBS 算法的 TE 模式复用器

DBS 算法由于在特定方向上逐像素搜索的强约束性, 与遍历式搜索相比, 收敛速度更快 [18-20]. 然而, 这种强约束会导致 DBS 算法对初始结构极为敏感, 且容易过早收敛. 针对此问题提出了 ADBS 算法, 通过引入池化算子和变异算子, 自适应地摆脱局部收敛, 并大幅降低时间成本. 算法流程如图 2(a) 所示, 器件设计区域被离散化为若干具有不同材料状态的像素, 如 Si 和 SiO₂. 材料状态分别对应于二进制逻辑中的“0”和“1”状态. 随机挑选一个由 $M \times N$ 个像素组成的池化窗口作为优化起始点, 再从该窗口中随机选取一个或多个像素, 表示该窗口所在的局部结构, 例如在图 2(b) 中, 随机选取一个处于“1”状态 (深灰色区域) 的像素来表示 2×2 池化窗口的局部结构. 随后, 对所选像素进行扰动, 使其状态在“0”和“1”之间切换, 并计算代表器件性能的品质因子 (figure of merit, FOM). 若器件性能得到改善, 则保留该像素状态; 否则, 将像素状态恢复至之前状态. 接下来, 算法计算下一个池化窗口, 移动步长一般等于池化窗口的大小. 另一方面, 当算法搜索的像素数量达到预设值时, 变异算子会随机在全局选取一个或多个像素切

换其状态, 并计算 FOM, 如图 2(c) 深灰色区域所示. 一次迭代过程涵盖对所有池化窗口的搜索操作. 迭代过程持续进行, 直至器件性能不再提升时, 算法终止. 池化算子与变异算子分别对算法的局部和全局搜索能力进行调控. 经验表明, 在算法初期, ADBS 算法通过采用较大尺寸的池化窗口以及较高频率的变异操作, 能够促使算法从低质量的初始结构快速收敛至高质量的中间结构. 在算法后期, 则选择较小尺寸的池化窗口和较低频率的变异操作, 以减少无效的随机优化. 通过上述策略, ADBS 算法得以最大化优化效率, 同时降低时间成本.

在 ADBS 算法优化 TE 模式复用器的过程中, 数值模拟采用有限差分时域算法, 该方法是一种近似求解麦克斯韦方程组的方法, 网格步长设置为 $dx = 20 \text{ nm}$, $dy = 20 \text{ nm}$, $dz = 20 \text{ nm}$. 图 3(a) 展示了基于 Y 分支等效模型设置的初始结构, 由 4 个宽度为 $0.4 \mu\text{m}$ 的输入波导、1 个宽度为 $1.6 \mu\text{m}$ 的输出波导, 以及 1 个设计区域组成, 设计区域采用五边形图案, 各边长度分别为 $4.92 \mu\text{m}$, $2.22 \mu\text{m}$, $3.14 \mu\text{m}$, $2.22 \mu\text{m}$ 和 $4.44 \mu\text{m}$. 输入波导之间的间距为 $0.744 \mu\text{m}$. 设计区域被划分为若干具有 Si 和 SiO₂ 两种材料状态的像素. 每个像素的尺寸为

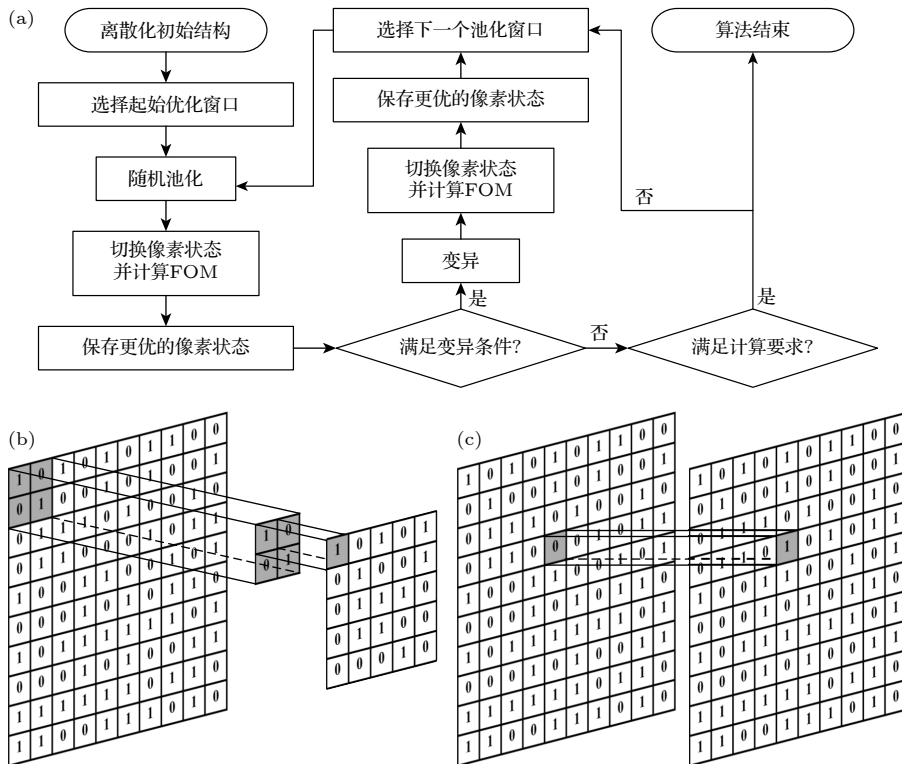


图 2 ADBS 算法 (a) 算法流程; (b) 池化算子; (c) 变异算子

Fig. 2. ADBS algorithm: (a) Flow chart; (b) pooling operator; (c) mutation operator.

120 nm×120 nm, 深度为 220 nm. 硅态意味着像素状态保持不变, 而 SiO₂ 态则表示像素中心填充一个直径为 90 nm, 深度为 220 nm 的 SiO₂ 柱. 在优化初期, 随机选取 2×2 像素池化窗口中的 2 个像素来表示该池化窗口的局部结构. 此外, 每完成 20 次 FOM 评估后触发变异算子. 在优化后期, 池化窗口尺寸被设定为 1×1 像素, 且不再进行变异操作. 通过 ADBS 算法优化, 得到如图 3(b) 所示的最终结构. 图 3(c)–(f) 分别表示 TE₀, TE₁, TE₂ 和 TE₃ 模式的模拟透射光谱, 插图为相应通道中的光传播情况. 在 1550 nm 波长处, TE₀, TE₁, TE₂ 和 TE₃ 模式的模拟插入损耗分别约为 0.5 dB, 0.8 dB, 0.7 dB 和 0.9 dB. 在 1540–1560 nm 波长范围内, 所有模式的模拟串扰均小于 -20.1 dB.

2.2 基于 ADC 结构的 TM 模式复用器

图 4(a) 展示了由 ADC 结构级联而成的 TM 模式复用器. 每个 ADC 由 1 个接入波导和 1 个主干波导组成. 接入波导包含 2 个 Bézier 弯曲波导^[21] 和 1 个直线波导. 弯曲波导的长度为 8 μm, 其

解耦合端与主干波导之间的间距为 1 μm. 相邻的主干波导通过锥型波导相连. 主干波导的起始端与 TE 模式复用器的输出波导宽度相同, 为 1.6 μm. 不过, 鉴于该宽度尺寸较大, 若要实现 TM₀ 模式耦合, 所需的耦合长度过长, 这在实际应用中并不理想. 鉴于此, 放弃 TM₀ 模式的耦合方案, 转而直接实现 TM₁ 模式的耦合. 根据相位匹配条件, TM₀-TM₁ 耦合 ADC 的接入波导宽度为 0.69 μm. 同时, TM₀-TM₂, TM₀-TM₃ 和 TM₀-TM₄ 耦合 ADC 的接入波导选择为 0.4 μm, 以保障 TM₀ 模式的高效传输, 对应的主干波导宽度分别为 1.695, 2.363 和 3.04 μm. 模拟结果显示, 当耦合间距分别为 0.2, 0.3, 0.3 和 0.3 μm 时, 耦合长度分别为 14.2, 5.2, 7.2 和 8.8 μm. 图 4(b)–(e) 分别展示了 TM₁, TM₂, TM₃ 和 TM₄ 模式的模拟透射光谱, 插图为相应通道中的光传播情况. 如图 4 所示, 在 1550 nm 波长处, TM₁, TM₂, TM₃ 和 TM₄ 模式的模拟插入损耗分别约为 0.1 dB, 0.2 dB, 0.2 dB 和 0.3 dB. 在 1540–1560 nm 波长范围内, 所有模式的串扰均小于 -14.8 dB.

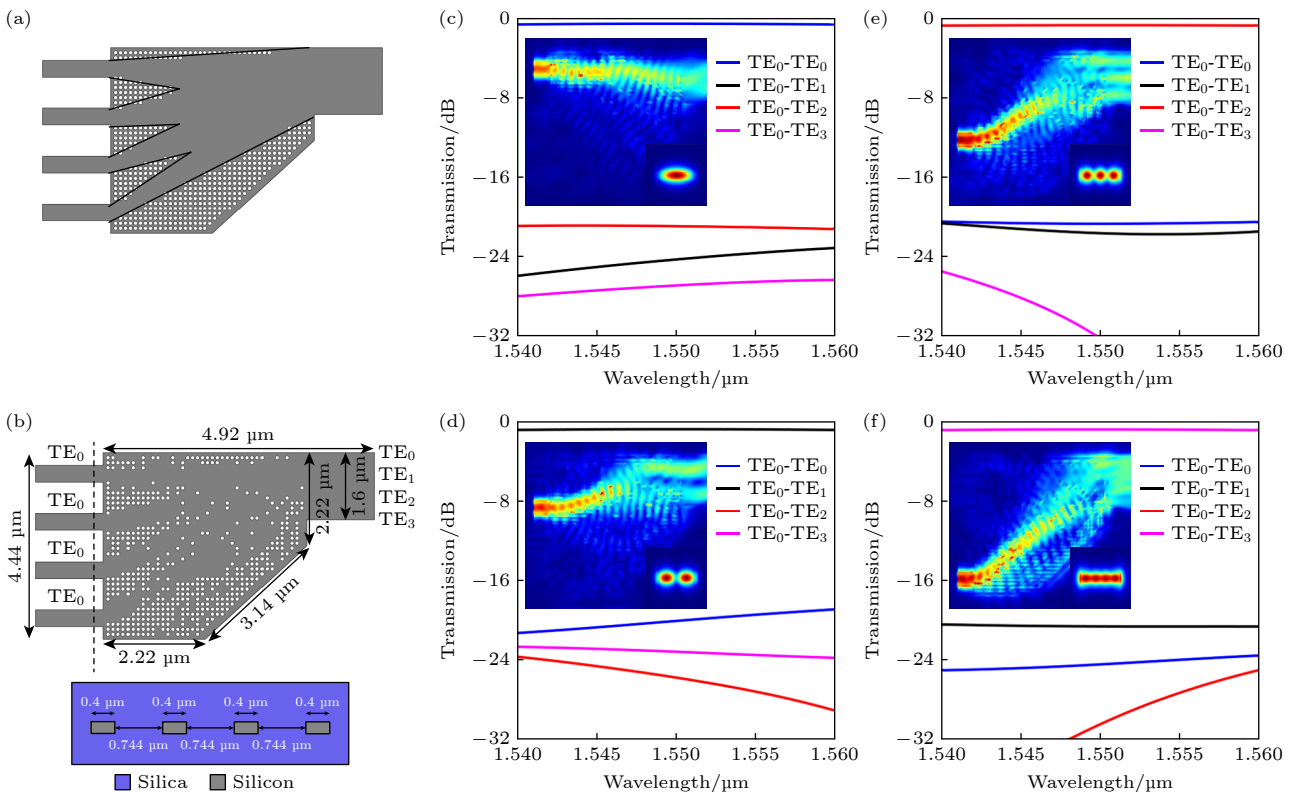


图 3 TE 模式复用器仿真结果 (a) 初始结构的俯视图; (b) 最终结构的俯视图; (c)–(f) TE₀, TE₁, TE₂ 和 TE₃ 模式的模拟透射光谱, 插图为相应通道中的光传播情况

Fig. 3. Simulated results of the TE-polarization multiplexer: (a) Top view of the initial structure; (b) top view of the final structure; (c)–(f) simulated transmission spectra for the TE₀, TE₁, TE₂, and TE₃ modes, insets represent simulated light propagations in corresponding channels.

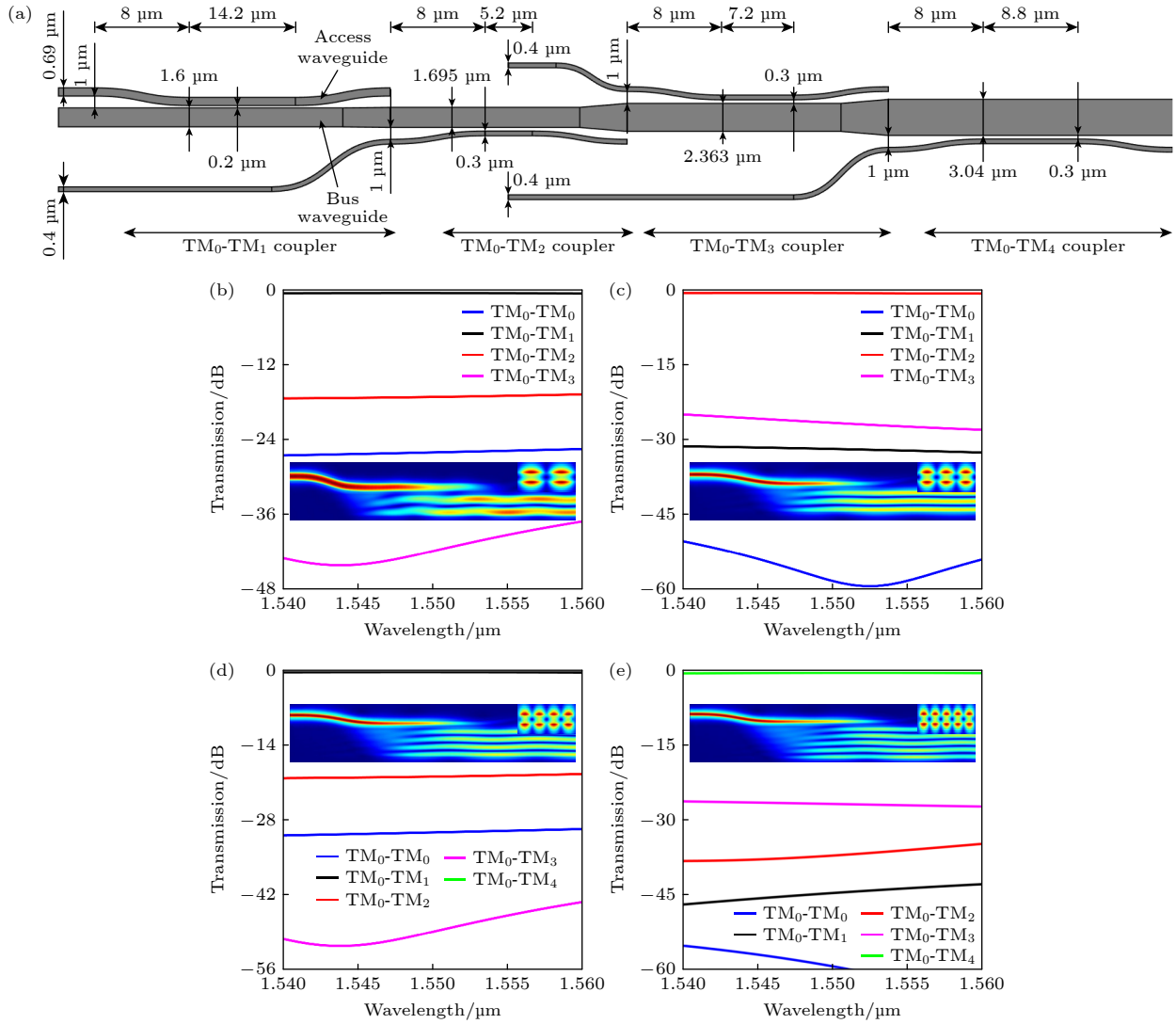


图 4 TM 模式复用器仿真结果 (a) 最终结构的俯视图; (b)–(e) TM_1 , TM_2 , TM_3 和 TM_4 模式的模拟透射光谱, 插图为相应通道中的光传播情况

Fig. 4. Simulated results of the TM-mode multiplexer: (a) Top view of the final structure; (b)–(e) simulated transmission spectra for the TM_1 , TM_2 , TM_3 , and TM_4 modes, insets represent simulated light propagations in corresponding channels.

3 制备与测试

在 SOI 晶圆上, 完成了 8 通道模式-偏振复用器的制备. 在制备过程中, 采用电子束光刻技术定义器件和光栅耦合器的图案; 随后, 利用电感耦合等离子体刻蚀机将图案转移到顶硅层; 最后, 通过等离子体增强化学气相沉积技术在器件上沉积 $1\ \mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 上包层. 图 5(a) 展示了所制备光子集成电路的显微镜图像, 该光路由 1 个 8 通道模式复用器、宽度为 $3.04\ \mu\text{m}$ 的主干波导和 1 个 8 通道模式解复用器组成. 为实现光纤到芯片的有效耦合, 在输入和输出端口分别集成了 TE 和 TM 光栅耦合器^[22]. 图 5(b) 展示了用于 TE_0 , TE_1 , TE_2

和 TE_3 模式复用器的扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 图像. 图 5(c)–(f) 分别展示了用于 TM_0 - TM_1 , TM_0 - TM_2 , TM_0 - TM_3 和 TM_0 - TM_4 耦合 ADC 结构的 SEM 图像. 可以看出, 与传统基于 ADC 结构的 8 通道模式-偏振复用器相比, 所设计器件的尺寸减小了 50% 以上, 这主要是因为逆向设计的 TE 模式复用器尺寸极小, 进而使整个器件的尺寸得以大幅缩减.

光纤耦合测试平台示意图如图 6(a) 所示, 包括可调谐激光器 (tunable laser, TL)、偏振控制器 (polarization controller, PC)、耦合台以及光谱分析仪 (optical spectrum analyzer, OSA). 当光从 I_1 – I_8 端口注入时, TE_0 , TE_1 , TE_2 , TE_3 , TM_1 ,

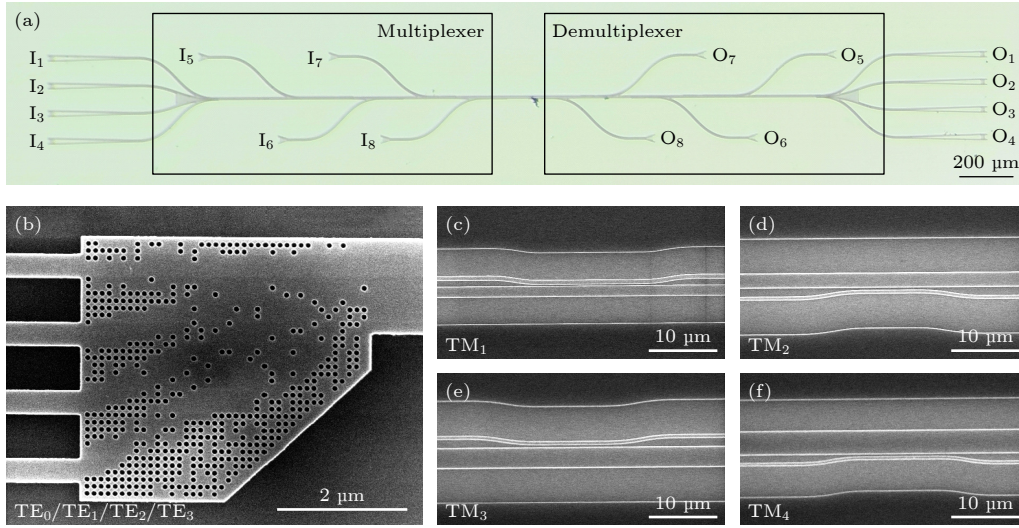


图 5 8 通道模式-偏振复用器的制备 (a) 集成光路的显微镜图片; (b) TE_0 , TE_1 , TE_2 和 TE_3 模式复用器的放大 SEM 图像; (c)–(f) TM_0 - TM_1 , TM_0 - TM_2 , TM_0 - TM_3 和 TM_0 - TM_4 耦合 ADC 结构的放大 SEM 图像

Fig. 5. Fabrications of the 8-channel mode-polarization multiplexer: (a) Microscope image of the fabricated integrated circuit; (b) detailed SEM image of the mode multiplexer for the TE_0 , TE_1 , TE_2 , and TE_3 modes; (c)–(f) detailed SEM images of the ADCs for the TM_0 - TM_1 , TM_0 - TM_2 , TM_0 - TM_3 and TM_0 - TM_4 modes.

TM_2 , TM_3 和 TM_4 模式分别在主干波导中被激发, 并在 O_1 — O_8 端口被测量. 利用同一芯片上的 TE 和 TM 光栅耦合器对测量的光谱响应进行归一化处理, 得到的透射光谱如图 6(b)–(i) 所示. 在 1550 nm 波长处, TE_0 , TE_1 , TE_2 , TE_3 , TM_1 , TM_2 , TM_3 和 TM_4 模式的测试插入损耗分别约为 0.8 dB, 1.0 dB, 0.8 dB, 1.2 dB, 0.8 dB, 0.7 dB, 0.6 dB 和 0.7 dB, 测量串扰分别约为 -12.9 dB, -12.8 dB, -12.9 dB, -13.8 dB, -12.5 dB, -16.9 dB, -16.2 dB 和 -15.8 dB. 测试结果和模拟结果的差异, 主要由散射损耗和制备误差引起. 此外, 性能曲线存在一些波动, 特别是在串扰曲线中较为明显, 主要是由于光谱分析仪的检测灵敏度和光栅耦合器带宽限制所致. 尽管如此, 在 1540—1560 nm 波长范围内, 测试的插入损耗和串扰分别小于 1.7 dB 和低于 -9.3 dB.

8 通道模式-偏振复用器的数据传输性能通过如图 7(a) 所示的测试平台进行评估. 光束先经过 PC, 随后由任意波形发生器 (arbitrary waveform generator, AWG) 生成长度为 $2^9 - 1$ 的 256 Gbps (128 Gbaud PAM4) (1 Gbps = 125 MB/s) 伪随机二进制序列进行调制. AWG 生成的基带信号通过一个滚降因子为 0.5 的根升余弦滤波器进行数字整形. 调制的信号由掺铒光纤放大器 (erbium-doped fiber amplifier, EDFA) 进行放大, 并通过光栅耦合器耦合进出 8 通道偏振-模复用器. 输出

信号再次由 EDFA 放大后, 被发送到数字通信分析仪 (digital communication analyzer, DCA) 中, 以捕获眼图. 在测试过程中选择波长为 1550 nm 的光信号. 图 7(b) 展示了源调制信号在进入目标器件之前所测量的眼图. 当数据从 I_1 — I_8 端口输入时, 在 O_1 — O_8 端口观测到清晰且开放的眼图, 如图 7(c)–(j) 所示. 信号质量通过发射机色散眼图闭合四进制值 (transmitter dispersion eye closure quaternary, TDECQ) 来表征, 如图 7(k) 所示, 在目标符号错误率 (symbol error rate, SER) 为 5×10^{-3} 的情况下, 所有测量通道的 TDECQ 值均低于 3 dB, 且变化范围控制在 0.3 dB 以内, 这表明各通道具有高度的一致性.

4 讨论

为分析 ADBS 算法的优势, 分别采用 ADBS 算法和 DBS 算法, 优化尺寸和功能相同的 TE 模式复用器. 基于相同的随机初始结构, 优化得到的最终结构如图 8(a), (b) 所示. 图 8(c) 展示了 FOM 的收敛过程, 与 DBS 算法 (蓝色曲线) 相比, 由于引入了池化算子和变异算子, ADBS 算法 (黑色曲线) 能够自适应地跳出局部收敛, 并快速收敛到一个优异的结果. 此外, 与随机初始结构 (黑色曲线) 相比, 在图 3(a) 中, 手动设置的初始结构进一步促进了 ADBS 算法的优化 (红色曲线). 在优化过程

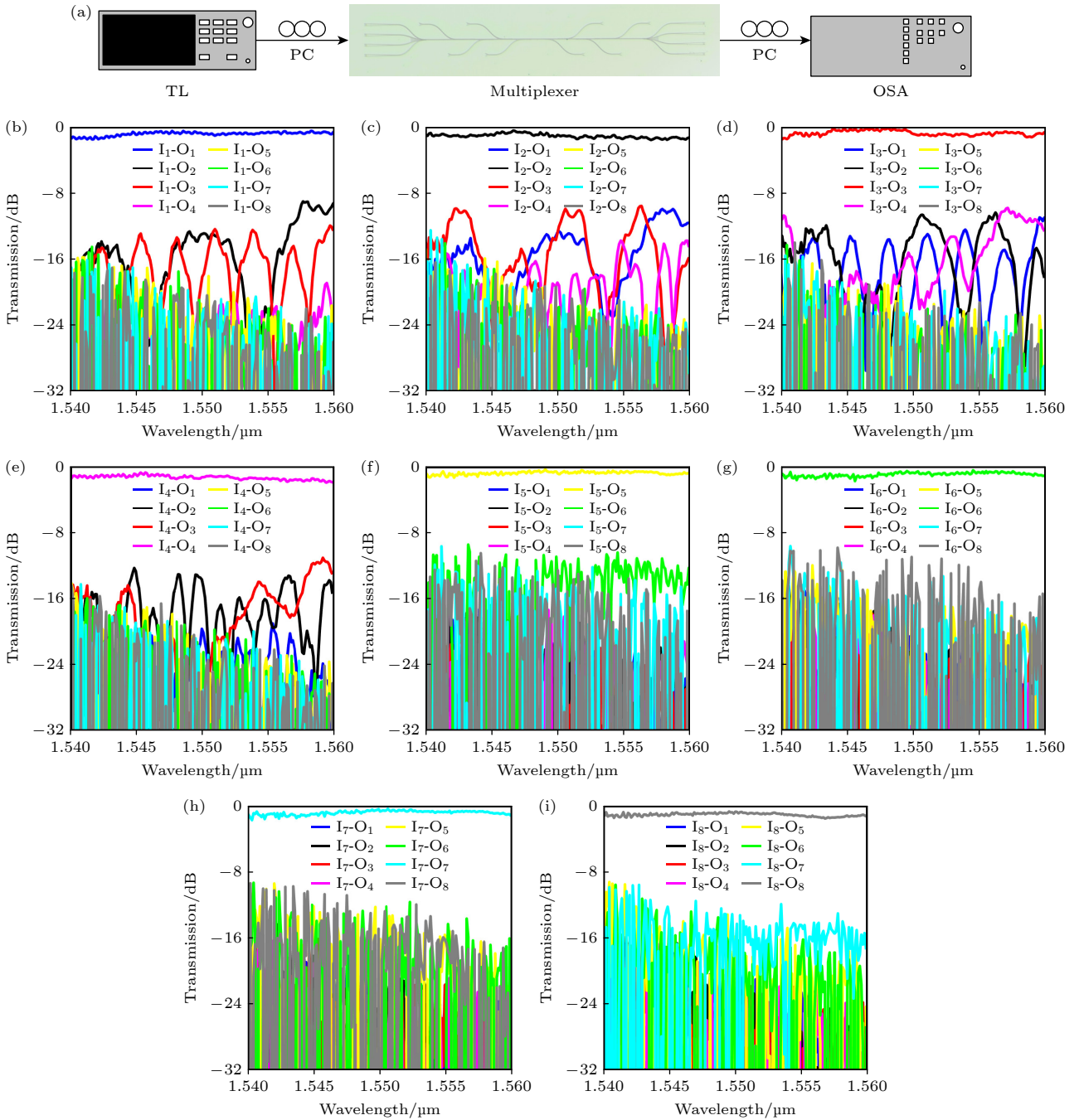


图 6 8 通道模式-偏振复用器的透射光谱测试 (a) 测试透射光谱的实验平台; (b)–(i) TE_0 , TE_1 , TE_2 , TE_3 , TM_1 , TM_2 , TM_3 和 TM_4 模式的归一化透射光谱

Fig. 6. Measured transmission spectra of the 8-channel mode-polarization multiplexer: (a) Experimental setup for measuring transmission spectra; (b)–(i) normalized measured transmission spectra for the TE_0 , TE_1 , TE_2 , TE_3 , TM_1 , TM_2 , TM_3 , and TM_4 modes.

中, ADBS 算法不仅起始点更高, 而且能迅速获得更优的器件性能. 因此, ADBS 算法能够自适应地跳出局部收敛, 并大幅降低时间成本.

表 1 总结了基于逆向设计和基于 ADC 的硅基模式复用器. 在第 2 行—第 4 行中, 基于逆向设计的模式复用器具有超紧凑的尺寸, 但随着模式数量的增加, 高阶模式的损耗会急剧增大 [16,17,23]. 在

第 5 行—第 7 行中, 基于 ADC 的模式复用器性能优异, 但随着模式数量的增加, 尺寸会显著增大 [11,12,24]. 需要指出的是, 为便于比较, 仅粗略评估了 ADC 结构本身的长度, 不包括锥型波导和连接波导的长度. 与基于 ADC 的 8 通道模式-偏振复用器相比, 所设计器件通过结合数字结构和波导结构, 在保证优异性能的同时, 尺寸减小了 50% 以上. 器件

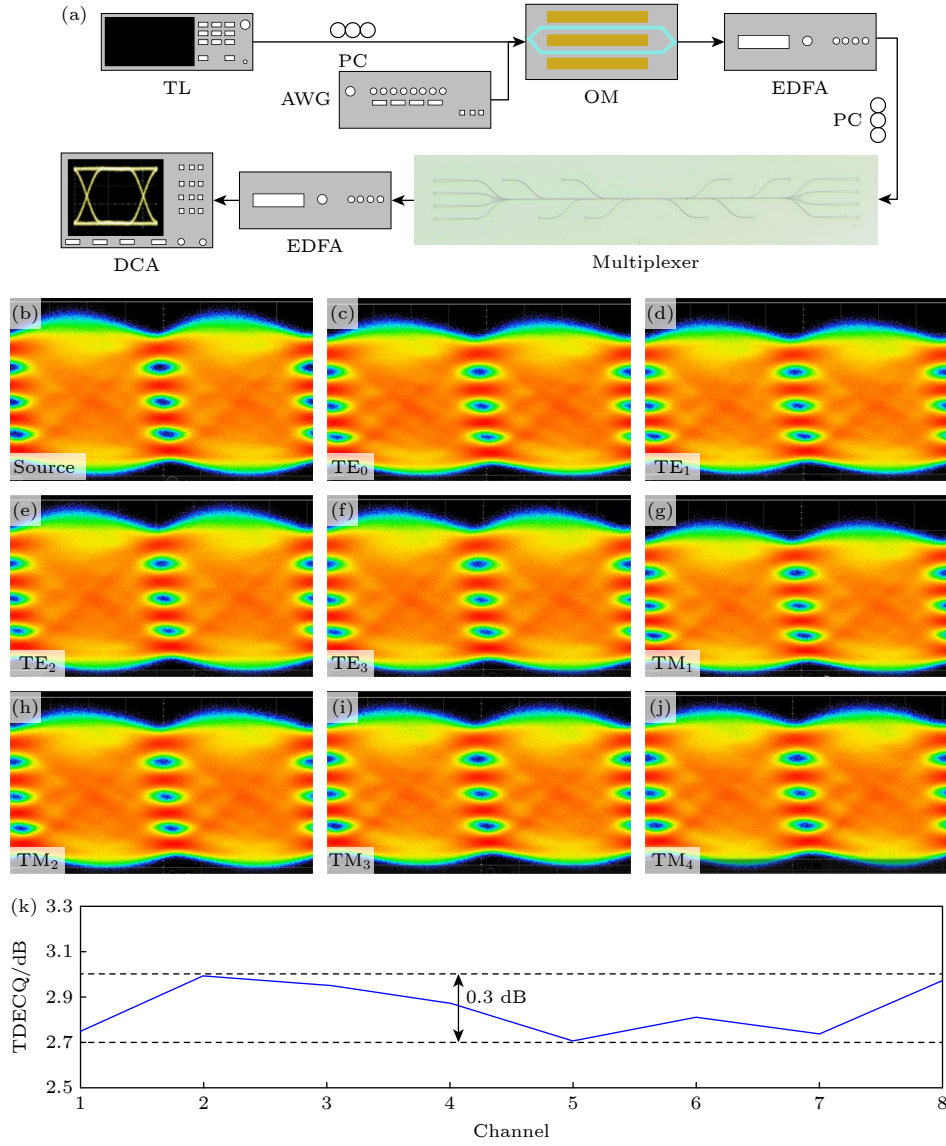


图 7 8 通道模式-偏振复用器的眼图测试 (a) 高速数据通信的实验平台; (b) 源调制信号的实测眼图; (c)–(j) 数据调制速率为 256 Gbps 时, TE_0 , TE_1 , TE_2 , TE_3 , TM_1 , TM_2 , TM_3 和 TM_4 模式的实测眼图; (k) 在 5×10^{-3} 目标 SER 下测量的 TDECQ 值

Fig. 7. Measured eye diagrams of the 8-channel mode-polarization multiplexer: (a) Experimental setup of the high-speed data communication; (b) measured eye diagram of the source modulated signal; (c)–(j) measured eye diagrams for the TE_0 , TE_1 , TE_2 , TE_3 , TM_1 , TM_2 , TM_3 , and TM_4 modes with a data modulation rate of 256 Gbps; (k) measured TDECQ values under a target SER of 5×10^{-3} .

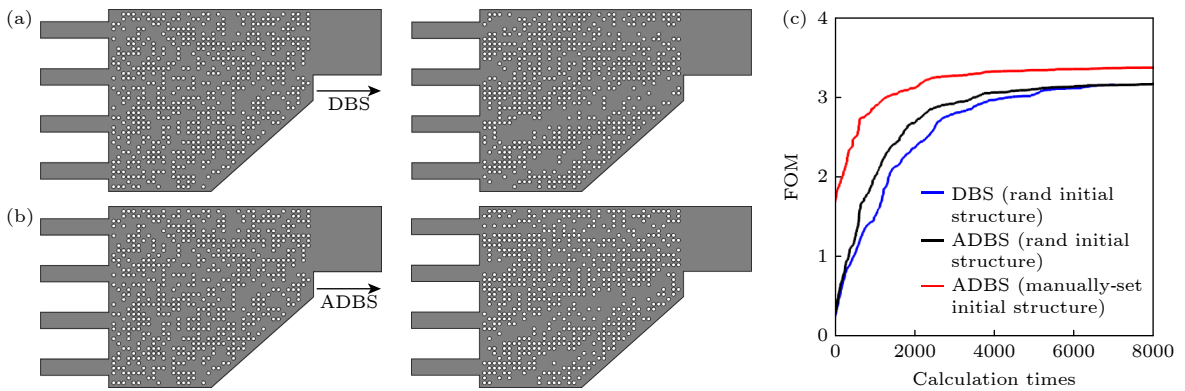


图 8 不同算法的比较 (a), (b) 随机初始结构对应的最终结构; (c) FOM 收敛过程

Fig. 8. Different-algorithm comparisons: (a), (b) Random initial structure and corresponding final structures; (c) FOM convergence processes.

表 1 模式复用器的性能比较
Table 1. Performance comparisons of reported mode multiplexers.

| Structure | Mode number | Length/ μm | Measured IL/dB | Measured CT/dB | Bandwidth/nm |
|-------------------------|-------------|-----------------------|----------------|----------------|--------------|
| DBS ^[23] | 4 (TE) | ~ 6 | < 1.5 | < -14.6 | 1510—1570 |
| TO ^[16] | 4 (TE/TM) | ~ 6 | < 2.0 | < -16 | 1500—1600 |
| DBS ^[17] | 6 (TE/TM) | ~ 13.8 | < 1.8 | < -14 | 1500—1600 |
| ADC ^[24] | 4 (TM) | ~ 100 | < 1.0 | < -23 | 1540—1560 |
| ADC ^[11] | 10 (TE/TM) | ~ 500 | < 1.8 | < -15 | 1530—1565 |
| SWG-ADC ^[12] | 16 (TE) | ~ 1000 | < 6.9 | < -10.3 | 1550 |
| This work | 8 (TE/TM) | ~ 100 | < 1.7 | < -9.3 | 1540—1560 |

有效长度约为 100 μm , 是目前尺寸最小的 8 通道模式-偏振复用器. 更重要的是, 在下一步工作中, 所设计器件的波导结构部分能够采用锥型波导^[25]、亚波长光栅 (subwavelength grating, SWG)^[12]、逆向设计^[26] 等方案, 进一步完善其加工鲁棒性、工作带宽和器件尺寸等指标.

5 结 论

针对模式复用器难以兼容低损耗、小尺寸、多通道的难题, 本文结合数字结构与波导结构, 设计、加工、测试了一种超紧凑 8 通道模式-偏振复用器, 以大幅度提升光互连的传输容量. 其中, 数字结构是由新颖的 ADBS 算法优化, 用于 TE_0 , TE_1 , TE_2 和 TE_3 模式的复用和解复用; 波导结构是由 ADC 设计, 用于 TM_1 , TM_2 , TM_3 和 TM_4 模式的复用和解复用. 该器件有效长度约为 100 μm , 是目前尺寸最小的 8 通道模式-偏振复用器. 该器件制备在顶层硅厚度为 220 nm, 上包层 SiO_2 厚度为 1 μm 的 SOI 晶圆上. 在 1550 nm 波长处, 测试插入损耗和串扰分别小于 1.2 dB 和低于 -12.5 dB. 同时, 在 1540—1560 nm 波长范围内, 测试插入损耗和串扰分别小于 1.7 dB 和低于 -9.3 dB. 在传输 256 Gbps 信号时获得了清晰且开放的眼图, 验证了该器件具有稳定的高速数据传输能力.

参考文献

[1] Yang Y L, Wu Y, Hou M Z, Luo J S, Xie X L 2023 *Neural Process. Lett.* **55** 7135
 [2] Zhang J W, Bhuiyan M Z A, Yang X, Wang T, Xu X S, Hayajneh T, Khan F 2021 *IEEE Internet Things* **9** 22184
 [3] Li C, He A L, Wen Y H, Liu G, Chronopoulos A T 2023 *IEEE Serv. Comput.* **16** 3550
 [4] Zhao Y T, Xiang J L, He Y, Yin Y C, He A, Zhang Y, Yang

Z Y, Guo X H, Su Y K 2022 *Laser Photonics Rev.* **16** 2200005
 [5] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E 2013 *Nat. Photonics* **7** 354
 [6] Sun A L, Xing S Z, Deng X Y, et al. 2025 *Nat. Commun.* **16** 2372
 [7] Zhang Y D, Liu G, Dai X Y, Zhang Y M, Hong W, Lu Q Y, Huang L R, Guo W H 2025 *Opt. Express* **33** 6455
 [8] Atri A, Zarifkar A 2025 *Opt. Commun.* **581** 131620
 [9] Li H T, Deng J, Feng J B, Zhao L H, Shen Z H, Xia G Q, Wu Z M, Wu J G, Yang J B 2025 *Chin. Opt. Lett.* **23** 022201
 [10] Ling Q L, Dong P H, Chu Y Y, Dong X W, Chen J Y, Dai D X, Shi Y C 2023 *Chip* **2** 100061
 [11] Dai D X, Li C L, Wang S P, Wu H, Shi Y C, Wu Z H, Gao S M, Dai T G, Yu H, Tsang H K 2018 *Laser Photonics Rev.* **12** 1700109
 [12] He Y, Li X F, Zhang Y, et al. 2023 *Adv. Photonics* **5** 111
 [13] Ma H S, Du T, Jiang X P, Zhang Z J, He X, Chen H, Yu Y, Zhang Z F, Han Y X, Yang J B, Peng Y X 2025 *Photonic Sensors* **15** 250225
 [14] Huang J, Ma H S, Chen D B, Yuan H, Zhang J P, Li Z K, Han J M, Wu J G, Yang J B 2021 *Nanophotonics* **10** 1011
 [15] Jiang X P, Yuan H, Chen D B, Zhang Z J, Du T, Ma H S, Yang J B 2021 *Adv. Opt. Mater.* **9** 2100575
 [16] Shen R Y, Hu F C, Hong B Z, Wang X, Sun A L, Zhang J W, Zhao H B, Chi N, Chu W, Cai H W, Huang W P 2024 *Photonics Res.* **12** 2891
 [17] Qiao X, Li Y H, Liu Y J, Zang Z G, Xu K 2025 *ACS Photonics* **12** 3256
 [18] Shen B, Wang P, Polson R, Menon R 2015 *Nat. Photonics* **9** 378
 [19] Ma H S, Yang J B, Zhang Z J, Huang J, Zhang K W 2021 *Results Phys.* **26** 104384
 [20] Chang W J, Lu L L Z, Ren X S, Li D Y, Pan Z P, Cheng M F, Liu D M, Zhang M M 2018 *Photonics Res.* **6** 660
 [21] Ma H S, Luo M Y, He J, Du T, Zhang Z J, Jiang X P, He X, Fang L, Yang J B 2022 *J. Lightwave Technol.* **40** 7869
 [22] Liu Y J, Wang Z, Liu Y L, Wang X, Guo X Y, Li D L, Yao Y, Song Q H, Du J B, He Z Y, Xu K 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 5925
 [23] Xie H C, Liu Y J, Wang S, Wang Y J, Yao Y, Song Q H, Du J B, He Z Y, Xu K 2020 *IEEE Photonic. Tech. L.* **32** 169
 [24] Dai D X, Wang J, Shi Y C 2013 *Opt. Lett.* **38** 1422
 [25] Yi Q Y, Yan Z W, Xing S Z, Cheng G L, Sun A L, Deng X Y, Zheng Z, Zhang J W, Chi N, Shen L 2024 *J. Lightwave Technol.* **42** 8840
 [26] Chen W W, Lin J, Li H X, Wang P J, Dai S X, Liu Y X, Yao R K, Li J, Fu Q, Dai T G, Yang J Y 2022 *Opt. Express* **30** 46236

Ultra-compact 8-channel mode-polarization multiplexer via adaptive direct binary search algorithm^{*}

MA Hansi^{1)†} LIN Zhen¹⁾ HE Xin²⁾ HOU Hailiang¹⁾ LI Xuelei¹⁾
 HE Longhui¹⁾ GAN Longfei¹⁾ ZHAO Na¹⁾ XU Hui¹⁾
 ZHOU Lingjun³⁾ WU Jiagui⁴⁾ YANG Junbo^{2)‡}

1) (*School of Microelectronics and Physics, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China*)

2) (*Department of Physics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

3) (*School of Electronic and Computer Engineering, Peking University, Shenzhen 518055, China*)

4) (*College of Artificial Intelligence, Southwest University, Chongqing 400715, China*)

(Received 26 August 2025; revised manuscript received 21 November 2025)

Abstract

Mode division multiplexing technology can augment the single-wavelength capacity via orthogonal eigenmodes within a multi-mode optical waveguide. In order to achieve the low-loss, small-size, multi-channel mode multiplexers, an 8-channel mode-polarization multiplexer consisting of digital structures and waveguide structures is designed, fabricated, and measured to improve the integration and transmission capacity of optical interconnects. The digital structure optimized by a novel adaptive direct binary search (ADBS) algorithm works for the TE_0 , TE_1 , TE_2 , and TE_3 modes. The ADBS algorithm can adaptively escape local convergences and greatly reduce time costs because of the introductions of the pooling operator and mutation operator. The waveguide structure designed by the cascaded asymmetrical directional couplers (ADCs) works for the TM_1 , TM_2 , TM_3 , and TM_4 modes. The ADC structure further expands the number of channels based on the digital structure through a cascade strategy. To the best of our knowledge, the digital-waveguide structure with an effective length of about 100 μm is the smallest 8-channel mode-polarization multiplexer. The device is fabricated on an SOI wafer with a 220 nm-thick top silicon layer and a 1 μm -thick silica cladding. The measured insertion losses (ILs) and crosstalks (CTs) are less than 1.2 dB and lower than -12.5 dB at 1550 nm, respectively. At the same time, the measured ILs and CTs are less than 1.7 dB and lower than -9.3 dB from 1540 nm to 1560 nm, respectively. In addition, clear and open eye diagrams are obtained during the transmission of 256 Gbps signals, verifying the stable and high-speed data transmission capability.

Keywords: 8-channel mode-polarization multiplexer, adaptive direct binary search algorithm, asymmetrical directional couplers

DOI: [10.7498/aps.75.20251154](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251154)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251154](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251154)

^{*} Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFF0706005), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62305387, 12305268, 12075014), the Foundation of National University of Defense Technology, China (Grant No. ZK23-03), the Natural Science Foundation of Hunan Province, China (Grant Nos. 2023JJ40683, 2023JJ40223, 2024JJ6184, 2023JJ30195), and the Scientific Research Foundation of Hunan Provincial Education Department, China (Grant Nos. 24B0575, 22B0655, 22A0435).

[†] Corresponding author. E-mail: mahansi2024@163.com

[‡] Corresponding author. E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn

基于自适应直接二进制搜索算法的超紧凑型8通道模式-偏振复用器

马汉斯 林振 何新 侯海良 李雪垒 贺龙辉 甘龙飞 赵娜 许辉 周灵钧 吴加贵 杨俊波

Ultra-compact 8-channel mode-polarization multiplexer via adaptive direct binary search algorithm

MA Hansi LIN Zhen HE Xin HOU Hailiang LI Xuelei HE Longhui GAN Longfei ZHAO Na XU Hui ZHOU Lingjun WU Jiagui YANG Junbo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 040401 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251154

CSTR: 32037.14.aps.75.20251154

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251154>

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

基于直接二进制搜索算法设计的超紧凑 In_2Se_3 可调控功率分束器

Ultra-compact In_2Se_3 tunable power splitter based on direct binary search algorithm

物理学报. 2023, 72(15): 154207 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230459>

基于夹层结构的偏振无关 1×2 定向耦合型解复用器的设计

Design of polarization-insensitive 1×2 directional coupler demultiplexer based on sandwiched structure

物理学报. 2021, 70(1): 014202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200721>

一种基于三芯光子晶体光纤的宽带模分复用器的设计与研究

Design and research of a broadband mode-division multiplexer based on three-core photonic crystal fiber

物理学报. 2022, 71(4): 044206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211187>

基于置换群的多粒子环上量子行走的反馈搜索算法

Feedback search algorithm for multi-particle quantum walks over a ring based on permutation groups

物理学报. 2022, 71(3): 030201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211000>

$\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ -CoFeB自旋波定向耦合器中的自旋波

Spin waves in $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ -CoFeB spin-wave directional coupler

物理学报. 2021, 70(18): 187501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210507>

基于分段级联多模干涉的 Ta_2O_5 980/1550 nm波分复用/解复用器

Ta_2O_5 980/1550 nm wavelength multiplexer/demultiplexer based on segmented cascaded multimode interference

物理学报. 2025, 74(2): 024202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241243>