

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

逆向设计的硅基片上功率分束器

马汉斯, 杜特, 姜鑫鹏, 杨俊波

引用本文:

马汉斯, 杜特, 姜鑫鹏, 等. 逆向设计的硅基片上功率分束器[J]. 光电工程, 2023, 50(7): 230086.

Ma H S, Du T, Jiang X P, et al. Inverse-designed silicon-based on-chip power splitters[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(7): 230086.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230086>

收稿日期: 2023-04-17; 修改日期: 2023-06-08; 录用日期: 2023-06-09

相关论文

Low-loss chip-scale programmable silicon photonic processor

Yiwei Xie, Shihan Hong, Hao Yan, Changping Zhang, Long Zhang, Leimeng Zhuang, Daoxin Dai

Opto-Electronic Advances 2023, 6(3): 220030 doi: [10.29026/oea.2023.220030](https://doi.org/10.29026/oea.2023.220030)

All-optical computing based on convolutional neural networks

Kun Liao, Ye Chen, Zhongcheng Yu, Xiaoyong Hu, Xingyuan Wang, Cuicui Lu, Hongtao Lin, Qingyang Du, Juejun Hu, Qihuang Gong

Opto-Electronic Advances 2021, 4(11): 200060 doi: [10.29026/oea.2021.200060](https://doi.org/10.29026/oea.2021.200060)

Silicon photonics for telecom and data-com applications

Kiyoshi Asakawa, Yoshimasa Sugimoto, Shigeru Nakamura

Opto-Electronic Advances 2020, 3(10): 200011 doi: [10.29026/oea.2020.200011](https://doi.org/10.29026/oea.2020.200011)

Benchmarking deep learning-based models on nanophotonic inverse design problems

Taigao Ma, Mustafa Tobah, Haozhu Wang, L. Jay Guo

Opto-Electronic Science 2022, 1(1): 210012 doi: [10.29026/oes.2022.210012](https://doi.org/10.29026/oes.2022.210012)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.oeejournal.org/oe>



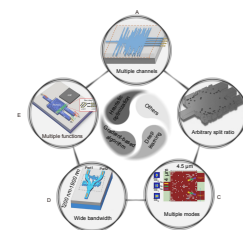
 OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.230086

逆向设计的硅基片上功率分束器

马汉斯^{1,2}, 杜特¹, 姜鑫鹏¹, 杨俊波^{1*}¹国防科技大学物质与材料科学实验中心, 湖南长沙 410073;²国防科技大学计算机学院量子信息研究所和高性能计算国家重点实验室,
湖南长沙 410073

摘要: 硅基片上功率分束器是光子集成电路的重要组成, 具有广泛的应用, 比如反馈电路、抽头功率监测和光学量化等。纳米光子器件的设计方法大致可以分为正向设计方法和逆向设计方法。本文概述了正向设计方法和逆向设计方法的区别与联系, 并且对逆向设计算法进行了归纳分类, 此外, 总结了近年来具有代表性的逆向设计的硅基片上功率分束器, 包括多通道功率分束器、任意分束比功率分束器、多模式功率分束器、宽带功率分束器和多功能功率分束器, 最后对逆向设计算法以及逆向设计的功率分束器的发展趋势进行了总结与展望。

关键词: 硅基片上功率分束器; 逆向设计方法; 多通道功率分束器; 任意分束比功率分束器; 多模式功率分束器; 宽带功率分束器; 多功能功率分束器

中图分类号: TN491

文献标志码: A

马汉斯, 杜特, 姜鑫鹏, 等. 逆向设计的硅基片上功率分束器[J]. 光电工程, 2023, 50(7): 230086

Ma H S, Du T, Jiang X P, et al. Inverse-designed silicon-based on-chip power splitters[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(7): 230086

Inverse-designed silicon-based on-chip power splitters

Ma Hansi^{1,2}, Du Te¹, Jiang Xinpeng¹, Yang Junbo^{1*}¹Center of Material Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;²Institute for Quantum Information & State Key Laboratory of High Performance Computing, College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract: The silicon-based on-chip power splitter, an important component of the photonic integrated circuits, has much wider scope of applications such as feedback circuits, tap-port power monitoring, and optical quantization. The design methods of the nanophotonic devices can be roughly divided into the forward design and inverse design methods. This review article outlines the differences and connections between the forward design and inverse design methods, and classifies the inverse design algorithms. In addition, the review article summarizes the representative inverse-designed silicon-based on-chip power splitters in recent years, including multichannel power splitters, arbitrary-split-ratio power splitters, multimode power splitters, broadband power splitters, and multifunction power splitters. Finally, the summary and outlook are made on the development trend of the inverse design algorithms and the inverse-designed power splitters.

Keywords: silicon-based on-chip power splitter; inverse design; multichannel power splitters; arbitrary-split-ratio

收稿日期: 2023-04-17; 修回日期: 2023-06-08; 录用日期: 2023-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60907003, 61805278, 12272407, 62275269, 62275271), 国家重点研发计划项目 (2022YFF0706005); 中国博士后科学基金 (2018M633704); 国防科技大学基金 (JC13-02-13, ZK17-03-01); 湖南省自然科学基金项目 (13JJ3001); 新世纪高校优秀人才计划 (NCET-12-0142)

*通信作者: 杨俊波, yangjunbo@nudt.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

power splitters; multimode power splitters; broadband power splitters; multifunction power splitters

1 引言

随着片上数据交换规模的不断扩大, 电子集成电路的物理限制越来越明显^[1-3]。光子集成电路 (Photonic integrated circuit, PIC) 已被广泛认可为支持未来数据通信网络的可行替代方案。具体而言, 硅光子学提供了一个更有前景和吸引力的平台, 以满足日益增长的光通信需求, 因为它具有低制造成本、低功耗、小尺寸以及与成熟的互补金属氧化物半导体工艺的兼容的特性^[4-11]。

硅基片上纳米光子器件正在成为复杂 PIC 的基本组成部分。纳米光子器件的设计方法大致可以分为两类, 即正向设计方法和逆向设计方法。正向设计方法, 也称为传统设计方法, 依靠直觉、经验和物理原理来设计光子器件, 一般需要通过调节少部分的特征参数来找到具有良好性能的器件结构。正向设计方法有着长久的成功应用记录, 并且产生了丰富且广泛的模板库, 包括微环谐振器^[12-16]、马赫-曾德尔干涉仪^[17-21]、多模干涉^[22-26] 和非对称定向耦合器^[27-31] 等。例如, 当上包层折射率不等于衬底折射率时, 在绝缘体上硅 (silicon-on-insulator, SOI) 波导纳米线中可能发生模式杂化, 通过这种物理原理, 有研究者设计了锥形波导模式转换器^[32-34]。虽然使用正向设计方法已经取得了显著的成功, 但由于纳米光子器件的复杂性不断增加, 正向设计在计算上的试错成本变得高昂且效率低下。此外, 由于正向设计的纳米光子器件调节的参数空间小, 导致所设计的纳米光子器件通常具有较大的尺寸。实际应用中, 在不断增加的高密度 PIC 需求的驱动下, 研究者提出了逆向设计方法来克服正向设计方法的缺点^[35-43]。目前, 在 SOI 平台上实现的各种逆向设计的纳米光子器件已经被报道, 其中包括波分复用器^[44-47]、偏振分束和旋转器^[48-51]、模式转换器^[52-55]、波导交叉^[56-59] 和功率分束器^[60-63] 等。

功率分束器近年来受到越来越多的关注, 是 PIC 的一个重要组件, 具有广泛的应用, 如反馈电路、抽头功率监测和光学量化等。在过去的几十年里, 已经提出了许多的设计方案, 包括 Y 分支^[64-65]、非对称定向耦合器^[66-67] 和多模干涉^[68-69] 等。虽然这些正向设计的功率分束器具备良好的性能, 但是它们较大的器件

尺寸限制了其在高密度和大规模 PIC 的进一步应用。比如, Luo Y C 等人利用非对称定向耦合结构实现了一个支持基本横向磁场 (fundamental transverse magnetic, TM_0) 和 TM_1 模式的 3 dB 功率分束器, 两种模式在 1550 nm 波长处的测试插入损耗小于 0.7 dB, 测试串扰低于 -14.3 dB, 以及耦合长度约为 15.2 μm ^[66]。此外, Yao R K 等人基于多模干涉原理设计了 1×4 和 1×8 的功率分束器, 在 1520 nm 到 1624 nm 的带宽范围内, 其测试的插入损耗分别小于 0.62 dB 和 0.64 dB, 其输出一致性波动分别在 0.07 dB 到 0.89 dB 和 0.19 dB 到 0.83 dB 之间, 但是, 器件长度却分别长达 36 μm 和 47.8 μm ^[68]。逆向设计的功率分束器具有小尺寸、低损耗、多通道和多功能的特点, 弥补了正向设计的功率分束器的短板, 并且已成为实现高密度光学系统的关键组成部分。在这篇综述中, 我们总结了近些年逆向设计的硅基片上功率分束器的研究进展, 如图 1 所示, 包括两部分, 即逆向设计方法和基于逆向设计的功率分束器。在第 2 节中, 我们概述了正向设计方法和逆向设计方法的区别与联系, 并且对逆向设计算法进行了归纳分类; 在第 3 节中, 我们根据不同的功能对基于逆向设计方法的功率分束器进行了总结并且讨论了器件加工鲁棒性。

2 逆向设计方法概述

在过去的几十年里, 纳米光子学受到了越来越多的关注, 并成为了一个活跃的研究领域。如图 2 所示, 围绕着纳米光子器件的研究领域, 设计方法大致可以分为正向设计方法和逆向设计方法。正向设计方法, 即传统设计方法, 是一种“机制主导”的方法, 光子器件的设计依赖于物理学启发。首先根据物理原理, 比如直觉、经验和物理模型等, 为设计过程提供指导, 选择一个大体物理结构。这个物理结构对应着初始的物理响应, 比如透过率曲线、电场分布、相位等。然后, 使用参数扫描模拟对结构进行微调, 比如微调物理结构的长宽高、材料、半径等。最后, 选择最优物理响应对应的物理结构。在整个过程中, 正向设计方法调节的自由度较低, 这会导致器件的尺寸较大。更具有挑战的是, 在人类知识没有提供明确指导或最佳方法的情况下, 完成器件的设计是非常困难的。逆

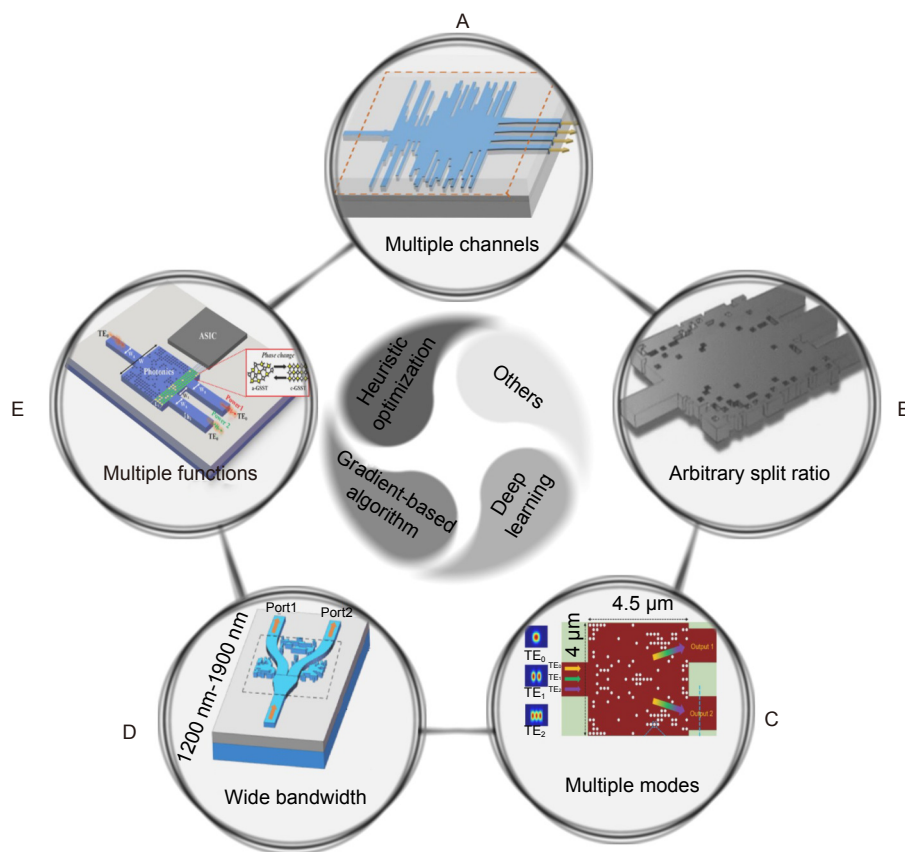


图 1 逆向设计的功率分束器总结。A: 4 通道的功率分束器^[62]; B: 分束比为 1:2:1 的功率分束器^[63]; C: 三 TE 偏振模式的功率分束器^[70]; D: 工作带宽为 700 nm 功率分束器^[71]; E: 可调谐的功率分束器^[72]

Fig. 1 Summary of the inverse-designed power splitters. A: The power splitter with four channels^[62]; B: The power splitter with a split ratio of 1:2:1^[63]; C: The power splitter for the TE_0 , TE_1 , and TE_2 modes^[70]; D: The power splitter with 700 nm working bandwidth^[71]; E: The tunable power splitter^[72]

向设计方法是一种“功能主导”的方法，通过逆向设计算法优化光子器件的结构。首先确定与目标物理响应相关的函数，然后通过逆向设计算法将目标函数最小化或最大化，以获得预期的物理响应，最后选择最优物理响应对应的物理结构。由于数字化的参数空间，逆向设计可以在较高的自由度下设计结构，这将使得纳米光子器件具有超紧凑的尺寸。此外，逆向设计方法可以不需要物理原理来进行初始结构猜测，从而自动化地设计纳米光子器件，也就是说逆向设计无需太多的人工参与。正向设计方法是一个由物理结构到物理响应的优化过程，逆向设计方法是一个由物理响应到物理结构的优化过程，虽然有所区别，但是也不是完全孤立的。尽管逆向设计可以摆脱人工参与来自动化地优化器件，但高质量的初始结构可以加速算法收敛，从而得到更好的性能，其中，正向设计的结构就是高质量的初始结构之一。以正向设计的结构作为初

始结构，逆向设计算法可以快速有效地收敛。例如，Ma H S 等人以正向设计的非对称定向耦合器为初始结构，采用逆向设计算法进行优化，设计了非易失性可重构模式产生器和光环行器^[52]；Wang Z C 等人以正向设计的 Y 分支波导为初始结构，采用逆向设计算法进行优化，设计了超大带宽的功率分束器^[71]。因此，正向设计的结构可以设置为逆向设计的初始结构，反之，逆向设计可以强化正向设计结构性能。

逆向设计算法是逆向设计过程中的关键环节，之前大量的工作对逆向设计算法进行论述^[35-39]，其中，Huang J 等人将逆向设计算法划分为四大类，包括启发式优化算法、基于梯度优化算法、深度学习和和其他算法^[35]。启发式优化算法，包括直接二进制搜索算法^[48-50,52,54]、遗传算法^[45,51,53,73-74]、粒子群优化算法^[56,75-77]等，是从大自然的运行规律或者基于直观和经验启发出来的算法。基于梯度优化算法，包括伴随

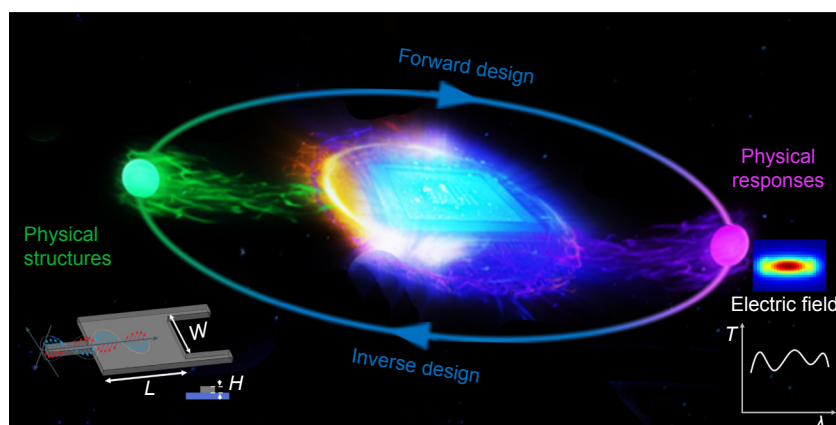


图2 正向设计和逆向设计方法总结

Fig. 2 Summary of the forward design and inverse design methods

法^[78-80]、目标优先算法^[36,44,47,81]、形状拓扑优化^[82-84]等,是将逆向设计问题转化为抽象的数学问题的算法,首先确定优化参数以及优化参数与设计区域的介电常数分布之间的映射关系,然后采用伴随分析等方法得到代表器件性能的函数对优化参数的导数,最后采用最速下降法等方法得到器件设计区域的最优介电常数分布。深度学习是机器学习领域的一个新的研究方向,是通过非线性模型实现的表示学习技术,该非线性模型通过多层处理,逐渐将初始的“低层”特征表示转化为“高层”特征表示,从而完成复杂的学习任务^[40-42,85]。逆向设计算法各有千秋,需要根据光子器件设计的具体需求进行合适的选择。例如,在启发式优化算法中,直接二进制搜索算法是一种在特定约束条件下进行搜索方法,其优点是原理简单,操作方便,加工鲁棒性较好,其缺点是对初始结构敏感,容易过早的收敛到不理想的结果,此外,尺寸较大的器件会成倍地增加优化时间成本;在梯度优化算法中,目标优先算法由于加入了梯度信息,其计算速度要比启发式算法快很多,但是将介电常数连续状态转化为离散状态的过程不仅会影响器件的性能,而且降低了器件加工鲁棒性;深度学习是由大量数据驱动驱动的算法,其优点在于一旦训练好了模型,便可以迅速地预测相应的物理结构或者物理响应,但是需要花费时间成本采集大量数据集进行学习。

3 逆向设计的硅基片上功率分束器

功率分束器是高密度和大规模的 PIC 重要的组成成分,具有广泛的应用。逆向设计是实现超紧凑和低损耗功率分束器的有效方法。我们根据不同的功能综

述了硅基片上功率分束器并且讨论了器件加工鲁棒性,包括 3.1 节中的多通道功率分束器, 3.2 节中的任意分束比功率分束器, 3.3 节中的多模式功率分束器, 3.4 节中的宽带功率分束器, 3.5 节中的多功能功率分束器和 3.6 节中的加工鲁棒性。

3.1 多通道功率分束器

通道数量是评价功率分束器的分束能力的重要指标。研究者可以用逆向设计算法直接优化单个器件实现多通道的功率分束^[60-62,75,79,86]。逆向设计算法可以在高自由度下调节器件的折射率分布,从而优化出超紧凑和低损耗的功率分束器。此外,对于具有对称性结构的器件,在优化过程中通常可以对称地优化器件结构,这样不仅可以保证输出功率的一致性,而且可以节省大量的优化时间。如图 3(a) 所示, Zhang Y 等人使用粒子群优化算法设计了一个尺寸为 $1.2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ 的 1×2 功率分束器,其仿真平均插入损耗为 $0.28\ \text{dB}$ ^[75]。如图 3(b) 所示, Lalau-Keraly C M 等人使用伴随形状优化算法设计了一种 1×2 功率分束器,其尺寸为 $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$,在 $1550\ \text{nm}$ 波长的仿真插入损耗为 $0.07\ \text{dB}$ ^[79]。为了增加单个器件的通道数量,图 3(c) 中的 1×3 和图 3(d) 中的 1×4 功率分束器也相继被报道^[62,86]。例如,图 3(d) 中展示了 Kim J 等人采用粒子群算法设计并加工了一个 1×4 功率分束器^[62],尺寸为 $6.0\ \mu\text{m} \times 7.2\ \mu\text{m}$,在 $1545\ \text{nm}$ 到 $1560\ \text{nm}$ 带宽范围内,测试插入损耗小于 $1.08\ \text{dB}$,输出功率一致性波动小于 $0.81\ \text{dB}$ 。然而,仅在单个设备上进一步增加通道数量是困难的,因为随着通道数量的剧增,逆向设计算法的优化目标也随之增加,使得算法难以均衡地提升每个目标可能导致不良的结果。其次,随着通

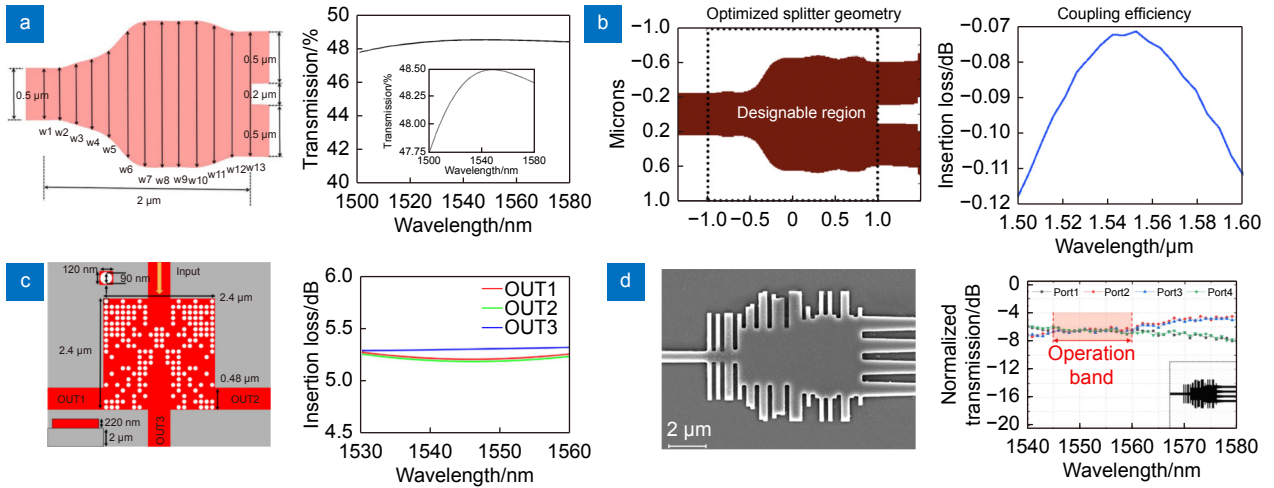


图3 单个器件的多通道功率分束器的结构与性能。(a)和(b) 1×2 功率分束器^[75,79];

(c) 1×3 功率分束器^[86]; (d) 1×4 功率分束器^[62]

Fig. 3 Structures and results of the single-device power splitters with multiple channels.

(a) and (b) The 1 × 2 power splitter^[75,79]; (c) The 1 × 3 power splitter^[86]; (d) The 1 × 4 power splitter^[62]

道数量的剧增, 单个器件的尺寸也会增加, 逆向设计算法的优化时间成本也会随之成倍地增加。

在正向设计方法中, Tao S H 等人加工了一个 1×16 功率分束器, 它是由带有弧形 Y 分支波导的 1×2 功率分束器级联而成^[65]。这种将简单的单个器件组装成复杂器件的思想为实现逆向设计的多通道功率分束器提供了一种有潜力的方法。如图 4(a) 所示, Ma H S 等人采用直接二进制搜索算法设计了一个 1×4 功率分束器, 它是由三个具有不同输出方向的 1×2 功率分束器组成, 各端口的仿真损耗小于 6.6 dB^[60]。此外, 在图 4(b) 中, Xu Y H 等人展示了一个 1×6 功率分束器, 由一个 1×2 功率分束器和两个 1×3 功率分束器组成, 各端口的仿真损耗小于 8.8 dB^[86]。

特别地, 通过组装简单的单个器件, 可以很容易地实现 1×N 功率分束器。由于采用逆向设计的基本组件的尺寸很小, 因此组装的 1×N 功率分束器相比于正向设计的功率分束器尺寸也更紧凑。

3.2 任意分束比功率分束器

顾名思义, 任意分束比功率分束器就是输出具有任意功率比例的分束器。在 2016 年, Meng C 等人仿真设计了一个 2.8 μm×2.8 μm 的 1×3 功率分束器^[87], 如图 5(a) 所示, 其功率输出比例为 1:2:1。这个结构通过最速下降法求解目标函数, 然后通过水平集算法将器件结构的连续值转化为二进制值得到的, 其插入损耗和分束比波动分别小于 0.49 dB 和 4.4%。在 2017 年, Xu K 等人采用直接二进制搜索算法设计了

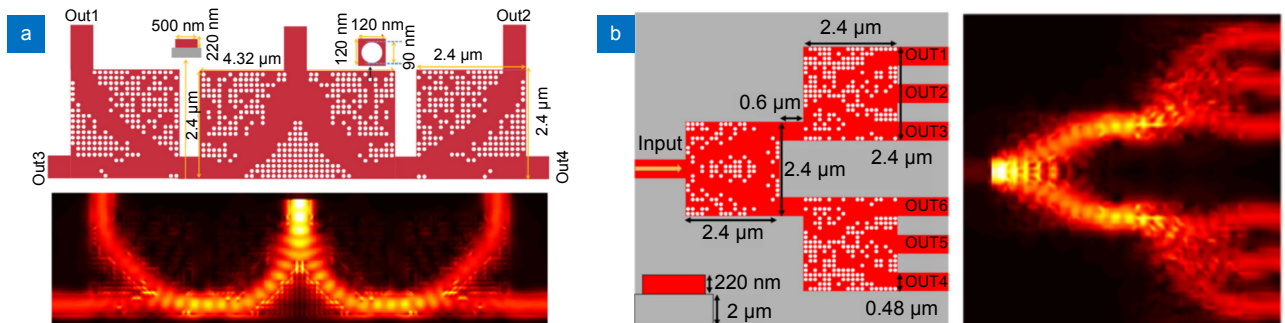


图4 组合的多通道功率分束器的结构与性能。(a) 由三个具有不同输出方向的 1×2 功率分束器组成的 1×4 功率分束器^[60];

(b) 由一个 1×2 功率分束器和两个 1×3 功率分束器组成的 1×6 功率分束器^[86]

Fig. 4 Structures and results of the assembled power splitters with multiple channels. (a) The 1 × 4 power splitter assembled by three 1 × 2 power splitters with different output directions^[60]; (b) The 1 × 6 power splitter assembled by one 1 × 2 power splitter and two 1 × 3 power splitters^[86]

如图 5(b) 所示的分别具有 1:1、1:2 和 1:3 的功率输出比例的 1×2 功率分束器^[63], 其尺寸仅为 $3.6 \mu\text{m} \times 3.6 \mu\text{m}$, 在 30 nm 的带宽范围内, 测试透过率约为 80%。此后, 在 2021 年, Fujisawa T 等人采用贝叶斯直接二进制搜索算法高效地设计了任意分束比的 1×2 功率分束器^[88], 其尺寸为 $2.4 \mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$, 上下通道的输出透过率如图 5(c) 所示具有 9:1、8:2、7:3 和 6:4 的分束比。这些器件的功率输出比例是固定的, 仅从概念上证明了任意分束比的功能。虽然可以通过智能算法优化期望分束比的器件, 但是这也意味着必须重复地优化不同的器件以获得不同的分束比, 这样的设计过程耗时且繁琐。

深度学习可以利用非线性处理层的串行堆叠来实现高度非线性数据关系的捕获和建模, 比如光子器件的物理结构和物理响应之间的关系, 因此它为纳米光子器件设计提供了新的视角。如图 6 所示,

深度神经网络可用于预测拓扑结构的光学响应 (正向神经网络) 以及设计目标光学响应的拓扑结构 (反向神经网络)。Tahersima M H 等人使用具有 20000 个样本的数据集训练了隐藏层宽度为 100, 隐层深度为 8, 批量大小为 100, “epoch” 数为 10000 的神经网络模型^[89]。利用该神经网络模型的反向神经网络可以在几分之一秒内设计具有各种目标分束比且超紧凑 ($2.6 \mu\text{m} \times 2.6 \mu\text{m}$) 的 1×2 功率分束器, 如 1:1、1:1.05、1:1.5、1:1.55、1:2、1:2.5、1:3 和 1:3.5 分束比的功率分束器。模拟结果表明, 反射效率和透射效率分别小于 -20 dB 和大于 90%。与其他算法相比, 比如图 5 中的直接二进制搜索算法, 神经网络可以即时地产生具有任意分束比的拓扑结构, 而不是机械地重复优化过程。

3.3 多模式功率分束器

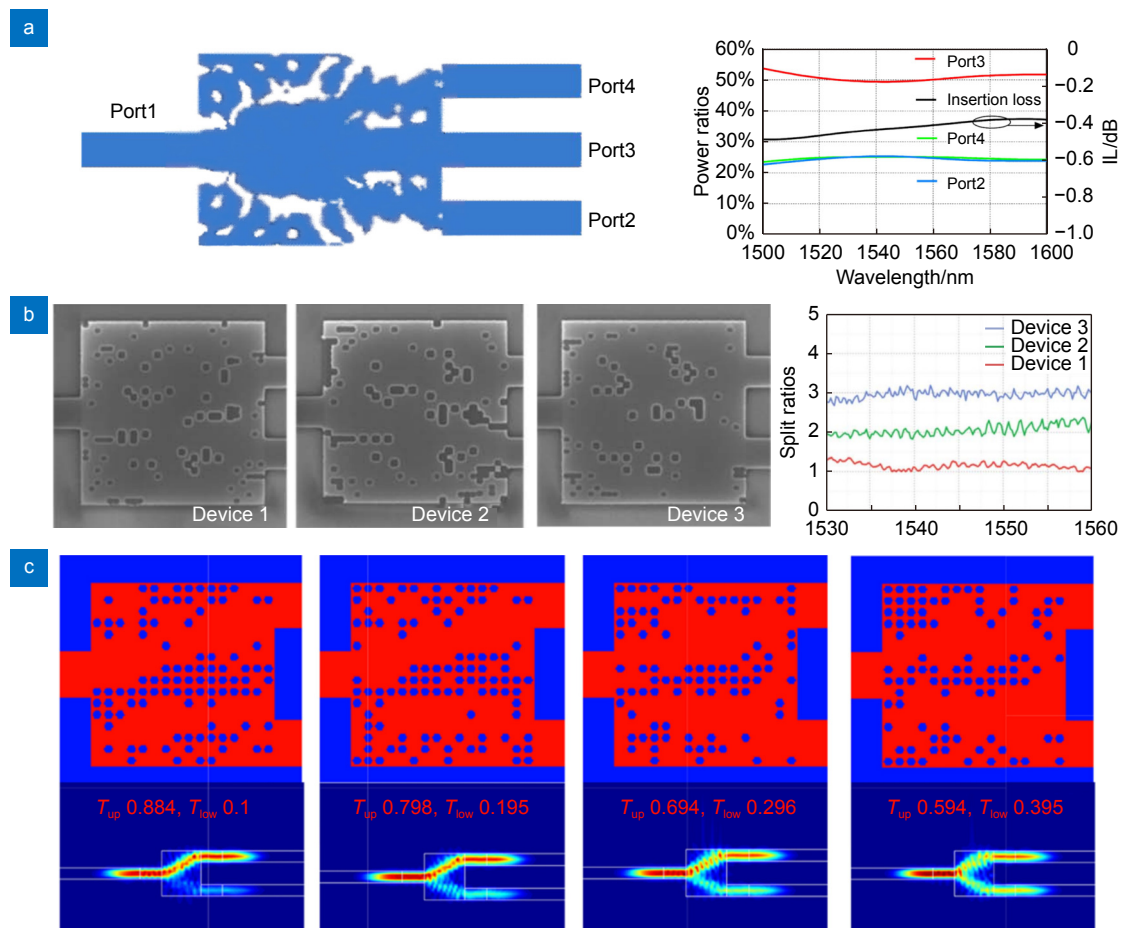
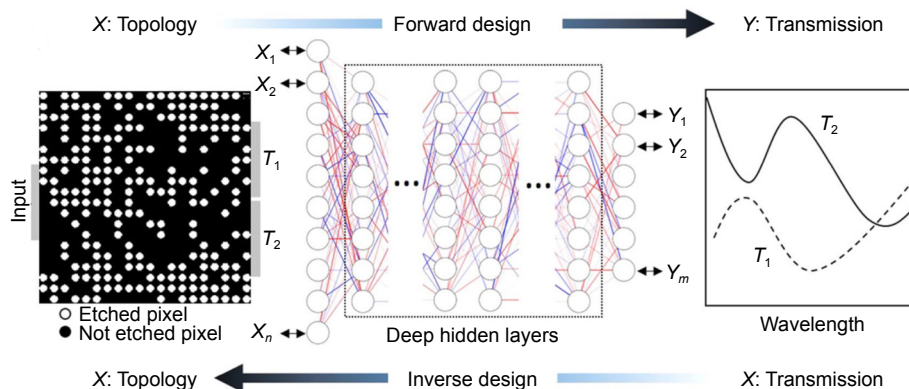


图 5 任意分束比功率分束器的结构和性能。(a) 分束比为 1:2:1 的 1×3 功率分束器^[87]; (b) 分束比分别为 1:1、1:2 和 1:3 的 1×2 功率分束器^[63]; (c) 分束比分别为 9:1、8:2、7:3 和 6:4 的 1×2 功率分束器^[88]

Fig. 5 Structures and results of the power splitters with arbitrary split ratios. (a) The 1×3 power splitter with a split ratio of 1:2:1^[87]; (b) The 1×2 power splitters with the split ratios of 1:1, 1:2, and 1:3^[63]; (c) The 1×2 power splitter with the split ratios of 9:1, 8:2, 7:3, and 6:4^[88]

图 6 正向和反向神经网络^[89]Fig. 6 Forward and inverse neural network modeling^[89]

众所周知, 模分复用技术是将多个正交模式携带不同信息在同一个多模波导中传播的技术, 为扩展 PICs 的数据容量提供了一种很有前途的方法。多模式功率分束器是模分复用系统中最重要的组件之一, 可同时分束不同的模式。在第 3.1 节和第 3.2 节中所述的功率分束器只支持 TE_0 模式。支持双 TE 模式和三 TE 模式的功率分束器在 2018 年和 2020 年被报道^[70,90]。如图 7(a) 所示, Chang W J 等人加工了一种双模功率分束器, 结构是由直接二进制搜索算法优化得到, 其尺寸仅为 $2.88\ \mu\text{m} \times 2.88\ \mu\text{m}$, 可以同时均分 TE_0 和 TE_1 模式^[90]。在 1530 nm 到 1580 nm 带宽范围内, TE_0 和 TE_1 模式的测试插入损耗和串扰分别小于 1.5 dB 和 -20 dB。如图 7(b) 所示的三模式分束器, 其尺寸为 $4\ \mu\text{m} \times 4.5\ \mu\text{m}$, 在 1530 nm 到 1570 nm 的带宽范围内, TE_0 、 TE_1 和 TE_2 模式的测试插入损耗和串扰分别小于 1.5 dB 和 -15 dB^[70]。除了 TE 偏振功率分束器外, 各种各样的涉及 TM 偏振功率分束器也引起了研究人员的极大兴趣^[91-93]。例如, Liu Y J 等人加工了一个图 7(c) 中的 $6\ \mu\text{m} \times 5.25\ \mu\text{m}$ 的功率分束器, 可以同时均分 TE_0 、 TE_1 、 TM_0 和 TM_1 模式^[93]。在 1530 nm 至 1570 nm 的带宽范围内, 所有模式的插入损耗和串扰分别小于 1.4 dB 和 -15 dB。同样地, 如第 3.1 节所述, 逆向设计方法中的多目标优化不仅会显著增加时间成本, 而且容易导致不理想的结果。因此, 在单个器件上大幅增加模式数量可能会影响设备性能。

类似地, 将简单的单个器件组装成复杂设备的概念可以使功率分束器支持更多的模式。基于正向设计辅助的逆向设计方法, Chen W W 等人使用粒子群优化算法来增强正向设计的锥形耦合器, 设计了一个如图 8(a) 所示的分束五种 TE 模式的功率分束器^[94]。仿

真模拟的光场分布如图 8(b) 所示, 可以看出此器件可以高效地均分 TE_0 、 TE_1 、 TE_2 、 TE_3 和 TE_4 模式。图 8(c) 中的测试结果表明, 从 1520 nm 到 1600 nm 的带宽范围内, 插入损耗和串扰分别小于 1.5 dB 和 -14.12 dB, 功率均匀性在 0.041 到 0.88 dB 之间变化。这种级联反向设计的结构可以很容易地扩展到更多的 TE 和 TM 偏振模式。

3.4 宽带功率分束器

除了模分复用技术以外, 波分复用技术是另一种成熟且广泛应用的复用技术, 它将不同中心波长的两个或多个光信号组合到单个波导进行传输, 可用于进一步扩展光互连系统的传输容量。因此, 纳米光子器件的工作带宽大小对波分复用系统是很重要的。SOI 平台上的光子器件通常工作在 C 波段、L 波段和 O 波段。研究人员可以探索其他透明窗口来增加传输能力。如图 9(a) 所示, Xie H C 等人采用直接二进制搜索算法设计了在 $2\ \mu\text{m}$ 光谱范围 1×4 功率分束器, 分束比分别为 1:1:1:1、2:2:1:1、2:2:2:1 和 4:3:2:1^[95]。透射光谱如图 9(b) 所示, 在 1945 nm 到 1975 nm 的带宽范围内, 所有功率分束器的总透过率都高于 70%。

扩展纳米光子器件的工作带宽是增加传输容量的另一种方法。Piggott A Y 等人采用基于梯度的优化算法设计了如图 10(a) 中的一种宽带 1×3 功率分束器^[96], 其尺寸为 $3.8\ \mu\text{m} \times 2.5\ \mu\text{m}$, 在 1400 nm 到 1700 nm 的 300 nm 带宽范围内的测试插入损耗小于 0.7 dB。如图 10(b) 所示, Xu J F 等人采用一种拓扑优化方法设计了一个尺寸为 $5.4\ \mu\text{m} \times 2.88\ \mu\text{m}$ 的双模式功率分束器^[97], 在 1588 nm 到 2033 nm 的 445 nm 带宽范围内, TE_0 和 TE_1 模式的仿真插入损耗和串扰分别小于 0.83 dB 和 -22 dB。Tang Y H 等人使用深度学习模型实现

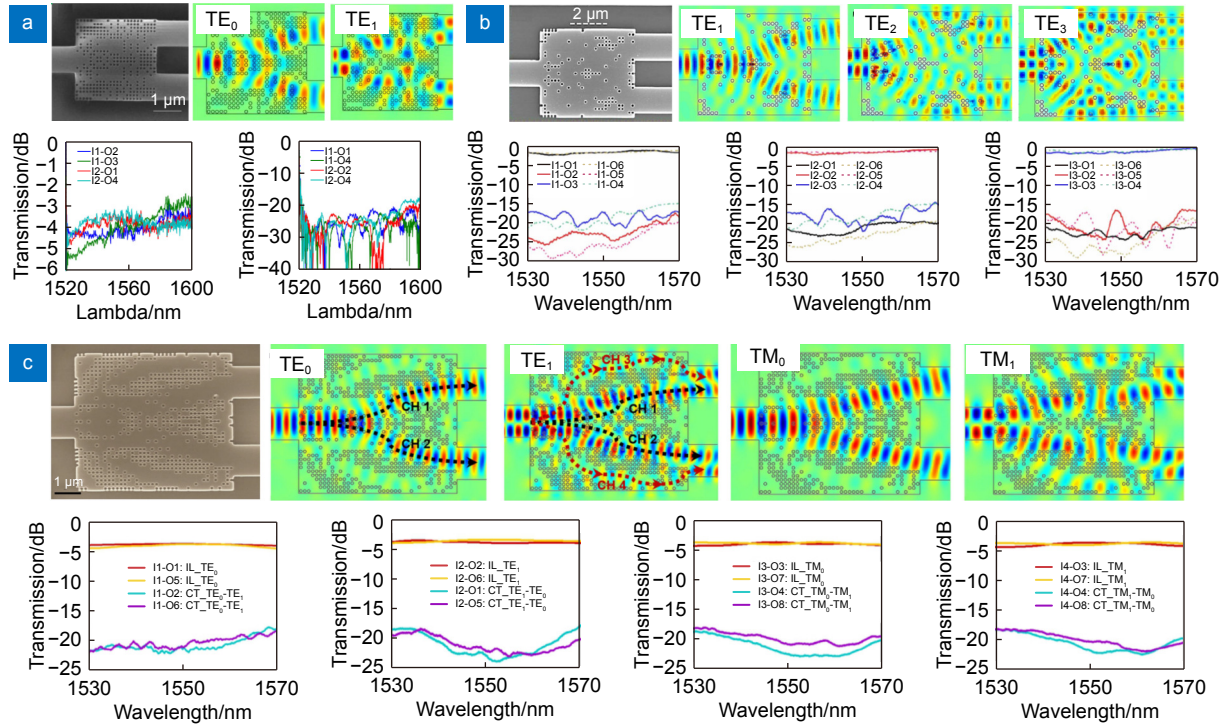


图 7 单个多模式功率分束器的结构和性能。(a) 双 TE 模式功率分束器^[90];
(b) 三 TE 模式功率分束器^[70]; (c) 四模式双偏振功率分束器^[93]

Fig. 7 Structures and results of the single-device power splitters with multiple modes. (a) The two-TE-mode power splitter^[90];
(b) The three-TE-mode power splitter^[70]; (c) The four-mode and dual-polarization power splitter^[93]

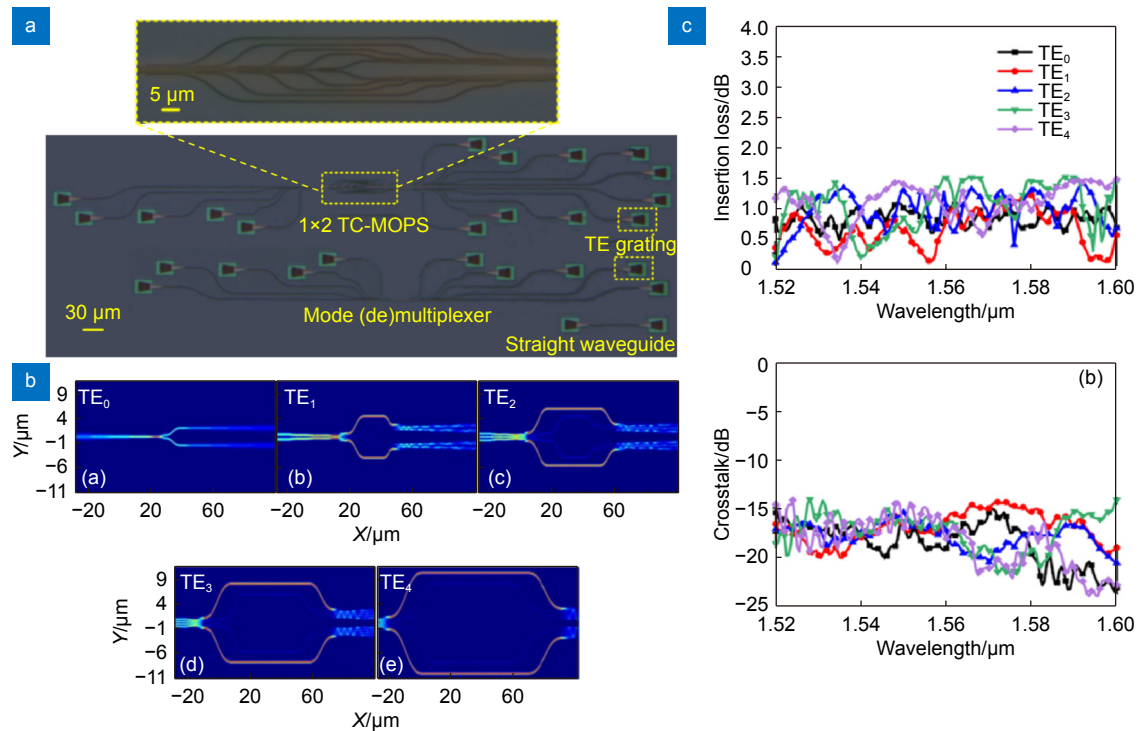
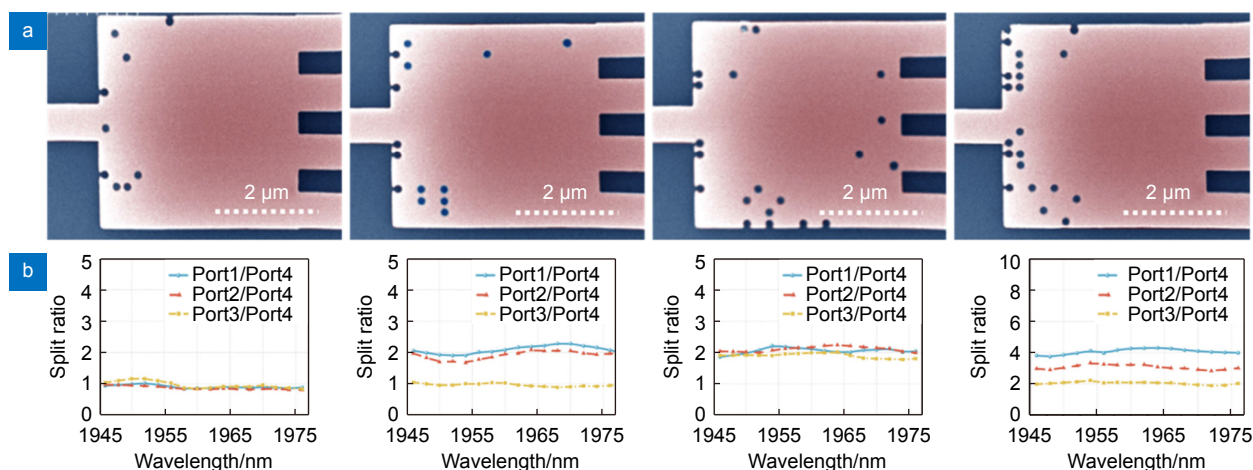


图 8 组装的多模式功率分束器的结构和性能^[94]。(a) 扫描电镜图; (b) 仿真光场分布; (c) 测试的透射光谱

Fig. 8 Structures and results of the assembled power splitter with multiple modes^[94].
(a) The SEM images; (b) The simulated light field distributions; (c) The measured transmission spectra

图9 工作在 $2\ \mu\text{m}$ 光谱范围的 1×4 功率分束器的结构和性能^[95]Fig. 9 Structures and results of 1×4 power splitter working at $2\ \mu\text{m}$ spectral range^[95]

了图 10(c) 中具有多种分束比的超宽带功率分束器^[98]。其尺寸仅为 $2.25\ \mu\text{m}\times 2.25\ \mu\text{m}$ ，在 $1250\ \text{nm}$ 到 $1800\ \text{nm}$ 的 $550\ \text{nm}$ 带宽范围内，所有器件的总体透过率接近 90%。此外，Wang Z C 等人采用阶段性逆向优化方法设计了一个超宽带的 1×2 功率分束器^[71]，如图 10(d) 所示，在 $1200\ \text{nm}$ 到 $1900\ \text{nm}$ 的 $700\ \text{nm}$ 的带宽范围内， 1×2 Y 分支功率分束器的仿真的插入损耗小于 $0.2\ \text{dB}$ 。这种超紧凑、超宽带、低损耗的功率分束器是波分复用系统的一个重要组成。

3.5 多功能功率分束器

在一些特定的 PIC 应用场景中，纳米光子器件可能需要同时具有多个功能。本节中所述的多功能器件包括组合功能器件和可调谐器件。组合功能器件是指在一个器件上集成多个器件的功能，如同时实现光纤到芯片耦合和波长解复用功能^[99]、聚焦和波长解复用功能^[44]、模式转换和偏振分束功能^[48]等。针对组合功能的功率分束器而言，具有不同输出方向的功率分束器可以同时实现功率分束和弯曲波导的功能^[60,86]。Xu Y H 等设计了如图 11(a) 中具有一个向左输出波导和两个向下输出波导的 1×3 功率分束器^[86]，其尺寸 $2.4\ \mu\text{m}\times 2.4\ \mu\text{m}$ ，各端口的仿真损耗小于 $5.5\ \text{dB}$ ，且输出功率具有很好的一致性。任意输入功率分束器可以同时实现功率分束和交叉波导的功能。如图 11(b) 所示，由于结构的高对称性，当光从任意一个端口输入时，设计区域为 $3.8\ \mu\text{m}$ 宽的正六边形功率分束器都可以实现 1×2 的功率分束，其仿真插入损耗小于 $1.5\ \text{dB}$ ^[100]。此外，模式转换功率分束器可以同时实现功率分束和模式转换的功能。Ma H S 等人设计了图 11(c) 中的尺

寸为 $2.7\ \mu\text{m}\times 2.4\ \mu\text{m}$ 的模式转换功率分束器^[101]，可以同时实现 1×2 功率分束和 $\text{TE}_0\text{-TE}_2$ 模式转换，其仿真插入损耗和串扰分别小于 $0.2\ \text{dB}$ 和 $-20.6\ \text{dB}$ 。基于功率分束和模式转换的功能组合，还可以继续附加滤波的功能。如图 11(d) 所示，Yuan H 等人实现了 $3.6\ \mu\text{m}\times 36\ \mu\text{m}$ 的 1×2 多模波长解复用器^[102]。除了 1×2 功率分束和 $\text{TE}_0\text{-TE}_2$ 模式转换功能外，该器件还进一步实现了 $1450\ \text{nm}$ 和 $1550\ \text{nm}$ 的波长解复用，其仿真插入损耗和串扰分别小于 $1.4\ \text{dB}$ 和 $-23.1\ \text{dB}$ 。

可调谐器件是通过调节折射率分布而实现不同功能的器件。热光效应的调节机制被广泛应用在设计可调谐器件，像微环谐振器^[12-16]和马赫-曾德尔干涉仪^[17-21]等，但是热光效应不能较强烈地调节硅材料的折射率，导致设计的器件具有较大的尺寸，因此这种机制被较多的应用在正向设计的光子器件中。此外，这种机制是易失性的，需要连续外界能量来维持调制状态。由于硫系相变材料，特别是 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_3$ (GST)、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_4$ (GSST) 和 Sb_2Se_3 ，其非易失性、对硅材料折射率的极强调制以及开关周期高的特征，它为不易失性集成光子应用提供了巨大的潜力^[52]。如图 12(a) 所示，基于 GSST 和硅的混合结构，Yuan H 等人设计了 1×2 功率分束器，可以通过 GSST 材料的晶态和非晶态的切换来重新配置功率分束比^[72]，比如 $1:1$ 、 $1.5:1$ 、 $2:1$ 和 $2.5:1$ 等。类似地，基于这种混合结构，Chen H X 等人设计了一个可调谐模式产生器^[103]，由图 12(b) 中的模块 I、模块 II 和模块 III 组成，其中，模块 I 是一个可调谐功率分束器。当 GSST 是晶态时，光从中间波导输出；当 GSST 是非晶态的时，

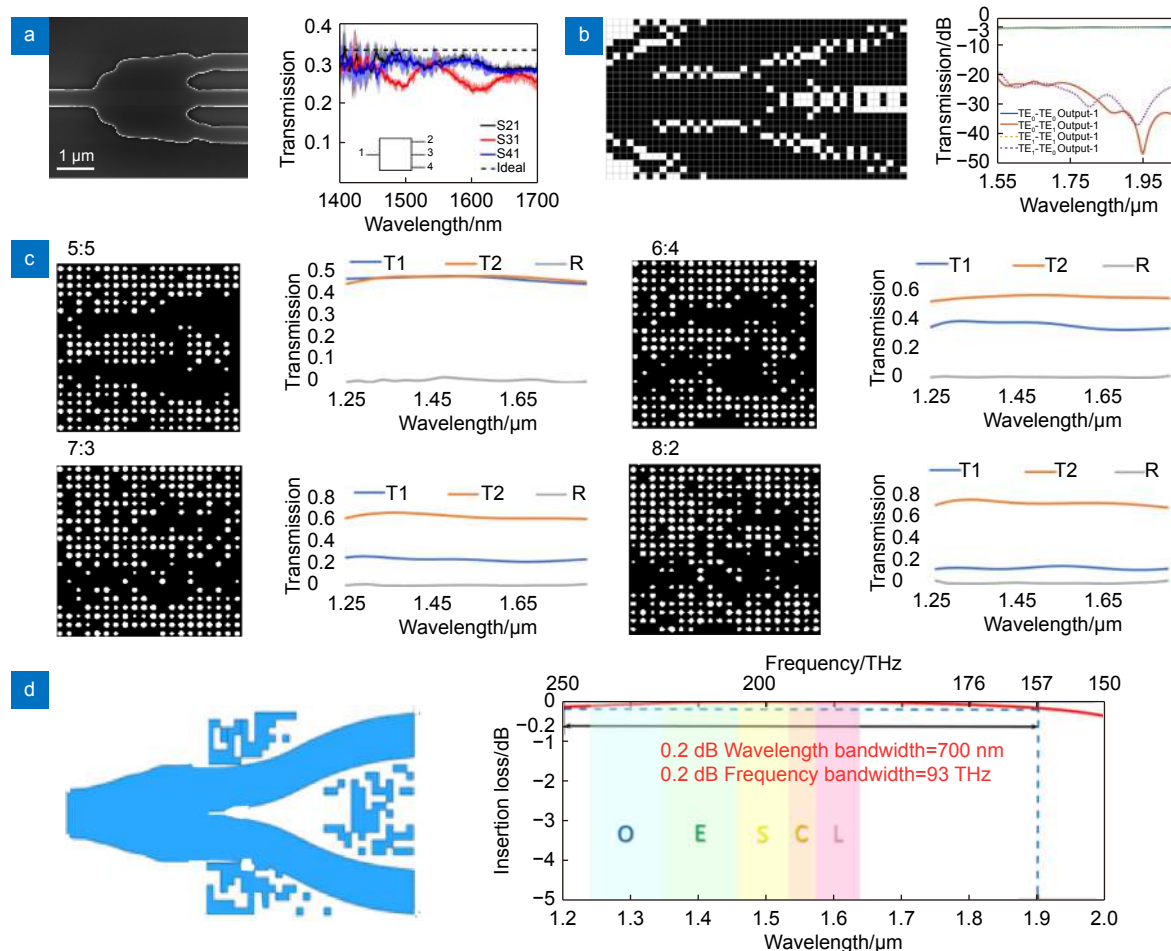


图 10 宽带功率分束器的结构和性能。(a) 300 nm 带宽的 1×4 功率分束器^[96]; (b) 445 nm 带宽的 1×2 功率分束器^[97]; (c) 550 nm 带宽的 1×2 功率分束器^[98]; (d) 700 nm 带宽的 1×2 功率分束器^[71]

Fig. 10 Structures and results of the broadband power splitters. (a) The 1×4 power splitter with 300 nm working bandwidth^[96]; (b) The 1×2 power splitter with 445 nm working bandwidth^[97]; (c) The 1×2 power splitter with 550 nm working bandwidth^[98]; (d) The 1×2 power splitter with 700 nm working bandwidth^[71]

光从两侧的两个波导输出。此外, Yuan H 等人还提出一种基于 Sb_2Se_3 和硅的混合结构的纳米光子神经网络, 通过数字编码 Sb_2Se_3 阵列的相变态, 可以在 C 波段以低损耗来任意配置卷积核的权值^[104], 其核心器件是如图 12(c) 的功率分束器, 通过调控 Sb_2Se_3 阵列中每个单元的相变动态地切换该器件的功率输出比值。除了逆向设计的可调谐功率分束器以外, Su Y X 等人采用正向设计提出了一种基于 Sb_2Se_3 相变材料的可重构宽带 Y 分支结构^[105]。当两个分支上的 Sb_2Se_3 层处于不同状态时, Y 分支是不对称的, 作为可重构的双模式复用器工作; 当两个 Sb_2Se_3 层都是非晶态时, Y 分支是对称的, 可用作双模 3 dB 功率分束器工作。

3.6 加工鲁棒性

在 3.1~3.5 节中, 我们根据不同的功能对基于逆向设计方法的功率分束器进行了总结, 包括多通道功率分束器、任意分束比功率分束器、多模式功率分束器、宽带功率分束器和多功能功率分束器。除了功能上的考虑因素, 光子器件的加工鲁棒性也是实际应用中需要考虑的关键因素。在实际应用中, 由于不可避免的和随机的加工缺陷, 精确控制纳米结构的加工是一个非常具有挑战性的问题。首先, 离散化的像素型结构的加工鲁棒性相比较轮廓优化结构稍逊一筹, 一方面是由于像素单元结构对光场的随机散射导致性能下降, 另一方面是因为当在加工过程中出现刻蚀过度或者刻蚀不足时, 像素单元结构较多, 对器件整体的性能影响较大。因此, 针对不同功能的器件, 不仅要选择合适的算法进行设计, 而且评估器件的加工容差,

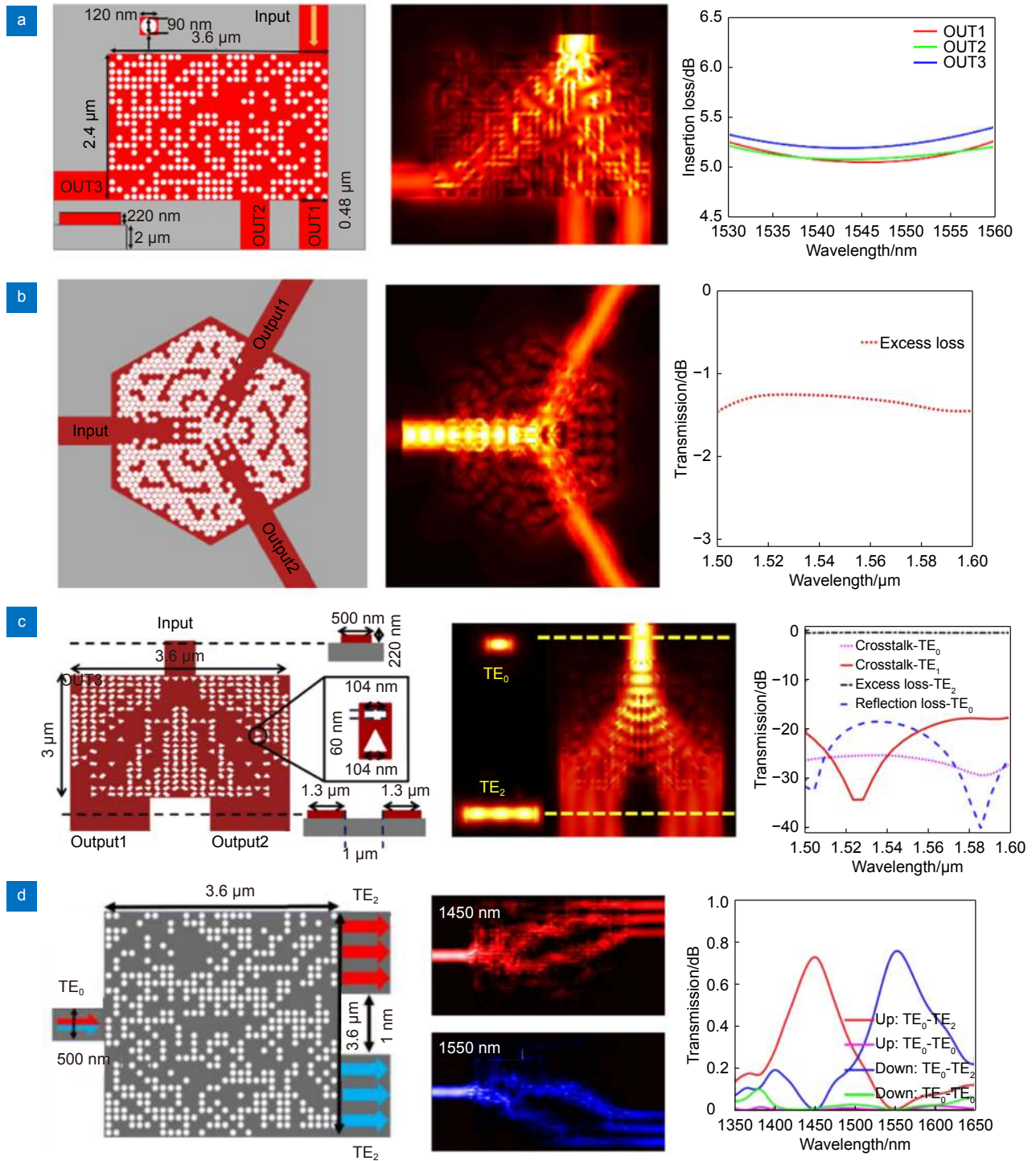


图 11 组合功能功率分束器的结构和性能。(a) 具有不同输出方向的功率分束器^[86]; (b) 任意输入的功率分束器^[100]; (c) 模式转换的功率分束器^[101]; (d) 模式转化和波长解复用的功率分束器^[102]

Fig. 11 Structures and results of the combined-functional power splitters. (a) The power splitter with different output directions^[86]; (b) The power splitter with the arbitrary input waveguides^[100]; (c) The power splitter with the mode conversion^[101]; (d) The power splitter with the mode conversion and wavelength demultiplexing^[102]

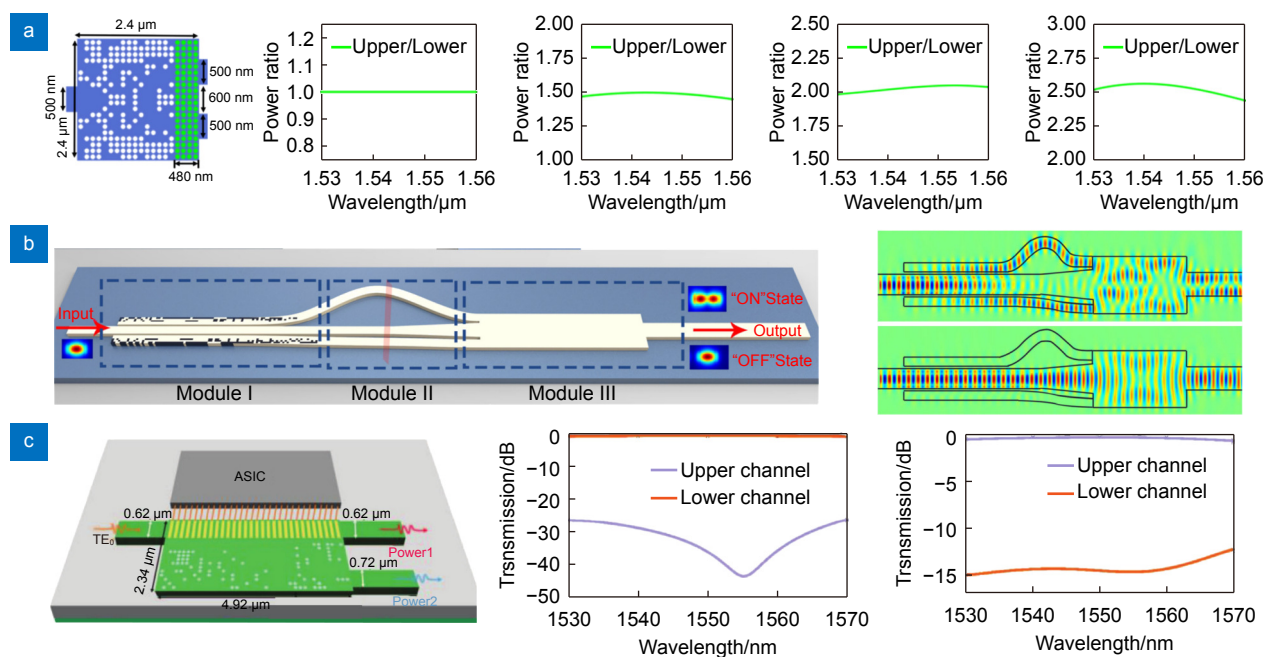


图 12 可调谐功率分束器的结构和性能。(a) 基于 GSST 的可调谐分束比的功率分束器^[72]；(b) 基于 GSST 的可调谐的直通和分束功能的功率分束器^[103]；(c) 基于 Sb₂Se₃ 的可调谐分束比的功率分束器^[104]

Fig. 12 Structures and results of the tunable power splitters. (a) The GST-based power splitter with the reconfigured power ratios^[72]; (b) The GSST-based power splitter with the straight passing and power splitting^[103]; (c) The Sb₂Se₃-based power splitter with the reconfigured power ratios^[104]

精准地控制加工步骤，比如当器件性能受刻蚀过度影响较大时，可以在刻蚀器件之前估计电感耦合等离子体刻蚀的速度，设置适当的刻蚀时间来避免刻蚀过度^[106]。

其次，在逆向设计算法设计阶段也需要在算法中加入正则化的约束来提升加工鲁棒性，常见的方式包括设置最小加工尺寸和最小曲率^[35,107]。最小加工尺寸主要是为了保障加工的可行性，比如将器件的设计区域离散为尺寸在 100 nm×100 nm 以上的像素单元^[63,71,97]；最小曲率主要是为了保障结构侧壁的光滑性，减弱圆角效应、反应离子刻蚀滞后效应等的影响，例如，Lu L 等人采用正方单元中心刻蚀圆孔的方式代替刻蚀正方形孔的方式，优化了一个尺寸为 2.72 μm×2.72 μm，在 60 nm 的带宽范围内每个通道插入损耗小于 3.35 dB 的 1×2 功率分束器^[61]。这种相对独立的圆孔不仅具有光滑的轮廓减弱了加工尖角轮廓带来的圆角效应，而且避免了不等数量的相邻矩形孔合并为随机大小的图案导致的反应离子刻蚀滞后效应。

4 总结和展望

在这篇综述中，我们广泛讨论了逆向设计的硅基片上功率分束器的近期工作，主要包括两部分。在第一部分中，我们概述了逆向设计方法。可以看出，正向设计方法和逆向设计方法虽然有所区别，但是也不是完全孤立的，正向设计的结构可以设置为逆向设计的初始结构，反之，逆向设计可以强化正向设计结构性能。此外，逆向设计算法是逆向设计过程中的关键环节，逆向设计算法各有千秋，需要根据光子器件设计的具体需求进行合适的选择。在第二部分中，我们对逆向设计的硅基片上功率分束器进行了综述，用一些具有代表性的例子分析了采用逆向设计方法设计的各种功率分束器，包括多通道功率分束器、任意分束比功率分束器、多模式功率分束器、宽带功率分束器和多功能功率分束器，并且对加工鲁棒性进行了分析。

硅光子学为功率分束器提供了一个良好的平台。在此平台上，逆向设计为将来实现超紧凑和高性能的纳米光子器件提供了一种很有前途的方法。逆向设计算法各有千秋，如果将多种算法进行结合从而提供更有效的方案那么这对提高器件性能非常有帮助，例如目前已经报道的，将直接二进制搜索算法与深度学习

相结合, 直接二进制搜索算法为深度学习产生更加有效的数据集^[89]; 将伴随方法与直接二进制搜索算法相合, 用直接二进制搜索算法进一步强化基于伴随法设计的器件, 并且提高其加工鲁棒性^[78]。其次, 基于逆向设计的功率分束器在许多实际应用中表现出一些新的趋势。特别是对于可调谐器件, 热光效应的调节机制使得器件尺寸较大, 如果采用逆向设计方法, 那么算法优化过程中时间成本较高, 因此逆向设计的可调谐器件的实现大多是基于可以大幅改变折射率波导折射率的方案, 比如结合硫系相变材料与硅波导的方案。理论设计应该与实验加工相结合。实现基于相变材料的可调谐器件的方案包括相变材料层夹在两个波导之间^[108], 相变材料填充在波导的孔内^[103,105], 相变材料层沉积在波导表面^[52,109]等, 其中, 实验加工可行性最高的是将相变材料层沉积在波导表面的方案, 例如, 通过非对称定向耦合器原理的正向设计方法, Xu P P 等人设计并加工了一个基于 GST 相变材料的 1×2 和 2×2 光开关, 其插入损耗低约 1 dB, 耦合长度约 30 μm, 同时在 30 nm 带宽范围内串扰小于 -10 dB。因此, 结合逆向设计方法和相变材料层沉积在波导表面的方案, 是设计加工超紧凑和低损耗的可调谐功率分束器的一个非常有潜力的途径。再次, 理想的功率分束器期望同时具备多通道、任意分束比、多模式、大带宽和多功能等多种特性; 然而, 这些需求往往具有挑战性, 应该根据具体应用来权衡, 例如, 将多个图 12(a) 中的可调谐分束比的功率分束器串联组合成多通道和可调谐分束比功率分束器。

综上, 尽管目前已经成功开发了如本文所述的多种功率分束器以及其他的光子器件, 硅基光子学的研究还面临很多挑战, 但是我们期望这一新颖的领域能够解决超紧凑、低损耗、大规模 PIC 的一些问题。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Chen Y, Cheng Y K, Zhu R B, et al. Nanoscale all-optical logic devices[J]. *Sci China Phys Mech Astron*, 2019, **62**(4): 44201.
- [2] Reed G T, Mashanovich G, Gardes F Y, et al. Silicon optical modulators[J]. *Nat Photonics*, 2010, **4**(8): 518–526.
- [3] Subbaraman H, Xu X C, Hosseini A, et al. Recent advances in silicon-based passive and active optical interconnects[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(3): 2487–2511.
- [4] Soref R A, Lorenzo J P. Single-crystal silicon: a new material for 1.3 and 1.6 μm integrated-optical Components[J]. *Electron Lett*, 1985, **21**(21): 953–955.
- [5] Soref R A, Bennett B R. Electrooptical effects in silicon[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1987, **23**(1): 123–129.
- [6] Soref R A, Bennett B R. Kramers–Kronig analysis of electro-optical switching in silicon[J]. *Proc SPIE*, 1987, **704**: 32–37.
- [7] Hochberg M, Baehr-Jones T. Towards fabless silicon photonics[J]. *Nat Photonics*, 2010, **4**(8): 492–494.
- [8] Stojanović V, Ram R J, Popović M, et al. Monolithic silicon-photonics platforms in state-of-the-art CMOS SOI processes [Invited][J]. *Opt Express*, 2018, **26**(10): 13106.
- [9] Dong P, Chen Y K, Duan G H, et al. Silicon photonic devices and integrated circuits[J]. *Nanophotonics*, 2014, **3**(4–5): 215–228.
- [10] Zalevsky Z. Integrated micro- and nanophotonic dynamic devices: a review[J]. *J Nanophoton*, 2007, **1**(1): 012504.
- [11] Wang J, Long Y. On-chip silicon photonic signaling and processing: a review[J]. *Sci Bull*, 2018, **63**(19): 1267–1310.
- [12] Xu Q F, Fattal D, Beausoleil R G. Silicon microring resonators with 1.5-μm radius[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(6): 4309–4315.
- [13] Chen P X, Chen S T, Guan X W, et al. High-order microring resonators with bent couplers for a box-like filter response[J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(21): 6304–6307.
- [14] Stern B, Zhu X L, Chen C P, et al. On-chip mode-division multiplexing switch[J]. *Optica*, 2015, **2**(6): 530–535.
- [15] Xu Q F, Schmidt B, Pradhan S, et al. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator[J]. *Nature*, 2005, **435**(19): 325–327.
- [16] Bogaerts W, De Heyn P, van Vaerenbergh T, et al. Silicon microring resonators[J]. *Laser Photonics Rev*, 2012, **6**(1): 47–73.
- [17] Ji Y, Chung Y, Sprinzak D, et al. An electronic Mach-Zehnder interferometer[J]. *Nature*, 2003, **422**(6930): 415–418.
- [18] Shen Y C, Harris N C, Skirlo S, et al. Deep learning with coherent nanophotonic circuits[J]. *Nat Photonics*, 2017, **11**(7): 441–446.
- [19] Harris N C, Steinbrecher G R, Prabhu M, et al. Quantum transport simulations in a programmable nanophotonic processor[J]. *Nat Photonics*, 2017, **11**(7): 447–452.
- [20] Pérez D, Gasulla I, Crudgington L, et al. Multipurpose silicon photonics signal processor core[J]. *Nat Commun*, 2017, **8**(1): 636.
- [21] Xie Y W, Hong S H, Yan H, et al. Low-loss chip-scale programmable silicon photonic processor[J]. *Opto-Electron Adv*, 2023, **6**(3): 220030.
- [22] Xiao Z, Luo X S, Lim P H, et al. Ultra-compact low loss polarization insensitive silicon waveguide splitter[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(14): 16331–16336.
- [23] Uematsu T, Ishizaka Y, Kawaguchi Y, et al. Design of a compact two-mode multi/demultiplexer consisting of multimode interference waveguides and a wavelength-insensitive phase shifter for mode-division multiplexing transmission[J]. *J Lightwave Technol*, 2012, **30**(15): 2421–2426.
- [24] Li Y M, Li C, Li C B, et al. Compact two-mode (de) multiplexer based on symmetric Y-junction and multimode interference waveguides[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(5): 5781–5786.
- [25] Han L S, Liang S, Zhu H L, et al. Two-mode de/multiplexer based on multimode interference couplers with a tilted joint as phase shifter[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(4): 518–521.

- [26] Li C L, Liu D J, Dai D X. Multimode silicon photonics[J]. *Nanophotonics*, 2019, **8**(2): 227–247.
- [27] 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]. *Opt Express*, 2013, **21**(8): 10376–10382.
- [28] Mohammed Z, Paredes B, Rasras M. Compact and broadband silicon TE-pass polarizer based on tapered directional coupler[J]. *Opt Lett*, 2022, **47**(14): 3399–3402.
- [29] Wang J, He S L, Dai D X. On-chip silicon 8-channel hybrid (de) multiplexer enabling simultaneous mode- and polarization-division-multiplexing[J]. *Laser Photonics Rev*, 2014, **8**(2): L18–L22.
- [30] Dai D X, Li C L, Wang S P, et al. 10-channel mode (de)multiplexer with dual polarizations[J]. *Laser Photonics Rev*, 2018, **12**(1): 1700109.
- [31] Greenberg M, Orenstein M. Multimode add-drop multiplexing by adiabatic linearly tapered coupling[J]. *Opt Express*, 2005, **13**(23): 9381–9387.
- [32] Dai D X, Bowers J E. Novel concept for ultracompact polarization splitter-rotator based on silicon nanowires[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(11): 10940–10949.
- [33] Dai D X, Wu H. Realization of a compact polarization splitter-rotator on silicon[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(10): 2346–2349.
- [34] Sacher W D, Barwicz T, Taylor B J F, et al. Polarization rotator-splitters in standard active silicon photonics platforms[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(4): 3777–3786.
- [35] Huang J, Ma H S, Chen D B, et al. Digital nanophotonics: the highway to the integration of subwavelength-scale photonics: ultra-compact, multi-function nanophotonic design based on computational inverse design[J]. *Nanophotonics*, 2021, **10**(3): 1011–1030.
- [36] Lu J, Vučković J. Nanophotonic computational design[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(11): 13351–13367.
- [37] Yao K, Unni R, Zheng Y B. Intelligent nanophotonics: merging photonics and artificial intelligence at the nanoscale[J]. *Nanophotonics*, 2019, **8**(3): 339–366.
- [38] Ma L F, Li J, Liu Z H, et al. Intelligent algorithms: new avenues for designing nanophotonic devices[J]. *Chin Opt Lett*, 2021, **19**(1): 011301.
- [39] Qi H X, Du Z C, Hu X Y, et al. High performance integrated photonic circuit based on inverse design method[J]. *Opto-Electron Adv*, 2022, **5**(10): 210061.
- [40] Jiang J Q, Chen M K, Fan J A. Deep neural networks for the evaluation and design of photonic devices[J]. *Nat Rev Mater*, 2021, **6**(8): 679–700.
- [41] So S, Badloe T, Noh J, et al. Deep learning enabled inverse design in nanophotonics[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(5): 1041–1057.
- [42] Ma T G, Tobah M, Wang H Z, et al. Benchmarking deep learning-based models on nanophotonic inverse design problems[J]. *Opto-Electron Sci*, 2022, **1**(1): 210012.
- [43] Wang N, Yan W, Qu Y R, et al. Intelligent designs in nanophotonics: from optimization towards inverse creation[J]. *PhotonIX*, 2021, **2**(1): 22.
- [44] Huang J, Yang J B, Chen D B, et al. Implementation of on-chip multi-channel focusing wavelength demultiplexer with regularized digital metamaterials[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(1): 159–166.
- [45] Liu Z H, Liu X H, Xiao Z Y, et al. Integrated nanophotonic wavelength router based on an intelligent algorithm[J]. *Optica*, 2019, **6**(10): 1367–1373.
- [46] Khoram E, Qian X P, Yuan M, et al. Controlling the minimal feature sizes in adjoint optimization of nanophotonic devices using b-spline surfaces[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(5): 7060–7069.
- [47] Han J M, Huang J, Wu J G, et al. Inverse designed tunable four-channel wavelength demultiplexer[J]. *Opt Commun*, 2020, **465**: 125606.
- [48] 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]. *Nat Photonics*, 2017, **9**(6): 378–382.
- [49] Chang W J, Xu S Y, Cheng M F, et al. Inverse design of a single-step-etched ultracompact silicon polarization rotator[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(19): 28343–28351.
- [50] Ma H S, Du T, Zhang Z J, et al. Inverse design of an air-cladding and fully-etched silicon polarization rotator based on a taper-based mode hybridization[J]. *Opt Commun*, 2023, **526**: 128912.
- [51] Lu C C, Liu Z H, Wu Y, et al. Nanophotonic polarization routers based on an intelligent algorithm[J]. *Adv Opt Mater*, 2020, **8**(10): 1902018.
- [52] Ma H S, Luo M Y, He J, et al. Inverse design of nonvolatile reconfigurable mode generator and optical circulator based on a novel concept of a fully-digitized module[J]. *J Lightwave Technol*, 2022, **40**(24): 7869–7878.
- [53] 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 Res*, 2021, **9**(6): B247–B252.
- [54] Zhou H L, Wang Y L, Gao X Y, et al. Dielectric metasurfaces enabled ultradensely integrated multidimensional optical system[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(4): 2100521.
- [55] Xie H C, Liu Y J, Wang S, et al. Highly compact and efficient four-mode multiplexer based on pixelated waveguides[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2020, **32**(3): 166–169.
- [56] Han H L, Li H, Zhang X P, et al. High performance ultra-compact SOI waveguide crossing[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(20): 25602–25610.
- [57] Lu L L Z, Zhang M M, Zhou F Y, et al. Inverse-designed ultra-compact star-crossings based on PhC-like subwavelength structures for optical intercross connect[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(15): 18355–18364.
- [58] Liu Y J, Xu K, Wang S, et al. Arbitrarily routed mode-division multiplexed photonic circuits for dense integration[J]. *Nature Communications*, 2019, **10**(1): 3263.
- [59] Chang W J, Lu L L Z, Ren X S, et al. Ultracompact dual-mode waveguide crossing based on subwavelength multimode-interference couplers[J]. *Photonics Res*, 2018, **6**(7): 660–665.
- [60] Ma H S, Huang J, Zhang K W, et al. Arbitrary-direction, multichannel and ultra-compact power splitters by inverse design method[J]. *Opt Commun*, 2020, **462**: 125329.
- [61] Lu L, Liu D M, Zhou F Y, et al. Inverse-designed single-step-etched colorless 3 dB couplers based on RIE-lag-insensitive PhC-like subwavelength structures[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(21): 5051–5054.
- [62] Kim J, Kim J Y, Yoon J, et al. Experimental demonstration of inverse-designed silicon integrated photonic power splitters[J]. *Nanophotonics*, 2022, **11**(20): 4581–4590.
- [63] Xu K, Liu L, Wen X, et al. Integrated photonic power divider with arbitrary power ratios[J]. *Opt Lett*, 2017, **42**(4): 855–858.
- [64] Gamet J, Pandraud G. Ultralow-loss 1×8 splitter based on

- field matching Y junction[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2004, **16**(9): 2060–2062.
- [65] Tao S H, Fang Q, Song J F, et al. Cascade wide-angle Y-junction 1×16 optical power splitter based on silicon wire waveguides on silicon-on-insulator[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(26): 21456–21461.
- [66] Luo Y C, Yu Y, Ye M Y, et al. Integrated dual-mode 3 dB power coupler based on tapered directional coupler[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 23516.
- [67] Huang W P. Coupled-mode theory for optical waveguides: an overview[J]. *J Opt Soc Am A-Opt Image Sci Vis*, 1994, **11**(3): 963–983.
- [68] Yao R K, Li H X, Zhang B H, et al. Compact and low-insertion-loss $1 \times N$ power splitter in silicon photonics[J]. *J Lightwave Technol*, 2021, **39**(19): 6253–6259.
- [69] Sheng Z, Wang Z Q, Qiu C, et al. A compact and low-loss MMI coupler fabricated with CMOS technology[J]. *IEEE Photonics J*, 2012, **4**(6): 2272–2277.
- [70] Xie H C, Liu Y J, Wang Y H, et al. An ultra-compact 3-dB power splitter for three modes based on pixelated meta-structure[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2020, **32**(6): 341–344.
- [71] Wang Z C, Peng Z, Zhang Y Q, et al. 93-THz ultra-broadband and ultra-low loss Y-junction photonic power splitter with phased inverse design[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(10): 15904–15916.
- [72] Yuan H, Wu J G, Zhang J P, et al. Non-volatile programmable ultra-small photonic arbitrary power splitters[J]. *Nanomaterials*, 2022, **12**(4): 669.
- [73] Jiang X P, Yuan H, Chen D B, et al. Metasurface based on inverse design for maximizing solar spectral absorption[J]. *Adv Opt Mater*, 2021, **9**(19): 2100575.
- [74] Yu Z J, Cui H R, Sun X K. Genetically optimized on-chip wideband ultracompact reflectors and Fabry–Perot cavities[J]. *Photonics Res*, 2017, **5**(6): B15–B19.
- [75] Zhang Y, Yang S Y, Lim A E J, et al. A compact and low loss Y-junction for submicron silicon waveguide[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(1): 1310.
- [76] Goudarzi K, Lee M. Inverse design of a binary waveguide crossing by the particle swarm optimization algorithm[J]. *Results Phys*, 2022, **34**: 105268.
- [77] Liang W, Chen W W, Wang P J, et al. Non-volatile polarization-insensitive 1×2 silicon optical switch using phase-change materials[J]. *Opt Commun*, 2021, **479**: 126407.
- [78] Peng Z, Feng J B, Du T, et al. Series of ultra-low loss and ultra-compact multichannel silicon waveguide crossing[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(15): 27366–27380.
- [79] Lalau-Keraly C M, Bhargava S, Miller O D, et al. Adjoint shape optimization applied to electromagnetic design[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(18): 21693–21701.
- [80] Wang K Y, Ren X S, Chang W J, et al. Inverse design of digital nanophotonic devices using the adjoint method[J]. *Photonics Res*, 2020, **8**(4): 528–533.
- [81] Huang J, Yang J B, Chen D B, et al. Ultra-compact broadband polarization beam splitter with strong expansibility[J]. *Photonics Res*, 2018, **6**(6): 574–578.
- [82] Michaels A, Yablonovitch E. Leveraging continuous material averaging for inverse electromagnetic design[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(24): 31717–31737.
- [83] Lebbe N, Glière A, Hassan K. High-efficiency and broadband photonic polarization rotator based on multilevel shape optimization[J]. *Opt Lett*, 2019, **44**(8): 1960–1963.
- [84] Bendsøe M P, Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method[J]. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 1988, **71**(2): 197–224.
- [85] Wu C M, Yu H S, Lee S, et al. Programmable phase-change metasurfaces on waveguides for multimode photonic convolutional neural network[J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 96.
- [86] 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.
- [87] Meng C, Qiu J F, Tian Y, et al. A broadband compact 1×3 power splitter designed with inverse design method[C]// *Proceedings of the 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, 2016. <https://doi.org/10.1109/icoon.2016.7875589>.
- [88] Fujisawa T, Saitoh K. Bayesian direct-binary-search algorithm for the efficient design of mosaic-based power splitters[J]. *OSA Continuum*, 2021, **4**(4): 1258–1270.
- [89] Tahersima M H, Kojima K, Koike-Akino T, et al. Deep neural network inverse design of integrated photonic power splitters[J]. *Sci Rep*, 2019, **9**(1): 1368.
- [90] Chang W J, Lu L L Z, Liu D M, et al. An ultra-compact colorless dual-mode 3 dB power splitter based on axisymmetrical subwavelength structure[C]// *CLEO: Science and Innovations 2018*, 2018: JW2A. 47. https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2018.JW2A.47.
- [91] Guo Z Z, Xiao J B. Silicon-based Ultracompact TE-Pass/TM-Stop power divider using subwavelength gratings assisted with segmented hybrid plasmonic horizontal slot waveguides[J]. *J Lightwave Technol*, 2017, **35**(19): 4329–4336.
- [92] Chen Y F, Zhang J, Zhu M, et al. Ultra-compact and broadband all-silicon TM-pass power splitter using subwavelength holey-structured metamaterial waveguides[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(25): 44604–44616.
- [93] Liu Y J, Wang Z, Liu Y L, et al. Ultra-compact mode-division multiplexed photonic integrated circuit for dual polarizations[J]. *J Lightwave Technol*, 2021, **39**(18): 5925–5932.
- [94] Chen W W, Lin J, Li H X, et al. Broadband multimode 3 dB optical power splitter using tapered couplers[J]. *Optics Express*, 2022, **30**(26): 46236–46247.
- [95] Xie H C, Liu Y J, Sun W Z, et al. Inversely designed 1×4 power splitter with arbitrary ratios at 2- μm spectral band[J]. *IEEE Photonics J*, 2018, **10**(4): 2700506.
- [96] Piggott A Y, Petykiewicz J, Su L, et al. Fabrication-constrained inverse design of a broadband 3-way power splitter[Z]. arXiv: 1612.03222, 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.03222>.
- [97] Xu J F, Liu Y J, Guo X Y, et al. Inverse design of a dual-mode 3-dB optical power splitter with a 445 nm bandwidth[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(15): 26266–26274.
- [98] Tang Y H, Kojima K, Koike-Akino T, et al. Generative deep learning model for a multi-level Nano-optic broadband power splitter[C]// *2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2020: Th1A. 1. <https://doi.org/10.1364/OFC.2020.Th1A.1>.
- [99] Piggott A Y, Lu J, Babinec T M, et al. Inverse design and implementation of a wavelength demultiplexing grating coupler[J]. *Sci Rep*, 2015, **4**: 7210.
- [100] Ma H S, Huang J, Zhang K W, et al. Inverse-designed arbitrary-input and ultra-compact $1 \times N$ power splitters based on high

- symmetric structure[J]. *Sci Rep*, 2020, **10**: 11757.
- [101] Ma H S, Huang J, Yang J B, et al. Ultra-compact and efficient 1×2 mode converters based on rotatable direct-binary-search algorithm[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(11): 17010–17019.
- [102] Yuan H, Huang J, Wang Z H, et al. An ultra-compact dual-channel multimode wavelength demultiplexer based on inverse design[J]. *Results Phys*, 2021, **27**: 104489.
- [103] Chen H X, Jia H, Wang T, et al. Broadband nonvolatile tunable mode-order converter based on silicon and optical phase change materials hybrid meta-structure[J]. *J Lightwave Technol*, 2020, **38**(7): 1874–1879.
- [104] Yuan H, Wang Z C, Peng Z, et al. Ultra-compact and nonvolatile nanophotonic neural networks[J]. *Adv Opt Mater*, 2023.
- [105] Su Y X, Liu D M, Zhang M M. Sb₂Se₃-assisted reconfigurable broadband Y-junction[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(22): 40379–40388.
- [106] Chang W J, Lu L L Z, Ren X S, et al. Ultra-compact mode (de)multiplexer based on subwavelength asymmetric Y-junction[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(7): 8162–8170.
- [107] Piggott A Y, Petykiewicz J, Su L, et al. Fabrication-constrained nanophotonic inverse design[J]. *Sci Rep*, 2017, **7**(1): 1786.
- [108] Liang H B, Soref R, Mu J W, et al. Simulations of silicon-on-Insulator channel-waveguide electrooptical 2×2 switches and 1×1 modulators using a Ge₂Sb₂Te₅ self-holding layer[J]. *J Lightwave Technol*, 2015, **33**(9): 1805–1813.
- [109] Xu P P, Zheng J J, Doyle J K, et al. Low-loss and broadband nonvolatile phase-change directional coupler switches[J]. *ACS Photonics*, 2019, **6**(2): 553–557.

作者简介



马汉斯(1992-), 男, 硕士, 博士研究生, 研究方向为基于智能算法的硅基片上微纳光电器件。攻读硕博期间, 在 *Nanophotonics*、*Journal of Lightwave Technology*、*Optics Express* 等期刊共发表 SCI 论文 8 篇, 授权实用新型专利 5 项。

E-mail: mahansi21@nudt.edu.cn



【通信作者】杨俊波(1974-), 男, 国防科技大学研究员, 教育部新世纪优秀人才。主持国家 863 项目、国家自然科学基金等项目 20 余项。以第一/通讯作者发表 SCI/EI 收录论文共计 170 余篇, 研究成果进入 ESI 前 1%, 研究领域包括光信息处理、光通信与光互连、微纳光电子与芯片设计、表面等离子激元与超材料、纳米技术与二维材料等。研究成果入选中国光学重要成果。

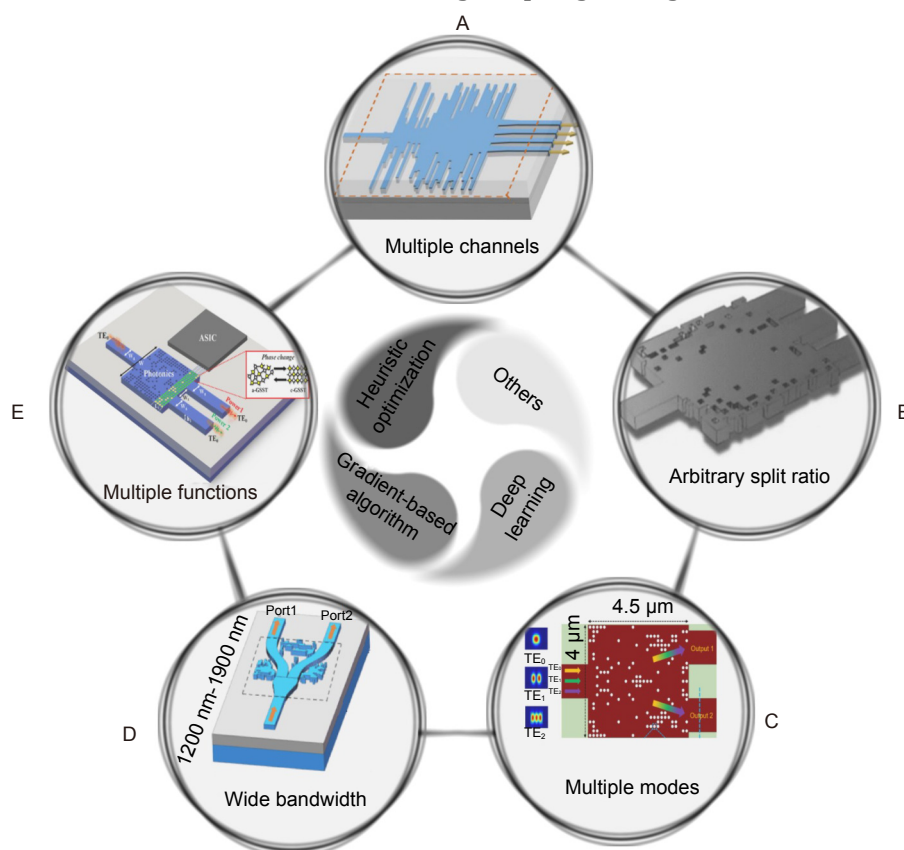
E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Inverse-designed silicon-based on-chip power splitters

Ma Hansi^{1,2}, Du Te¹, Jiang Xinpeng¹, Yang Junbo^{1*}



Summary of the inverse-designed power splitters.

Overview: The photonic integrated circuits (PICs) have been widely accepted as a viable alternative to support futuristic data communication networks. Specifically, silicon photonics offer a more promising and attractive platform to address the growing demands for optical communications due to its unique combination of low fabrication costs, low power consumption, compact footprint, and compatibility with mature complementary metal oxide semiconductor processes. The silicon-based on-chip nanophotonic devices are becoming fundamental building blocks of the complex PICs. The device-design methods can be roughly divided into the forward design and inverse design methods. The forward design method, a mechanism-orientation method, relying on the intuition, experience, and physical effect, usually finds the good device performance by tuning small sets of the characteristic parameters. While remarkable success has been accomplished using the forward design method, the trial-and-error procedure of this method becomes computationally costly and time-inefficient due to the continuously increasing complexity of the nanophotonic devices. In addition, limited by the small parameter search space of the forward-designed nanophotonic device, the device generally occupies a large footprint and has a limited performance. Driven by the increasing demands for the high-

Foundation item: Project supported by the National Natural Science Foundation of China (60907003, 61805278, 12272407, 62275269, 62275271), the National Key R&D Program of China (2022YFF0706005), the China Postdoctoral Science Foundation (2018M633704), the Foundation of NUDT (JC13-02-13, ZK17-03-01), the Hunan Provincial Natural Science Foundation of China (13JJ3001), and the Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-12-0142).

¹Center of Material Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China; ²Institute for Quantum Information & State Key Laboratory of High Performance Computing, College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

* E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn

density PICs in the practical applications, great progress has been made in the research of the inverse design method. The inverse design method, an objective-orientation method, has been proposed to overcome the shortcomings of the forward design method. The nanophotonic device with the compact footprint and low loss can be designed automatically by the inverse design method. The inverse design method provides a new avenue for the realization of photonic chips. The silicon-based on-chip power splitter has much wider scope of applications such as feedback circuits, tap-port power monitoring, and optical quantization. As a result, the power splitter has been attracting more and more attention in recent years. Although the forward-designed power splitters have good performances, their large footprints limit their further applications in the high-density and large-scale PICs. Inverse-designed silicon-based on-chip power splitters featuring compact footprint, low loss, multiple channels, and flexible functions, has become the key building block for realizing the high-density optical system. In this review, we outline the differences and connections between the forward design and inverse design methods, and classify the inverse design algorithms. In addition, we summarize the representative inverse-designed silicon-based on-chip power splitters in recent years, including multichannel power splitters, arbitrary-split-ratio power splitters, multimode power splitters, broadband power splitters, and multifunction power splitters. Finally, the summary and outlook are made on the development trend of the inverse design algorithms and the inverse-designed power splitters.

Ma H S, Du T, Jiang X P, et al. Inverse-designed silicon-based on-chip power splitters[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(7): 230086; DOI: [10.12086/oe.2023.230086](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230086)