

基于直接二进制搜索算法的硅基片上光子器件

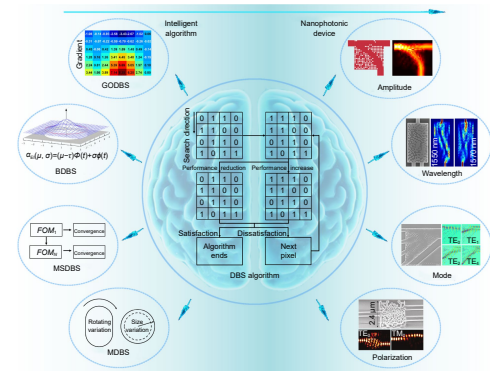
马汉斯^{1,2*}, 林振¹, 陈宇泰², 冉冲冲^{2,3},
陈欢², 杨静⁴, 杨俊波^{2*}, 吴加贵^{3*}

¹ 湖南工商大学微电子与物理学院, 湖南 长沙 410205;

² 国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073;

³ 西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715;

⁴ 襄阳职业技术学院, 湖北 襄阳 441050



摘要: 作为逆向设计算法的典型代表, 直接二进制搜索算法凭借其原理直观简单、收敛速度快、加工鲁棒性好等优势, 已经广泛应用于各类光子器件的设计。本文剖析了直接二进制搜索算法的核心机制与设计流程, 梳理了其改进方向与完善策略, 探讨了其在光信号振幅、波长、模式、偏振等多物理维度调控中的典型应用, 并展望了未来研究的可能发展趋势, 以期为相关研究提供有价值的参考, 推动逆向设计在光子芯片设计领域的进一步探索与应用。

关键词: 逆向设计; 光子器件; 直接二进制搜索算法; 多物理维度

中图分类号: TN491

文献标志码: A

马汉斯, 林振, 陈宇泰, 等. 基于直接二进制搜索算法的硅基片上光子器件[J]. 光电工程, 2025, 52(11): 250157

Ma H S, Lin Z, Chen Y T, et al. Silicon-based on-chip optical devices based on direct binary search algorithm[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(11): 250157

Silicon-based on-chip optical devices based on direct binary search algorithm

Ma Hansi^{1,2*}, Lin Zhen¹, Chen Yutai², Ran Chongchong^{2,3}, Chen Huan²,
Yang Jing⁴, Yang Junbo^{2*}, Wu Jiagui^{3*}

¹ School of Microelectronics and Physics, Hunan University of Technology and Business, Changsha, Hunan 410205, China;

² Department of Physics, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

³ School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

⁴ Xiangyang Polytechnic, Xiangyang, Hubei 441050, China

Abstract: As a typical representative of inverse design algorithms, the direct binary search algorithm has been widely used in the design of various optical devices due to its simple principle, fast convergence speed, and high

收稿日期: 2025-05-28; 修回日期: 2025-07-14; 录用日期: 2025-07-24; 网络出版日期: 2025-11-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFF0706005); 国家自然科学基金 (61805278, 12272407, 62275269, 62275271, 62305387); 中国博士后科学基金 (2018M633704); 国防科技大学基金 (ZK23-03); 湖南省自然科学基金 (2023JJ40683, 2022JJ40552, 2020JJ5646, 2023JJ40223, 2024JJ6184); 湖北省自然科学基金 (2024AFB525); 湖南省研究生创新基金 (CX20230009); 国防科技大学高性能计算国家重点实验室 (202201-12); 湖南省教育厅科研基金 (24B0575, 22B0655)

*通信作者: 马汉斯, mahansi2024@163.com; 杨俊波, yangjunbo@nudt.edu.cn; 吴加贵, mgh@swu.edu.cn

版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

fabrication robustness. This article analyzes the core mechanism and design process of the direct binary search algorithm, sorts out its improvement directions and strategies, focuses on its typical applications in multiple physical dimensions of optical-signal amplitude, wavelength, mode, and polarization, and looks forward to the possible development trends of future research, in order to provide valuable references for related research and promote further inverse-design exploration and application in the photonic-chip field.

Keywords: inverse design; optical devices; direct binary search algorithm; multiple physical dimensions

1 引言

近年来,人工智能、区块链、大数据、物联网等数字经济的迅猛发展^[1-4],持续推动数据中心和高性能计算需求呈现指数级增长。尽管传统电互连技术为现代计算架构奠定了重要基础,但其受有限带宽和较大功耗制约,难以满足持续增长的计算容量需求。在此背景下,光互连技术经过几十年的技术验证已展现出一定的技术替代价值^[5-7]。当前主流光子集成材料平台主要包括绝缘体上硅(silicon on insulator, SOI)、氮化硅、铌酸锂等体系^[8-10]。其中,SOI平台凭借其互补金属氧化物半导体制造工艺的先天兼容性,以及独特的高折射率对比度优势,成功确立了其在高密度光子器件集成领域中的核心地位。因此,硅基光子集成电路展现出了革命性应用潜力^[11-12]。

硅基片上光子器件作为光子集成电路的核心构建单元,其设计方法主要划分为正向设计与逆向设计两大类。从技术演进脉络分析,正向设计方法作为传统设计方法,根据原理、机制、模型等为光子器件的设计过程提供指导,是“结构-目标”的优化路径。经过长期的积累,正向设计已经取得了巨大的成功,构建了包含Y分支^[13-14]、多模干涉耦合器(multimode interference coupler, MMI)^[15-16]、非对称定向耦合器(asymmetric directional coupler, ADC)^[17-18]等典型结构的标准化设计模板库,为光子器件的设计提供了成熟的设计体系。为了光子芯片向智能化设计范式转型,逆向设计方法应运而生。这种方法与传统的正向设计方法截然不同,其通过建立物理响应与数学空间的映射关系,实现“目标-结构”的逆向设计流程^[19-21]。逆向设计方法凭借其人工依赖低、自由度高、适用性广等优势,更契合光通信系统的小体积、高容量、集成化的发展需求。

逆向设计方法以功能目标为导向,依托智能算法的迭代优化实现光与物质相互作用的精细调控。在此优化流程中,逆向设计算法扮演着举足轻重的角色,

发挥着关键的作用。逆向设计算法可以分为无梯度算法、梯度算法、深度学习三大类^[22-24]。无梯度算法是从自然规律或者直观经验启发而来的算法,典型代表包括直接二进制搜索(direct binary search, DBS)算法^[25-27]、遗传算法^[28-30]、粒子群优化算法^[31-33]等。这类算法的核心优势在于其原理简单易懂,易于实现和操作。梯度算法则是基于优化参数与介电常数之间的梯度信息进行优化的算法,常见的有目标优先算法^[34-36]、伴随算法^[37-39]、拓扑优化算法^[40-42]等。该类算法的主要优势在于收敛速度快,优化时间成本低。深度学习是通过非线性模型实现的表示学习技术,主要包括全连接神经网络、卷积神经网络、图神经网络等^[43-45]。这类算法建立输入与输出之间的复杂映射关系,具备强大的学习和预测能力。各类算法均具有其独特的优势,为器件结构的逆向设计提供了多样化的解决方案。

作为无梯度优化算法的典型代表,DBS算法通过设置一定的约束条件搜寻离散空间参数的局部最优解。该算法原理直观,无需梯度计算降低实现复杂度;收敛效率优于随机搜索与遍历搜索,尤其适用于超紧凑光子器件;加工鲁棒性好,源自于其离散化搜索策略。基于这些特性,DBS已经广泛应用于设计各类光子器件。另一方面,在物理层面上的光信号处理包括5个维度,分别是时间、振幅、波长、空间、偏振^[46],分别对应的技术是时分复用^[47]、正交振幅调制^[48]、波分复用^[49]、空分复用^[50]以及偏振复用^[51]。硅基片上光子器件的设计主要集中在对后4类的应用上。因此,本文针对硅基片上光子器件在振幅、波长、模式、偏振四大核心操控维度上的设计需求,梳理了DBS算法在相关光子器件领域的研究进展(图1)。

本文共包含4节,第1节为引言,系统论述DBS算法的优势及其在硅基片上光子器件设计中的应用;第2节详细梳理DBS算法自提出以来的关键优化方向与阶段性完善策略;第3节重点探讨DBS算法在光信号振幅、波长、模式、偏振调控中的技术实现

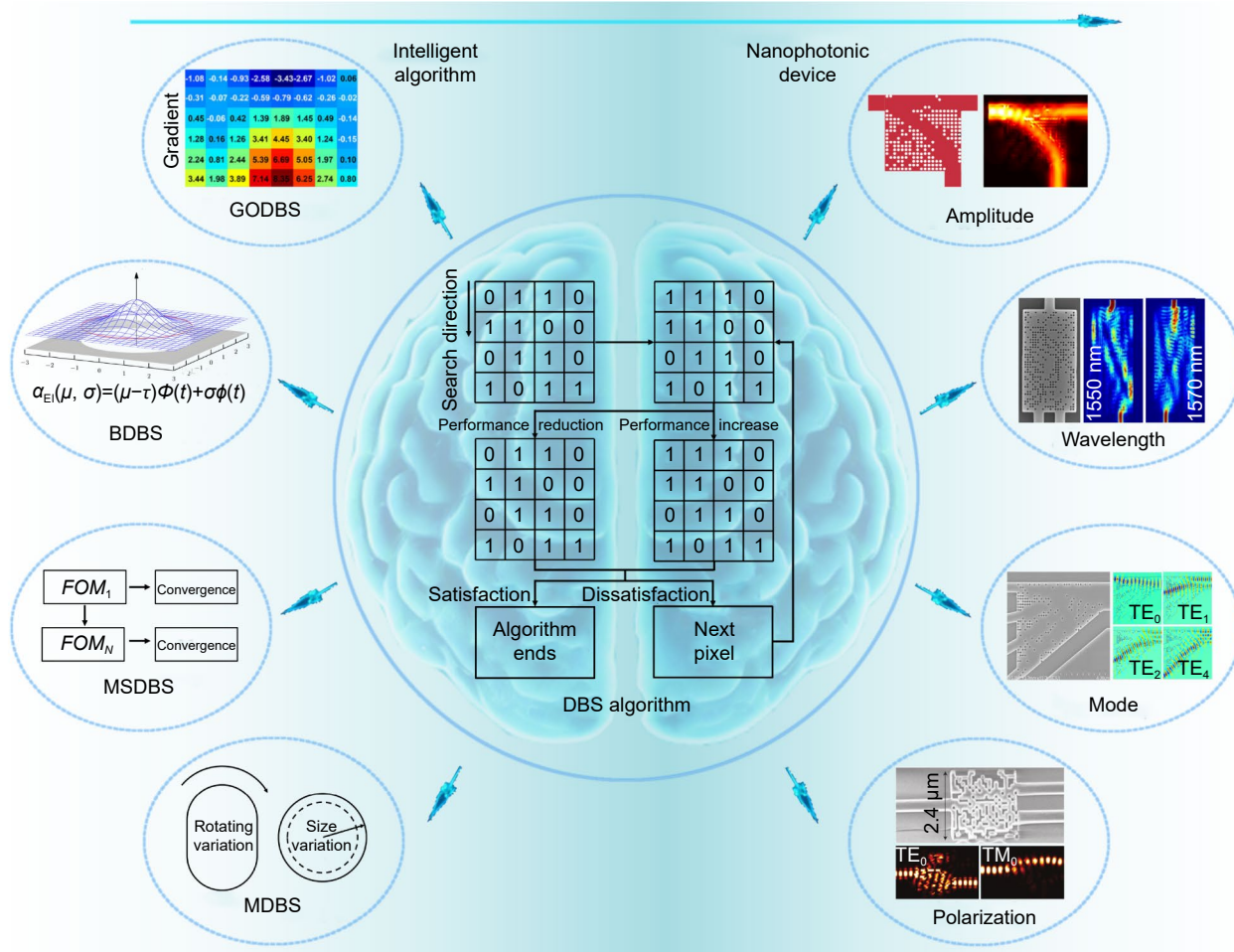


图 1 DBS 算法及其应用概述

Fig. 1 Overview of the DBS algorithm and its applications

方法；第 4 节总结 DBS 算法在光子器件优化设计中的贡献，同时展望光子集成芯片设计中的潜在发展方向。

2 DBS 算法及其发展

DBS 算法最早由美国普渡大学 Seldowitz 等在 1987 年提出，并首次应用于计算机生成全息图领域^[52]。其核心思想是通过约束性搜索，对二进制全息图的像素分布与目标重建效果进行匹配，最终生成满足预设最优性准则的二值全息图。这一开创性工作为后续算法的跨领域应用奠定了基础。后来，DBS 算法逐步拓展至太阳能电池^[53]、三维计算成像^[54]等领域。至 2014 年，犹他大学 Shen 等将 DBS 成功引入硅基片上光子器件设计领域，先后研制出超材料偏振器^[55]和自由空间-波导耦合器^[56]，从而显著提升了该算法在硅基光子学领域的应用潜力和应用价值。在 2015

年，该团队进一步报道了基于 DBS 算法设计的超紧凑偏振分束器，其器件尺寸仅为 $2.4\ \mu\text{m} \times 2.4\ \mu\text{m}$ ，为超紧凑的硅基片上光子器件的优化问题提供了新范式^[57]。

随着逆向设计需求的日益增长，DBS 算法在时间成本、仿真次数、收敛效率、搜索自由度等方面逐渐暴露出其局限性。首先，对于尺寸较大、参数众多的结构，该算法优化过程时间成本较高，难以满足快速设计的需求；其次，该算法对每个离散参数都要进行一次仿真计算，使得仿真次数过多，极大地消耗了计算资源；再次，受约束性搜索条件的限制，该算法容易过早地陷入局部最优解，无法充分地探索完整参数空间；最后，单一维度的优化策略直接导致该算法的搜索自由度大幅受限，难以充分挖掘算法的搜索潜力。为了突破这些挑战，研究者们陆续发展出了梯度导向直接二进制搜索 (gradient-oriented direct binary search, GODBS) 算法、贝叶斯直接二进制搜索

(Bayesian direct binary search, DBBS) 算法、多阶段直接二进制搜索 (multi-step direct binary search, MSDBS) 算法、多维度直接二进制搜索 (multidimensional direct binary search, MDBS) 算法等。这些算法在光子器件的逆向设计领域中, 凭借其独特的优化机制, 展现出了显著的优势, 为光子器件的逆向设计提供了更高效、更可靠的解决方案。

2.1 DBS 算法

DBS 算法的核心思想是通过设置一定的约束条件搜寻离散空间参数的局部最优解, 算法流程如图 2 所示。首先, 通过随机生成或人工预设方式确定光子器件的初始拓扑结构, 并将其离散化为由 $M \times N$ 个正方形像素单元构成的二维阵列, 其中每个像素单元具有二值化材料状态, 通常表示为 0 或 1。其次, 从指定起始像素单元开始, 执行材料状态切换操作, 即 $0 \rightarrow 1$ 或 $1 \rightarrow 0$, 并计算品质因子 (figure of merit, FOM) 以量化评估器件性能。如果器件的性能得到提升, 就保存当前像素的材料状态, 否则, 保存上一次的材料状态。为提升搜索效率, 算法通常施加空间遍历约束条件, 例如, 限定像素单元的遍历顺序为逐行扫描或逐列扫描。当完成全像素阵列的单次遍历后, 记为一次完整迭代。通过重复执行上述迭代过程, 直到器件性能不继续提升, 则判定算法达到局部最优解并终止计算。

从 DBS 算法的流程分析可知, 初始结构在算法优化过程中扮演着关键角色, 其合理性甚至直接决定了最终器件性能的优劣。华中科技大学的张敏明教授团队^[58], 以及国防科技大学的杨俊波研究员团队^[59], 根据等效介质理论和亚波长波导等效折射率模型, 深入构建了逆向设计算法的等效理论框架, 显著提升了算法的收敛速度与优化效率, 为可预测、目标导向的逆向设计提供了理论支撑。对于 DBS 算法来说, 可以通过随机生成或人工预设方式确定光子器件的初始结构。比较而言, 人工预设初始结构通过引入等效理论模型, 在优化初期即赋予算法明确的物理导

向, 其优化效果显著优于纯随机生成初始结构。不同功能光子器件的初始结构需根据其物理机制差异化设计, 例如, 模分复用器、偏振分束器、交叉波导等光子器件分别可以采用 Y 分支结构、ADC 结构、波导结构等效理论模型来作为算法优化的初始结构^[58-60], 如图 3(a-c) 所示。值得注意的是, 相同功能器件可能存在多种等效理论模型。例如, 交叉波导除上述波导直交结构外, 还可采用如图 3(d) 所示的 MMI 模型^[61]。

在 DBS 算法优化光子器件的过程中, 器件的设计区域通常会被离散为若干个正方形的像素单元, 其尺寸一般为 $100 \text{ nm} \times 100 \text{ nm}$ 左右, 符合实际加工精度的需求。在仿真过程中, 由于 DBS 算法本身的随机性特征, 往往会出现多个相邻像素单元材料属性相同的情况。如图 4(a) 所示, 这些由不同数量相同材料像素单元相互连接所形成的刻蚀图案, 呈现出形状随机、尺寸各异的特点。在实际的光刻加工刻蚀环节, 反应腔内的大量等离子体以散射的方式抵达器件表面。对于特征尺寸较大的图形区域, 反应离子在到达器件表面后, 有更高的概率与图形底部发生碰撞, 进而引发刻蚀反应, 因此其刻蚀速率相对较快。与之相反, 对于特征尺寸较小的图形区域, 反应离子与底部碰撞的概率降低, 导致刻蚀速率相对较慢。这种不同尺寸图形刻蚀速率差异所导致的结果是, 尺寸较大的图案在刻蚀过程中会形成较大的刻蚀深度, 而尺寸较小的图案刻蚀深度则相对较小, 如图 4(b) 所示。这种现象本质上是由迟滞效应所引发的加工误差, 它会对光子器件的性能和制造精度产生不可忽视的影响^[62]。在 2016 年, 华中科技大学的 Lu 等^[63] 提出了一种新型的光子晶体亚波长结构, 如图 4(c) 所示, 该结构以中心位置带有圆形的正方形为基本像素单元, 正方形的尺寸一般为 $120 \text{ nm} \times 120 \text{ nm}$, 圆形的直径一般为 90 nm 。当相邻的像素单元均处于刻蚀状态时, 只有中心圆形被刻蚀, 由于圆形之间相互独立, 避免了融合成形态各异的刻蚀图案。类光子晶体亚波长结构的

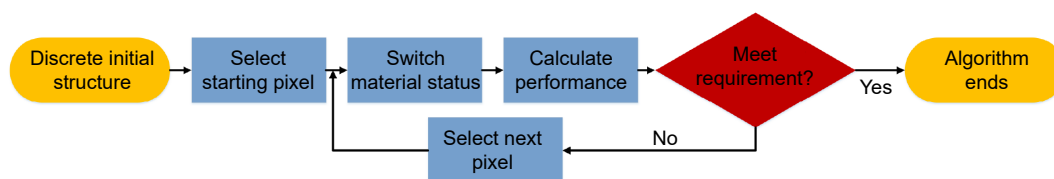


图 2 DBS 算法流程

Fig. 2 DBS algorithm flowchart

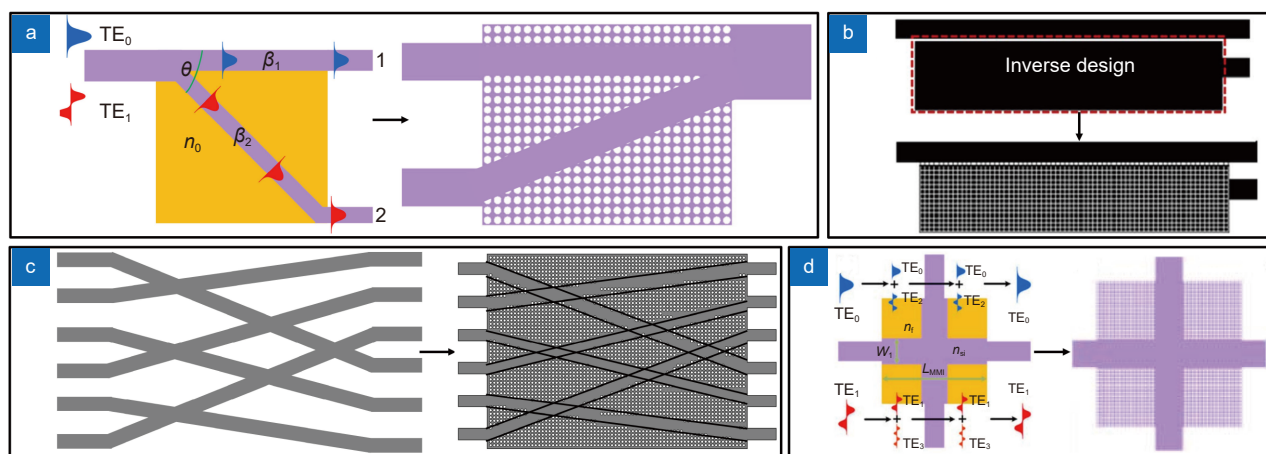


图 3 等效理论模型。(a) 模分复用器的 Y 分支模型^[58]; (b) 偏振分束器的 ADC 模型^[59]; (c) 交叉波导的波导模型^[60]; (d) 交叉波导的 MMI 模型^[61]

Fig. 3 Equivalent theoretical models. (a) Y-branch model of division multiplexer^[58]; (b) ADC model of polarization beam splitter^[59]; (c) Waveguide model of waveguide crossing^[60]; (d) MMI model of waveguide crossing^[61]

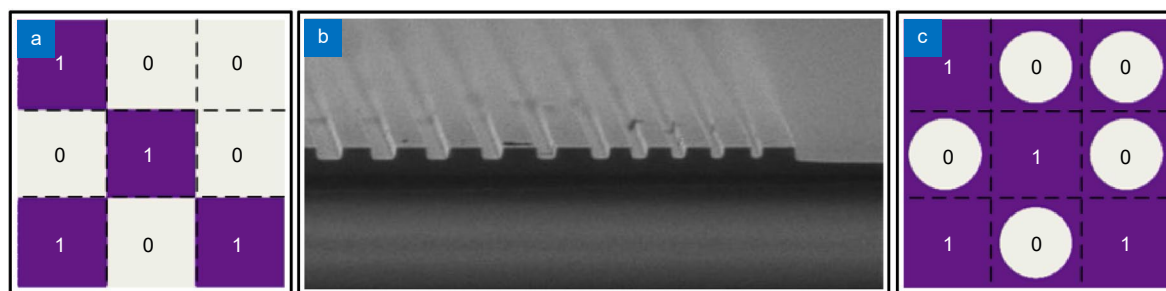


图 4 迟滞效应^[63]。(a) 正方形刻蚀图案; (b) 迟滞效应引起的加工误差; (c) 圆形刻蚀图案

Fig. 4 Lag effect^[63]. (a) Square etching pattern; (b) Fabrication error caused by lag effect; (c) Circular etching pattern

优势在于, 特征尺寸一致且相互独立的刻蚀孔, 可以有效地避免迟滞效应引起的加工误差。但是, 相邻圆形之间的硅墙最小宽度约为 30 nm, 该结构对加工精度要求较高。

综上所述, DBS 算法凭借其物理模型直观、优化收敛迅速、制造容差高等特性, 已成为光子器件逆向设计领域的核心算法之一。在实际优化环节中, 研究者普遍采用基于等效理论模型的人工预设初始结构, 降低随机搜索的盲目性, 进一步提升算法效率。在光子器件的加工环节, 刻蚀图案的拓扑选择是影响器件性能与工艺可行性的关键因素。当前主流正方形与圆形图案的选择需结合具体应用场景与工艺条件进行权衡。正方形像素单元由于单个像素尺寸较大, 其制造对设备线宽控制精度要求较低, 但是对反应等离子滞后效应敏感; 正方形中心带圆孔像素单元由于相邻圆孔之间的间距较小, 对加工精度的要求会较高, 但是可以有效地避免迟滞效应引起的加工误差。

2.2 GODBS 算法

DBS 算法采用离散化的结构来实施搜索式优化过程, 其显著优势在于能够便捷地融入特征尺寸约束条件。然而, 该算法计算次数并非固定不变, 而是与优化空间的参数数量紧密相关。具体而言, 随着器件尺寸的逐步增大, 优化空间所涉及的参数数量也会相应增加。DBS 算法的计算复杂度在一定程度上依赖于参数数量, 参数数量的增多将直接导致算法在优化过程中需要进行更多的计算操作, 进而使得优化所需的时间成本显著上升。这一特性使得 DBS 算法在面对高维参数优化问题时, 面临着计算效率低下和时间成本过高的挑战。

2021 年, 兰州大学的 Chen 等^[64] 提出了 GODBS 算法, 该算法的核心思想是引入梯度驱动的像素单元切换机制, 突破传统离散优化算法中固定约束式的逐点搜索模式, 通过构建设计区域电磁场梯度幅值与方向的空间映射, 实现以局部梯度极值点为锚点的折射

率分布搜索。假设初始结构被离散为 $M \times N$ 个正方形的像素单元, 边长为 a , 仿真区域的网格边长为 b ($b < a$), 品质函数 (merit function, MF) 对折射率 n 的梯度为 $\partial MF / \partial n$, 则 GODBS 算法流程如图 5(a) 所示, 具体为 1) 通过随机生成的方式产生初始结构; 2) 使用伴随法计算网格梯度矩阵 $\partial MF / \partial n$; 3) 将相邻的 $(a/b) \times (a/b)$ 矩阵元素合并, 并求平均值得到像素单元梯度矩阵 A ; 4) 如果对应单元的材料是材料 1, 选择矩阵 A 中数值最低的两个像素单元, 并切换状态为材料 2 (材料 2 折射率大于材料 1)。如果对应单元的材料是材料 2, 选择矩阵 A 中数值最高的两个像素单元, 并切换状态为材料 1; 5) 评估 MF, 如果 MF 满足性能需求则算法终止, 否则, 重复步骤 2~4。

该团队通过 GODBS 算法优化了一个双模式干涉仪, 如图 5(b) 所示, 其设计区域为 $4 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$, 像素单元边长 a 为 100 nm, 仿真网格边长 b 为 25 nm。通过伴随法得到一个大小为 160×320 的网格梯度矩阵, 随后合并为大小为 40×80 的单元梯度矩阵, 作为 GODBS 算法的优化导向依据。经迭代优化后, TE_0 和 TE_1 模式在 1550 nm 波长处的插入损耗分别为 0.59 dB 和 0.36 dB。为验证算法效率, 该团队进一步对比了 GODBS 与传统 DBS 算法在 $2.8 \mu\text{m} \times 4.0 \mu\text{m}$ 模式转换器设计中的表现。实验表明, 在达到相近性能指标的前提下, GODBS 的优化耗时较 DBS 减少了一个数量级。

2.3 BDBS 算法

DBS 算法在优化光子器件结构时, 需对每个像素单元翻转后的候选结构执行一次仿真计算, 大量重复的仿真操作会显著增加时间成本。为解决这一问题, 研究者提出采用人工神经网络 (artificial neural network, ANN), 构建光子器件物理结构与光学响应之间的非线性映射模型。经训练后的神经网络模型可实时输出目标结构参数或光学响应特性, 实现仿真计算的部分替代, 从而有效规避对仿真计算的依赖。然而, ANN 的训练需要收集大量的数据集, 这同样需要高昂的时间成本。相比 ANN, 贝叶斯优化通过引入概率代理模型与采集函数, 不仅可以减少数据集的规模, 而且其不确定性驱动探索可以避免算法陷入局部最优。

在 2021 年, 日本北海道大学 Fujisawa 等^[65] 提出了 BDBS 算法, 该算法的核心思想是将贝叶斯优化与 DBS 算法结合, 利用高斯过程 (Gaussian process, GP) 建模传输特性, 并通过预期改进 (expected improvement, EI) 选择下一个像素翻转位置, 以减少仿真次数。具体步骤为

1) 基于已知的数据集, 利用 GP^[66] 从输入向量 x 中学习输出向量 y 。

2) 基于 EI 的采集函数确定下一个搜索的像素单元, 如图 6(a) 所示, 其表达式为

$$\alpha_{\text{EI}}(\mu, \sigma) = (\mu - \tau)\Phi(t) + \sigma\phi(t), \quad (1)$$

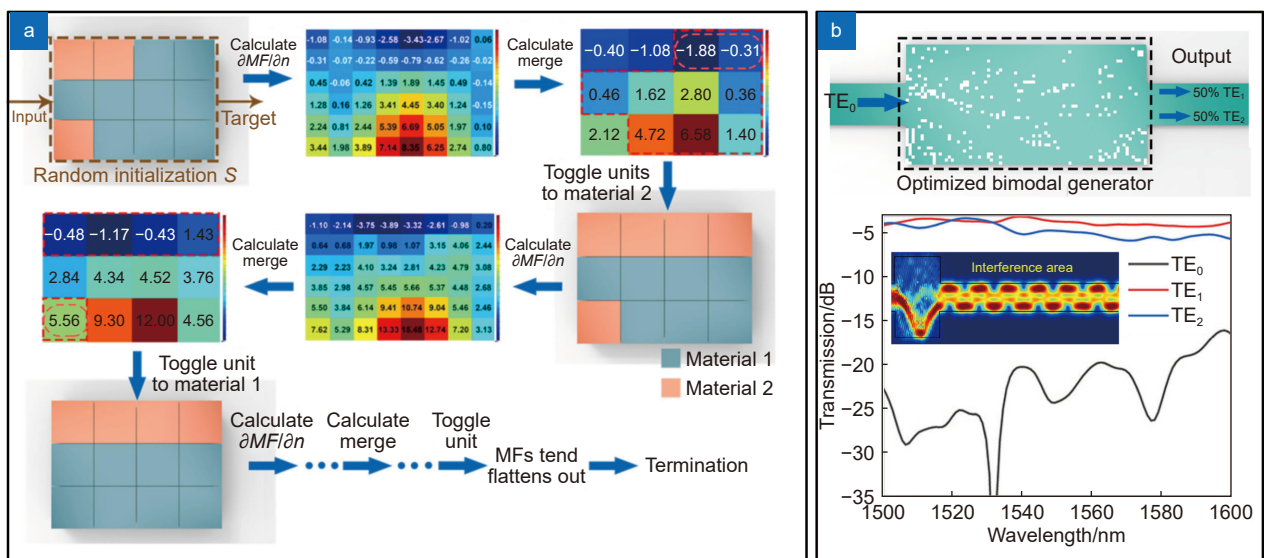


图 5 GODBS 算法^[64]. (a) GODBS 算法流程图; (b) 基于 GODBS 算法的双模式干涉仪

Fig. 5 GODBS algorithm^[64]. (a) GODBS algorithm flowchart; (b) Bi-modal interferometer based on the GODBS algorithm

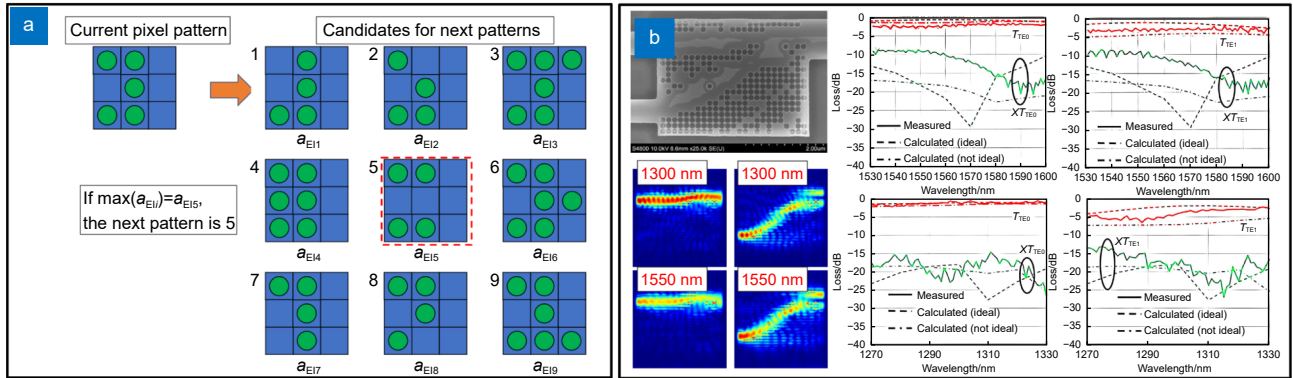


图 6 BDBS 算法。(a) BDBS 算法确定下一个搜索像素的流程^[65]；(b) 基于 BDBS 算法的宽带模分复用器^[67]

Fig. 6 BDBS algorithm. (a) Next pixel determined by the BDBS algorithm^[65]; (b) Broadband mode division multiplexer based on the BDBS algorithm^[67]

$$t = \frac{\mu - \tau}{\sigma}, \quad (2)$$

$$\phi(t) = N(0, 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right), \quad (3)$$

$$\Phi(t) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{t}{\sqrt{2}}\right) \right), \quad (4)$$

式中： μ 和 σ 分别是预期均值和方差； τ 是最优适应度； ϕ 和 Φ 分别是正态分布和累积正态分布函数。

3) 根据 EI 值选择最优像素翻转，计算新结构性能。如果器件的性能得到提升，就保存当前像素的材料状态，否则，保存上一次的材料状态。

4) 将新结构加入数据集，重复步骤 1)~3)，直至算法收敛。

该团队在 2023 年通过 BDBS 算法优化了一个覆盖 C 波段和 O 波段的模分复用器，如图 6(b) 所示，其设计区域为 $3 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ 。测试结果表明，在 1290 nm 到 1310 nm 带宽范围内，插入损耗小于 4.2 dB；在 1530 nm 到 1570 nm 带宽范围内，插入损耗小于 3.4 dB。为验证算法效率，将 BDBS 算法与传统 DBS 算法进行对比实验。在 10 组独立优化测试中，BDBS 算法在 9 组实验中显著降低了插入损耗。

2.4 MSDBS 算法

DBS 算法中设置的 FOM 函数是量化器件性能的评价指标，其收敛性直接关联器件结构的局部最优性。例如，针对 1×2 波分复用器的设计，若需实现波长 λ_1 从输出波导 2 中高效传输、 λ_2 从输出波导 3 中高效传输，同时抑制输入波导 1 中波长 λ_1 和波长 λ_2 的反射，则 FOM^[68] 可定义为

$$FOM = \alpha(\lambda_{21} - \lambda_{22}) + \beta(\lambda_{32} - \lambda_{31}) - \gamma(\lambda_{11} + \lambda_{12}), \quad (5)$$

式中： α 、 β 、 γ 为权重因子； λ_{ij} 为波导 i 中波长 j 的

透过率。权重因子通过调目标函数中不同参数的权重比例，直接影响优化方向的优先级。具体而言，数值较大的权重因子会增强算法对相应性能参数的敏感度，引导优化资源向该目标倾斜；而数值较小的权重因子则弱化其对算法的影响，降低该目标的优化强度。不同权重因子的设置会导致 DBS 算法呈现出不同的局部收敛特性。因此，若仅采用单一权重因子的 FOM 函数来引导算法优化，则算法很容易陷入不理想的局部最优解。

在 2023 年，复旦大学的 Sun 等^[69]提出了 MSDBS 算法，该算法的核心思想是通过多阶段分步设置 FOM 函数，有侧重性地逐步提升器件的性能，避免算法过早收敛。MSDBS 的流程如图 7(a) 所示，具体步骤为：1) 通过随机生成或人工预设方式确定初始拓扑结构，并选择起始像素单元；2) 调节 FOM 函数；3) 切换像素单元材料状态，并且计算 FOM 函数，如果器件的性能得到提升，就保存当前像素的材料状态，否则，保存上一次的材料状态；4) 选择下一个像素单元，重复步骤 3)，直至算法收敛；5) 重复步骤 2~4)，直至算法再次收敛。

该团队在 2023 年通过 MSDBS 算法优化了一个解复用功率分束器，如图 7(b) 所示，其设计区域为 $5.2 \mu\text{m} \times 7.8 \mu\text{m}$ ，在 1310 nm 和 1550 nm 通道的仿真插入损耗小于 0.37 dB，串扰小于 -17.02 dB。与单一 FOM 函数的 DBS 算法相比，MSDBS 算法使器件综合性能获得显著提升。

2.5 MDBS 算法

在特定设计区域内，算法优化的参数空间大小与折射率分布调控能力呈正相关关系。具体而言，参数

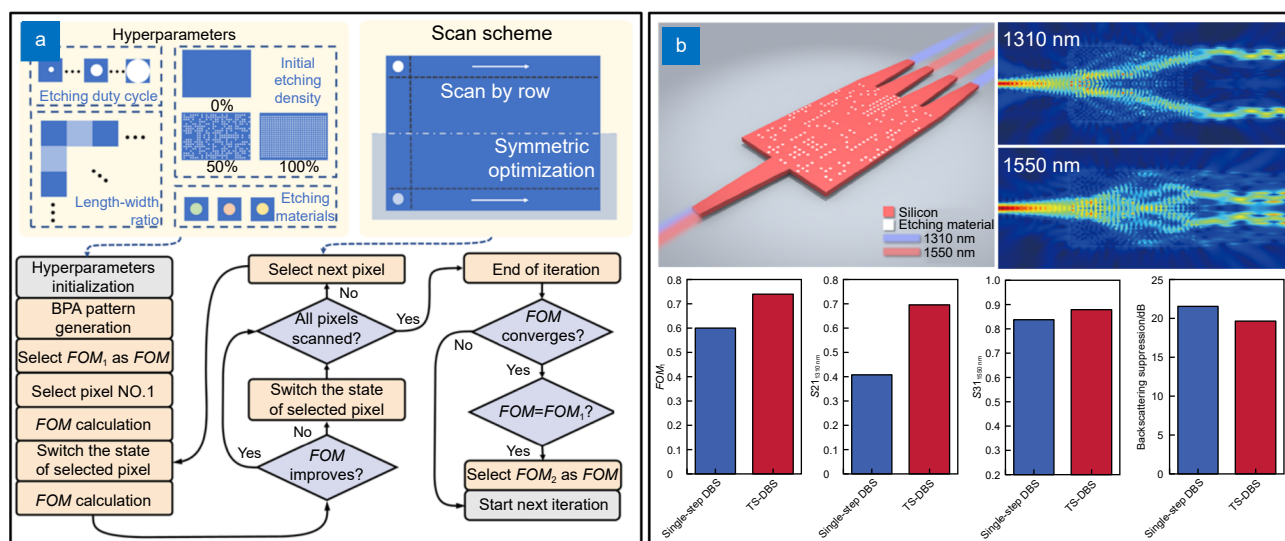


图 7 MSDBS 算法^[69]。(a) MSDBS 算法的流程图; (b) 基于 MSDBS 算法的双波长解复用功率分束器
Fig. 7 MSDBS algorithm^[69]. (a) MSDBS algorithm flowchart; (b) Dual-band wavelength demultiplexing power splitter based on the MSDBS algorithm

空间越大, 算法对材料折射率的精细化调控能力越强, 进而使光学器件的性能指标越好。DBS 算法在参数搜索过程中仅局限于计算像素单元的材料状态维度, 这种单一维度的优化策略导致其自由度受限, 难以充分挖掘算法的搜索潜力。

在 2020 年, 本团队^[70]提出了旋转 DBS (rotatable direct binary search, RDBS) 算法, 该算法的核心思想是选择矩形或者三角形的刻蚀图案作为基本优化单元, 并通过增加几何图案的旋转维度参数提高算法的自由度, 从而提升器件的性能。RDBS 的流程如图 8(a) 所示, 具体步骤为: 1) 通过随机生成或人工预设方式确定包含矩形或者三角形刻蚀图案 (像素单元中心刻蚀矩形或者三角形) 的初始结构; 2) 选择起始计算的像素单元; 3) 删除刻蚀图案, 并计算 FOM 函数;

4) 在像素单元中心填充矩形刻蚀图案, 预设角度步长旋转图案, 每次旋转后重新计算 FOM 值, 记录旋转角度与 FOM 对应关系; 5) 删除矩形刻蚀图案, 在像素单元中心填充三角形刻蚀图案, 预设角度步长旋转图案, 每次旋转后重新计算 FOM 值, 记录旋转角度与 FOM 对应关系; 6) 比较以上 FOM 数值, 选择最优值, 并根据最优 FOM 对应的结构信息改变像素单元结构; 7) 选择下一个搜索的像素单元; 8) 重复步骤 3~7, 直至算法收敛。

基于 RDBS 算法, 本团队优化了兼具模式转换的功率分束器, 如图 8(b) 所示。其中, TE₀-TE₁ 功率分束器采用矩形刻蚀图案, 其设计区域为 2.7 μm × 2.4 μm, 在 1500 nm 到 1600 nm 带宽范围内, 仿真插入损耗小于 0.2 dB, 串扰小于 -20.6 dB; TE₀-TE₂ 功

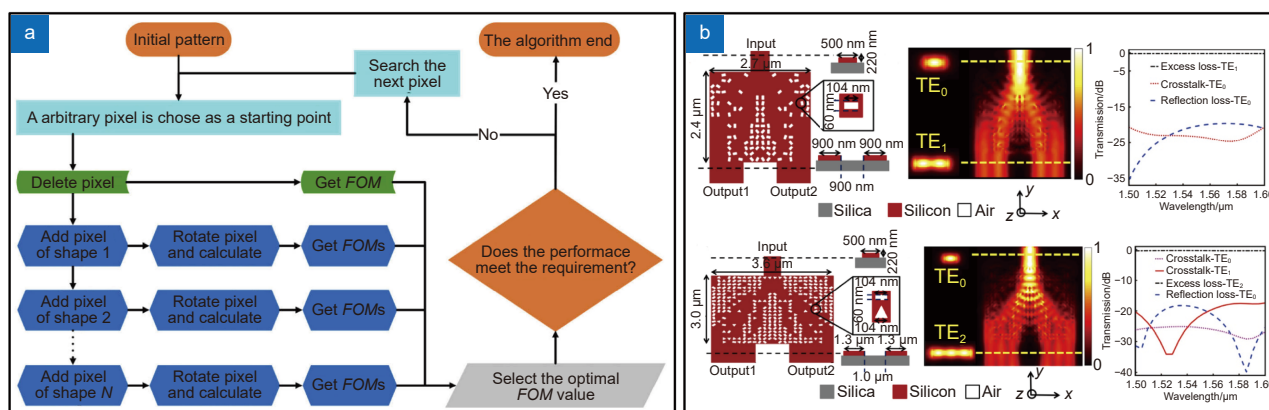


图 8 RDBS 算法^[70]。(a) RDBS 算法的流程图; (b) 基于 RDBS 算法的模式转换功率分束器
Fig. 8 RDBS algorithm^[70]. (a) RDBS algorithm flowchart; (b) Mode conversion power splitters based on the RDBS algorithm

率分束器采用矩形和三角形刻蚀图案, 其设计区域为 $3.6\ \mu\text{m} \times 3.0\ \mu\text{m}$, 在 1500 nm 到 1600 nm 带宽范围内, 仿真插入损耗小于 0.4 dB, 串扰小于 -25.1 dB。为验证算法效率, 团队以 $2.1\ \mu\text{m} \times 1.5\ \mu\text{m}$ 的“T”型功率分束器为基准器件, 分别采用 RDBS 算法与传统 DBS 算法进行结构优化。在相同计算资源下, RDBS 算法优化的器件性能提升了约 30%。

圆角效应是微纳加工中的典型几何畸变现象^[71], 它通常会导致在结构图案拐角处形成弧形, 而不是完美的拐角。在刻蚀阶段, 亚微米尺度结构拐角处的材料去除速率呈现空间非均匀性。对于诸如三角形、矩形等具有锐利拐角几何图案的结构, 其顶点区域在刻蚀进程中会形成弧形的过渡结构, 而非理论所设计的理想尖角形态, 此现象将导致加工误差的产生。为解决此问题, 2023 年, 本团队在 RDBS 算法的基础上提出了 MDBS 算法^[72]。该算法的核心思想是通过引入圆形图案大小维度以及“跑道”型图案旋转维度参数, 显著提升了算法的自由度, 并实现器件性能、时

间成本和加工鲁棒性三者之间的平衡。MDBS 的流程如图 9(a) 所示, 具体步骤为: 1) 通过随机生成或人工预设方式确定包含圆形和“跑道”型刻蚀图案的初始结构; 2) 选择起始计算的像素单元; 3) 删除刻蚀图案, 并计算 FOM 函数; 4) 在像素单元中心填充“跑道”型刻蚀图案, 预设角度步长旋转图案, 每次旋转后重新计算 FOM 值, 记录旋转角度与 FOM 对应关系; 5) 删除“跑道”型刻蚀图案, 在像素单元中心填充圆形刻蚀图案, 预设半径步长改变图案大小, 每次大小变化后重新计算 FOM 值, 记录尺寸大小与 FOM 对应关系; 6) 比较以上 FOM 数值, 选择最优值, 并根据最优 FOM 对应的结构信息改变像素单元结构; 7) 选择下一个搜索的像素单元; 8) 重复步骤 3~7, 直至算法收敛。

基于 MDBS 算法, 本团队优化了双模式功率分束器, 如图 9(b) 所示, 其设计区域为 $10\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$, 输入波导宽度与常规的光栅耦合器波导宽度一致, 极大缩短了该器件与光栅耦合器之间的锥形波导长度。

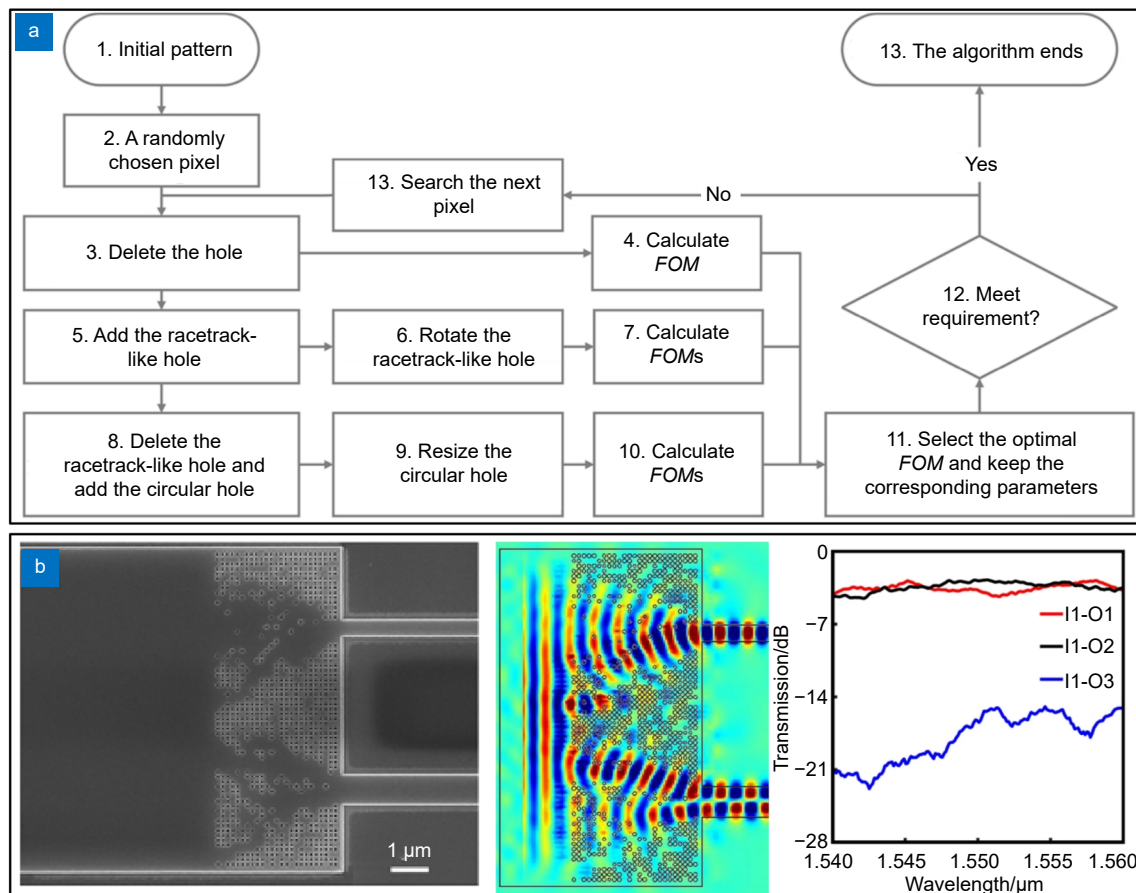


图 9 MDBS 算法^[72]。(a) MDBS 算法的流程图; (b) 基于 MDBS 算法的双模式功率分束器
Fig. 9 MDBS algorithm^[72]. (a) MDBS algorithm flowchart; (b) Two-mode power splitter based on the MDBS algorithm

测试结果表明, 在 1540 nm 到 1560 nm 带宽范围内, 插入损耗小于 1.3 dB, 串扰小于 -14.9 dB。与 DBS 算法相比, MDBS 算法不仅增加了算法优化的自由度, 而且提升了器件加工的鲁棒性。

2.6 其他 DBS 算法

DBS 算法也展现出跨算法融合能力, 可与其他算法结合形成混合算法。DBS 算法可与梯度算法协同工作, 使连续的介电常数离散化。复旦大学的 Sun 等^[73]采用拓扑优化方法对设计区域的介电常数进行初步迭代优化后, 进一步引入 DBS 算法对每个离散像素的材料状态进行确定, 成功设计了高性能的 5 模式复用器。实验结果表明, 该器件在 1550 nm 波长处测试插入损耗低于 1.8 dB, 通道间串扰优于 -20.7 dB。此外, DBS 算法可与深度学习结合同样展现出显著优势, 可为神经网络训练提供高质量数据的数据集。三菱电机研究实验室的 Tahersima 等^[74]基于 DBS 算法产生的 2000 个样本, 训练了一个隐藏层宽度为 100、深度为 8 的神经网络模型, 能够快速设计任意分束比的功率分束器, 透过率大于 90%。这种混合优化策略不仅拓展了 DBS 算法的应用场景, 更在复杂光子器件设计领域形成了可推广的智能化解决方案。

3 基于 DBS 算法的光子器件

在物理层面上, 光信号维度可划分为 5 个核心维度, 分别是时间、振幅、波长、空间、偏振。在硅基片上集成光子器件的设计实践中, 研究重点主要聚焦于后 4 个维度的器件功能实现。DBS 算法具有良好的普适性, 成为各类光子器件优化的关键技术之一。本节阐述基于 DBS 算法设计的多个维度调控的光子器件, 主要包括功率分束器、波分复用器、模分复用器、偏振转换分束器等典型器件, 重点解析其在振幅、波长、模式、偏振调控中的技术实现路径。

3.1 基于 DBS 算法的功率分束器

功率分束器作为光子芯片的核心关键器件之一, 在光学相控阵^[75]、光子信号处理^[76]、量子计算^[77]、光子神经网络^[78]等前沿领域中发挥着至关重要的作用, 其主要功能在于能够依据特定的光强比例, 将入射光精准地分配至不同的输出端口。

功率分束器的光强分配比例对其实际应用有着显著影响。针对不同分配比例需求的功率分束器, 其采用 DBS 算法优化方式亦存在差异。在输出功率均分的应用中, 初始结构的设计可采用对称的 Y 分支结

构, 并且在后续的优化过程中始终保持这种对称性。这种设计策略不仅能够实现近乎完美的输出功率均分效果, 而且可大幅缩减优化时间成本, 显著提升设计效率。中国工程物理研究院的 Duan 等^[79]采用对称优化方式, 成功设计并制备出 1×8 的功率分束器, 如图 10(a) 所示。实验测试结果表明, 该器件对称通道损耗曲线高度一致, 在 1542 nm 到 1553 nm 的带宽范围内, 插入损耗小于 1 dB, 充分验证了对称优化设计在功率均分型功率分束器中的优越性。而在输出功率不均分的应用需求中, 初始结构无法采用对称设计。此时, DBS 算法需要针对每个输出通道进行独立优化, FOM 函数应包含每个输出通道透过率和通道间分配比信息, 以确保功率分束器能够达到预定的功率分配比。哈尔滨工业大学的 Xie 等^[80]报道了一系列在 2 μm 波段工作的功率分束器, 这些器件具有 1:1:1:1、2:2:1:1、2:2:2:1 和 4:3:2:1 等多种不同的功率分配比, 如图 10(b) 所示。实验测试数据显示, 这些器件的传输效率均大于 70%, 展示了非对称优化设计在实现复杂功率分配比功率分束器方面的可行性。此外, 功率分束器不仅具备单独调控光信号振幅的能力, 还能够与其他维度的信息实现协同作用。具体而言, 通过结合波长、偏振、模式等不同维度信息, 功率分束器可衍生出多样化的功能特性, 如图 10(c~e) 所示, 分别为宽带功率分束器^[81]、双偏振功率分束器^[82]、双模式功率分束器^[83]。

3.2 基于 DBS 算法的波分复用器

波分复用器作为波分复用技术的核心光子器件, 其本质是利用不同波长光信号在波导中的低损耗传输特性, 实现波长选择与分离。该技术通过将多个光载波复用至同一波导中, 显著提升光通信系统的传输容量与频谱效率, 已成为光互连系统的关键支撑技术。波分复用技术可划分为稀疏波分复用与密集波分复用两大体系, 其核心差异体现在信道间隔、波长稳定性要求及应用场景上。稀疏波分复用系统的信道间隔约为 20.0 nm, 无需对激光器高精度温控, 通过牺牲频谱效率换取低成本; 而密集波分复用系统的信道间隔约为 0.2 nm 到 1.2 nm, 需要高精度波长锁定, 对激光器依赖性高, 系统成本是前者的几倍。

基于 DBS 算法的波分复用器设计主要聚焦于稀疏波分复用体系。针对窄带信道的复用需求, DBS 算法通过迭代优化目标波长处的透过率响应, 有效降低目标波长的损耗与串扰。华中科技大学的 Zhou

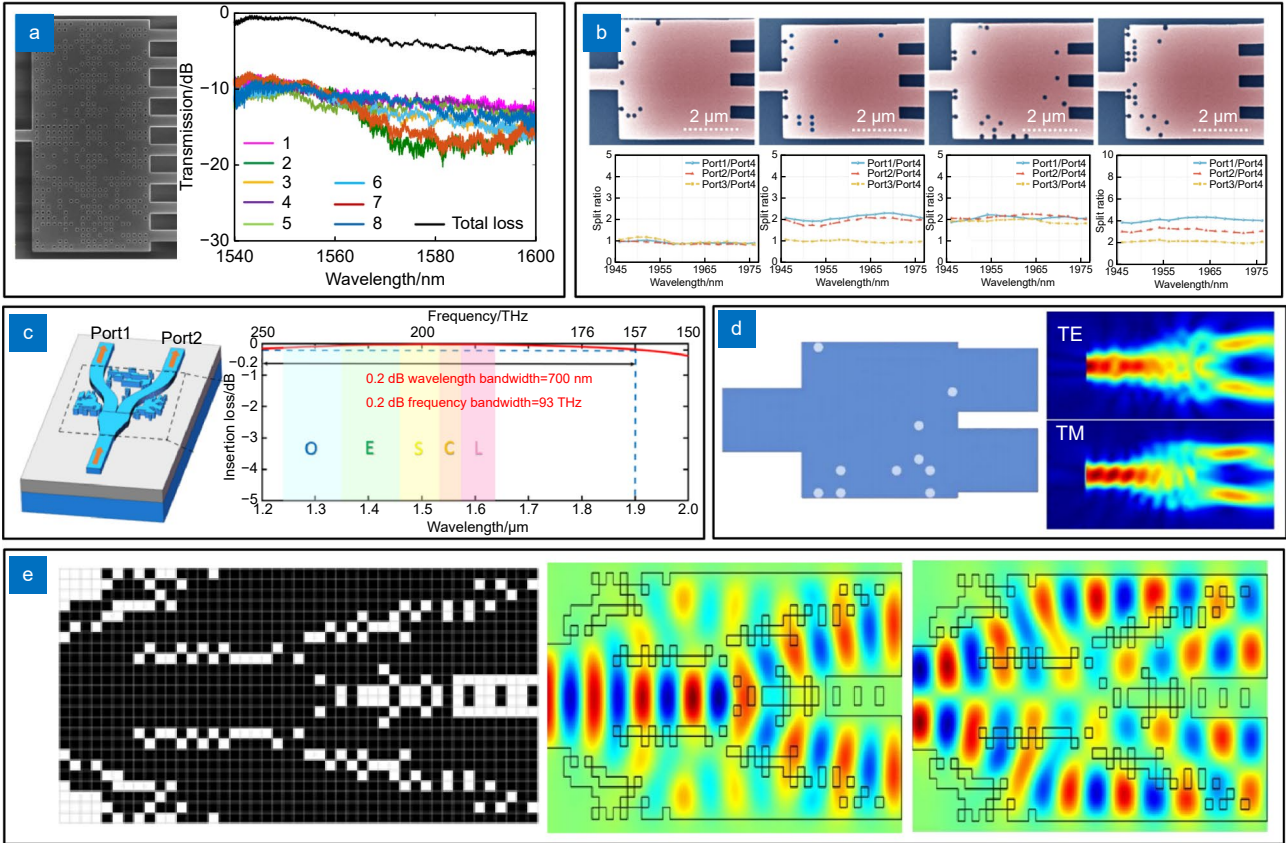


图 10 基于 DBS 算法的功率分束器。(a) 功率均分功率分束器^[79]; (b) 功率不均分功率分束器^[80]; (c) 宽带功率分束器^[81]; (d) 双偏振功率分束器^[82]; (e) 双模式功率分束器^[83]

Fig. 10 Power splitters based on the DBS algorithm. (a) Power splitter with equal power distribution^[79]; (b) Power splitter with uneven power distribution^[80]; (c) Broadband power splitter^[81]; (d) Dual-polarization power splitter^[82]; (e) Dual-mode power splitter^[83]

等^[84]设计了两信道的波分复用器, 如图 11(a) 所示, 在 1550 nm 和 1570 nm 波长处, 该器件的测试插入损耗小于 2.3 dB, 串扰小于 -16.4 dB。而面向宽带复用, DBS 算法需扩展为带宽优化, 通过计算平均透过率或者在指定带宽内多次取样构建 FOM 函数, 实现宽带的带通和带阻。国防科技大学的 Yang 等^[85]基于此优化设计的宽带波分复用器, 如图 11(b) 所示, 在 1320 nm 到 1380 nm 和 1520 nm 到 1580 nm 的带宽范围内, 仿真插入损耗小于 1.5 dB, 串扰小于 -19.7 dB。波分复用器具备与其他维度信息协同的潜力, 如图 11(c) 所示, 西南大学的 Yuan 等^[86]实现的多模式波长解复用器, 融合波长解复用和模式转换的功能。在 1450 nm 和 1550 nm 波长处, 该器件的仿真插入损耗小于 1.26 dB, 串扰小于 -18.1 dB。

3.3 基于 DBS 算法的模式复用器

随着单信道数据速率逼近香农极限, 波分复用技术受限于光谱资源与串扰抑制瓶颈, 已难以满足片上

互连带宽需求。在此背景下, 空分复用技术成为突破空间维度带宽限制的关键路径, 其核心分支, 即, 模分复用技术, 通过多模波导中的多个正交模式实现不同信道的数据传输。相较于波分复用技术, 模分复用技术凭借其高效的空分利用率, 灵活的模式操控力, 良好的兼容性等优势为片上光互连面临的带宽需求远超过当前技术所能供给这一严峻问题提供了解决思路。

作为模分复用技术的核心光子器件, 模分复用器优化初始结构的选择至关重要, 其中 Y 分支结构和 ADC 结构为当前主流方案。在 DBS 算法优化过程中, 为保障每个模式的转换效率, FOM 函数需涵盖所有模式的透过率信息。本研究团队以 Y 分支模型为初始结构, 利用 DBS 算法优化了一个四模式复用器, 如图 12(a) 所示, 在 1550 nm 波长处, 其仿真插入损耗小于 1 dB, 串扰小于 -19.5 dB^[87]。与此同时, 南京信息工程大学的 Jiang 等^[88]以 ADC 模型为初始结构, 实现了宽带双模式复用器, 如图 12(b) 所示, 在 150 nm

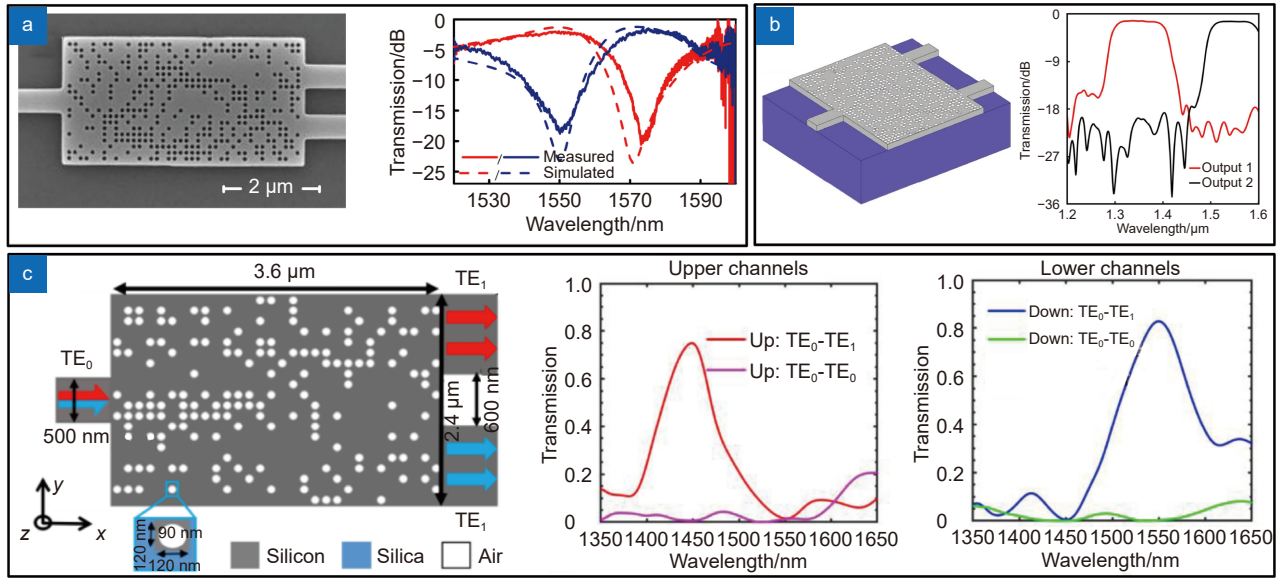

 图 11 基于 DBS 算法的波分复用器。(a) 窄带波分复用器^[84]; (b) 宽带波分复用器^[85]; (c) 多模式解复用器^[86]

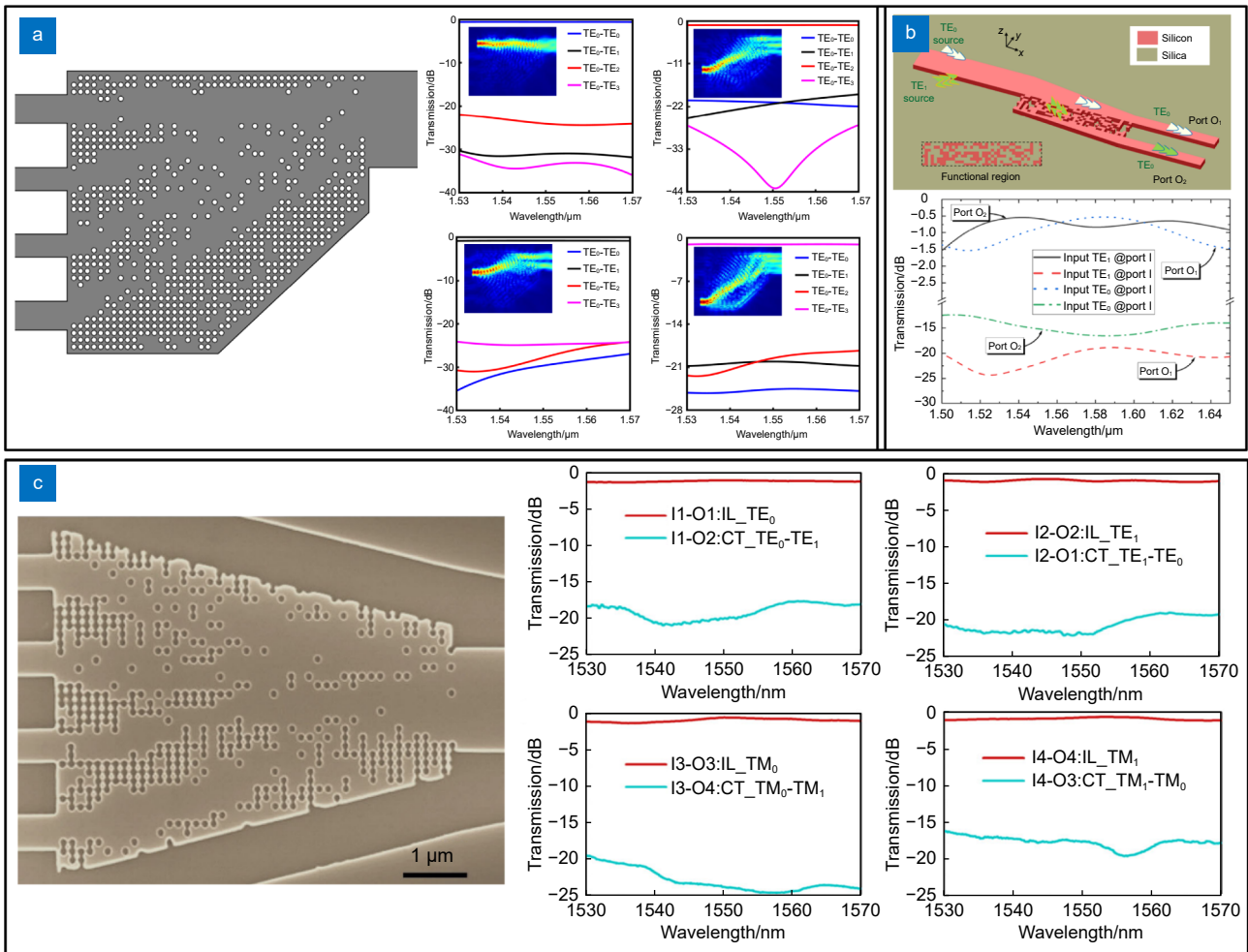
 Fig. 11 Wavelength multiplexers based on the DBS algorithm. (a) Narrowband wavelength multiplexer^[84]; (b) Broadband wavelength multiplexer^[85]; (c) Multimode wavelength demultiplexer^[86]

 图 12 基于 DBS 算法的模式复用器。(a) 四模式复用器^[87]; (b) 宽带双模式复用器^[88]; (c) 偏振-模式复用器^[89]

 Fig. 12 Mode multiplexers based on the DBS algorithm. (a) Four-mode multiplexer^[87]; (b) Broadband two-mode multiplexer^[88]; (c) Polarization-mode multiplexer^[89]

的带宽范围内, 仿真插入损耗小于 1.53 dB, 串扰小于 -10.89 dB。此外, 随着研究的不断深入, 模分复用器的潜力正被进一步挖掘与拓展。如图 12(c) 所示, 哈尔滨工业大学 Liu 等^[89]设计的偏振-模式复用器, 能够同时调控偏振、模式维度信息。在 1530 nm 到 1570 nm 的带宽范围内, 该器件测试插入损耗小于 1.4 dB, 串扰小于 -15 dB。

3.4 基于 DBS 算法的偏振转换分束器

SOI 平台有较大的折射率差, 这一特性使得光能够被强烈地约束在波导内部传播, 为设计超紧凑的光子器件提供了有利条件。然而, 较大的折射率差也引发了严重的双折射效应, 导致硅基片上光子器件不得不面对偏振相关的挑战, 即器件性能会受到输入光偏振态的影响。为减少相关组件的偏振依赖性, 偏振分集方案是当前常用的有效手段^[90]。在偏振分集系统中, 偏振转换器和偏振分束器是两个关键器件, 二者协同工作以实现偏振态的灵活操控与分离。

偏振转换器的主要功能是将某一特定偏振态的光信号相位旋转 90°, 从而将其转换为与之正交的另一偏振态。在 DBS 算法的优化过程中, 模式杂化模型通常被选作初始结构, 并将目标偏振态模式设定为 FOM 函数, 以此引导算法朝着提升目标偏振态转换效率的方向进行迭代。华中科技大学的 Chang 等^[91]报道了一种偏振转换器, 其以不对称硅波导为初始结

构, 基于模式杂化原理, 运用 DBS 算法实现了高效优化。如图 13(a) 所示, 实验测试结果表明, 该偏振转换器在 1530 nm 至 1590 nm 的宽波长范围内, 插入损耗低于 0.7 dB, 消光比大于 19.0 dB。偏振分束器则负责将两个相互正交的偏振模式有效分离, 并引导他们沿着不同的路径传播。在采用 DBS 算法对偏振分束器进行优化设计时, MMI 结构可作为初始结构, 同时 FOM 函数应该包含两种偏振态的透过率, 以确保对目标偏振态的高效分离。大连工业大学的 Cong 等^[92]以 MMI 模型为初始结构, 成功优化设计出一款偏振分束器。如图 13(b) 所示, 在 1525 nm 至 1575 nm 的波长范围内, 该偏振分束器的仿真插入损耗小于 1.21 dB, 消光比大于 13.24 dB。此外, 偏振转换分束器凭借其独特的偏振操控能力, 在偏振复用系统的构建中同样发挥着不可或缺的作用, 为复杂光通信系统的设计提供了更多的可能性。

3.5 其他光子器件

本文以 DBS 算法为核心, 围绕着光信号的振幅、波长、空间、偏振等维度, 着重剖析了功率分束器、波分复用器、模分复用器、偏振转换分束器等核心器件。然而, 组成光子芯片的器件种类远不止于此, 还包括逻辑器件、光开关、连接器件等多种光子器件^[93-95]。在实际应用中, 每种器件设计的侧重也有所不同。以波分复用器和模分复用器为例, 在考虑大规

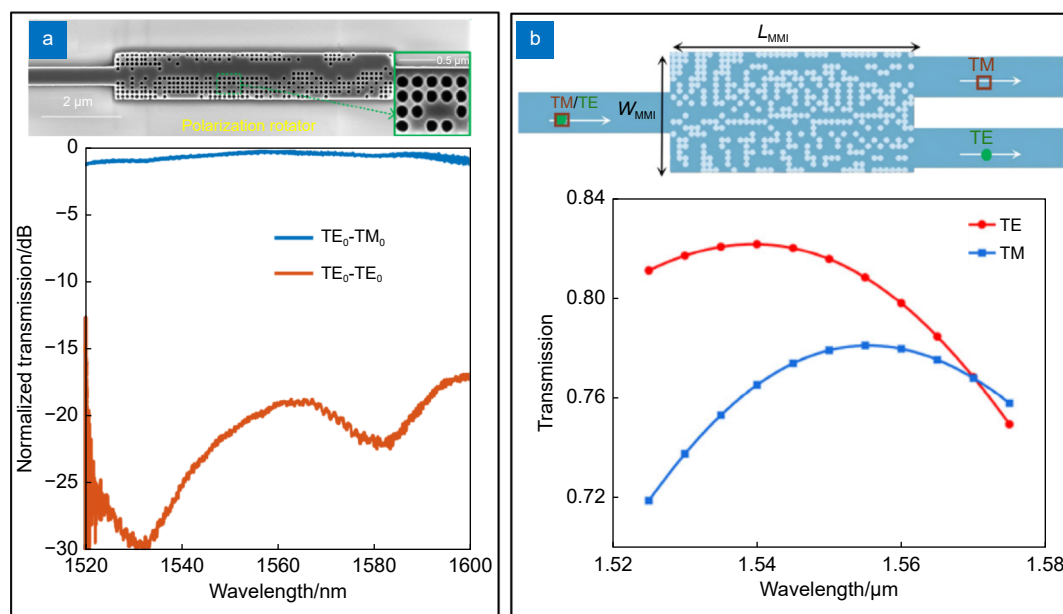


图 13 基于 DBS 算法的偏振转换分束器。(a) 偏振转换器^[91]; (b) 偏振分束器^[92]

Fig. 13 Polarization rotation splitter based on the DBS algorithm. (a) Polarization rotator^[91]; (b) Polarization beam splitter^[92]

模光子器件集成时, 器件尺寸成了至关重要的考量因素, 而对于大容量通信而言, 信道数量、传输速率和信号质量是核心关注点。因此, 针对不同应用场景, 选择合适的优化方法和优化目标, 有助于充分发挥光子芯片的优势。

4 总结和展望

在摩尔定律逼近物理极限、芯片间互连瓶颈日益凸显的背景下, 硅基片上光互连技术凭借其超大带宽、超高速率、超低能耗等显著优势, 成为突破传统电互连技术壁垒、推动芯片集成化与高性能化发展的关键路径。随着人工智能、机器学习等新兴技术赋能, 光子器件逆向设计迎来重大革新, 为高性能硅基光子器件的快速开发与优化提供了新思路。本文以 DBS 算法为核心, 系统介绍了其在硅基片上光子器件设计中的应用, 重点围绕算法原理演进与器件设计实践两个方面展开论述。

1) 深入剖析了 DBS 算法的核心机制与设计流程, 揭示了其在时间成本、仿真次数、收敛效率、搜索自由度等方面的局限性。针对上述问题, 系统梳理了 DBS 算法的改进方向与阶段性完善策略, 重点介绍了 GODBS 算法、BDBS 算法、MSDBS 算法、MDBS 算法。

2) 重点探讨了 DBS 算法在光信号振幅、波长、模式及偏振调控中的技术实现方法。通过功率分束器、波分复用器、模分复用器、偏振转换分束器等典型器件的设计案例, 详细分析了 DBS 算法在多种物理维度优化中的具体应用。

DBS 算法以其原理简洁性与应用普适性脱颖而出。其简洁的原理使得算法易于理解和实现, 降低了开发门槛; 而广泛的普适性则使其能够适用于多种类型的光子器件设计, 为光子器件逆向设计领域提供了一个强大而通用的工具。

在光子技术持续革新的当下, 未来研究工作极有可能聚焦于多功能光子器件、其他材料平台光子器件以及大规模光子集成芯片这三个方面。随着光子芯片功能复杂度呈指数级增长, 单一器件已难以满足应用需求, 多功能化已成为必然发展趋势。多功能光子器件不仅需要实现对光信号振幅、波长、模式、偏振等多物理场的高效协同调控, 更应进一步向动态可调谐、灵活可编程等智能化功能方向拓展, 从而为光子芯片在通信、计算、传感等领域中的广泛应用提供更强大

的支撑。同时, 虽然硅基材料在光子器件领域中已经取得了显著的成果, 但其他材料平台如氮化硅、磷化铟、铌酸锂等也展现出了独特的优势和潜力。其中, 氮化硅材料凭借低损耗、高透明度的特性, 适用于高性能且低损耗光子器件; 磷化铟材料在光通信波段具备优异光电特性, 能兼顾有源与无源光子器件; 铌酸锂材料因具有良好的非线性特性, 是设计非线性光子器件的关键材料。此外, 电子芯片的发展历程是从简单功能元件到复杂集成系统的演进。大规模光子集成芯片正沿着相似路径, 完成从局部功能模块到全局系统架构的跨越式发展。通过多种核心功能深度融合, 有望构建出性能卓越、功耗极低的新型光电子集成系统, 成为推动未来信息产业变革的重要技术引擎。

综上所述, 本文总结了硅基片上光互连技术中 DBS 算法应用的研究现状与阶段性成果, 同时对未来研究方向进行了前瞻性的探讨与展望。这些研究成果为逆向设计算法的优化改进与实际应用提供了重要的理论参考与技术支撑。未来, 随着研究的不断深入, 相关领域将会取得更大的进展, 为解决芯片瓶颈问题、推动光电子信息产业的高质量发展注入新的动力。

作者贡献

马汉斯: 资料收集、论文写作、选题指导、项目资助、论文修改; 杨俊波, 吴加贵: 选题指导、项目资助、论文修改; 林振, 陈宇泰, 冉冲冲, 陈欢, 杨静: 论文修改。

利益冲突

所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Chen X H, Liu F X, Ai Y D, et al. Key characteristics analysis of industrial digital twins for smart manufacturing[J]. *Sci Technol Rev*, 2022, 40(11): 45–54.
陈晓红, 刘飞香, 艾彦迪, 等. 面向智能制造的工业数字孪生关键技术特性[J]. *科技导报*, 2022, 40(11): 45–54.
- [2] Zhou X K, Wu J Y, Liang W, et al. Reconstructed graph neural network with knowledge distillation for lightweight anomaly detection[J]. *IEEE Trans Neural Networks Learn Syst*, 2024, 35(9): 11817–11828.
- [3] Xu X H, Du Z J, Chen X H, et al. Confidence consensus-based model for large-scale group decision making: a novel approach to managing non-cooperative behaviors[J]. *Inf Sci*, 2019, 477: 410–427.
- [4] Li C, He A L, Wen Y H, et al. Optimal trading mechanism based on differential privacy protection and stackelberg game in big data market[J]. *IEEE Trans Serv Comput*, 2023, 16(5): 3550–3563.
- [5] Xu Z H, Zhou T K, Ma M Z, et al. Large-scale photonic chiplet Taichi empowers 160-TOPS/W artificial general intelligence[J]. *Science*, 2024, 384(6692): 202–209.

- [6] Miller D A B. Physical reasons for optical interconnection[J]. *Int J Optoelectron*, 1997, **11**: 155–168.
- [7] Gong Q H, Luo X G, Liu W M, et al. Nano-optoelectronics and photonic chips: progresses and challenges[J]. *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2023, **37**(3): 410–417.
龚旗煌, 罗先刚, 刘伍明, 等. 纳光电子与光子芯片研究: 发展与挑战[J]. *中国科学基金*, 2023, **37**(3): 410–417.
- [8] Bruel M. Silicon on insulator material technology[J]. *Electron Lett*, 1995, **31**(14): 1201–1202.
- [9] Han X, Jiang Y H, Frigg A, et al. Mode and polarization-division multiplexing based on silicon nitride loaded lithium niobate on insulator platform[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(1): 2100529.
- [10] Zhang Q H, Zhang Y F, Li J Y, et al. Broadband nonvolatile photonic switching based on optical phase change materials: beyond the classical figure-of-merit[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(1): 94–97.
- [11] Zhou Z P, Chen W B, Feng J B, et al. Silicon based optoelectronics and its frontier advances (invited)[J]. *Acta Optica Sin*, 2024, **1**(6): 0602002.
周治平, 陈卫标, 冯俊波, 等. 硅基光电子及其前沿进展 (特邀)[J]. *光学学报*, 2024, **1**(6): 0602002.
- [12] Hong S H, Wu J C, Xie Y W, et al. Versatile parallel signal processing with a scalable silicon photonic chip[J]. *Nat Commun*, 2025, **16**(1): 288.
- [13] Su Y X, Liu D M, Zhang M M. Sb₂Se₃-assisted reconfigurable broadband Y-junction[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(22): 40379–40388.
- [14] Cabo R F D, Sánchez-Sánchez A, Yang Y J, et al. Broadband mode exchanger based on subwavelength Y-junctions[J]. *Nanophotonics*, 2024, **13**(21): 4037–4045.
- [15] 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.
- [16] Han S T, Sun D Y, Zhao S, et al. Ultra-broadband power splitter with arbitrary splitting ratio based on SWG MMI coupler[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2025, **37**(3): 137–140.
- [17] Ling Q, Dong P H, Chu Y Y, et al. On-chip optical matrix-vector multiplier based on mode division multiplexing[J]. *Chip*, 2023, **2**(4): 100061.
- [18] Jia R D, Tan Y J, Navaratna N, et al. Photonic supercoupling in silicon topological waveguides[J]. *Adv Mater*, 2025, **37**(6): 2415083.
- [19] So S, Badloe T, Noh J, et al. Deep learning enabled inverse design in nanophotonics[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(5): 1041–1057.
- [20] Du T, Ma H S, Jiang X P, et al. Inverse-designed silicon-based on-chip power splitters[J]. *Acta Phys Sin*, 2023, **72**(18): 184204.
杜特, 马汉斯, 姜鑫鹏, 等. 片上光互连器件的智能化设计研究进展[J]. *物理学报*, 2023, **72**(18): 184204.
- [21] 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.
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.
- [22] 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.
- [23] Kang C, Park C, Lee M, et al. Large-scale photonic inverse design: computational challenges and breakthroughs[J]. *Nanophotonics*, 2024, **13**(20): 3765–3792.
- [24] Wang N, Yan W, Qu Y R, et al. Intelligent designs in nanophotonics: from optimization towards inverse creation[J]. *Photonix*, 2021, **2**(1): 22.
- [25] Ma H S, Du T, Jiang X P, et al. Different-mode power splitters for optical testing of three-channel and dual-mode waveguide crossing[J]. *Photonic Sens*, 2025, **15**(2): 250225.
- [26] 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.
- [27] Liu Y J, Xu K, Wang S, et al. Arbitrarily routed mode-division multiplexed photonic circuits for dense integration[J]. *Nat Commun*, 2019, **10**(1): 3263.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Zhang Y, Yang S, Lim A E J, et al. A compact and low loss Y-junction for submicron silicon waveguide[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(1): 1310–1316.
- [33] Goudarzi K, Lee M. Inverse design of a binary waveguide crossing by the particle swarm optimization algorithm[J]. *Results Phys*, 2022, **34**: 105268.
- [34] Han J M, Huang J, Wu J G, et al. Inverse designed tunable four-channel wavelength demultiplexer[J]. *Opt Commun*, 2020, **465**: 125606.
- [35] Piggott A Y, Lu J, Lagoudakis K G, et al. Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer[J]. *Nat Photonics*, 2015, **9**(6): 374–377.
- [36] 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.
- [37] Huang X P, Li J A, Wang Z C, et al. Ultra-compact narrow-band band-stop filter based on inverse design[J]. *AIP Adv*, 2024, **14**(10): 105213.
- [38] Sheng L Z, Zhang H T, Zhang J J, et al. Gradient probabilistic algorithm for compact lithium niobate integrated photonic devices[J]. *Photonics*, 2024, **11**(6): 508.
- [39] 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.
- [40] Shen R Y, Hu F C, Hong B Z, et al. 100 nm broadband and ultra-compact multi-dimensional multiplexed photonic integrated circuit for high-capacity optical interconnects[J]. *Photonics Res*, 2024, **12**(12): 2891–2900.
- [41] 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.
- [42] Liu Y, Kang Z, Xu H D, et al. Inverse design of multi-port power splitter with arbitrary ratio based on shape optimization[J]. *Nanomaterials*, 2025, **15**(5): 393.
- [43] Yuan M W, Yang G, Song S J, et al. Inverse design of a nanophotonic wavelength demultiplexer with a deep neural network approach[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(15): 26201–26211.
- [44] An S S, Zheng B W, Shalaginov M Y, et al. Deep convolutional neural networks to predict mutual coupling effects in metasurfaces[J]. *Adv Opt Mater*, 2022, **10**(3): 2102113.
- [45] Khoram E, Wu Z C, Qu Y R, et al. Graph neural networks for metasurface modeling[J]. *ACS Photonics*, 2023, **10**(4): 892–899.
- [46] Winzer P J. Making spatial multiplexing a reality[J]. *Nat Photonics*, 2014, **8**(5): 345–348.

- [47] Liu P Z, Wang L N, Zhou J Y, et al. Mobile blue-light communication over a signal optical path using a time-division multiplexing scheme[J]. *J Semicond*, 2025, **46**(3): 032402.
- [48] Yin X D, He X L. Research on three-channel quadrature amplitude modulation method[J]. *J Terahertz Sci Electron Inf Technol*, 2025, **23**(2): 132–137.
尹晓冬, 何小利. 基于三通道 QAM 伪正交的调制无线系统[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2025, **23**(2): 132–137.
- [49] Qiao X, Li Y H, Liu Y J, et al. Inverse-designed multidimensional-division-multiplexing photonic circuits for dense integration[J]. *ACS Photonics*, 2025, **12**(6): 3256–3264.
- [50] Wan Y J, Liu X D, Wu G Z, et al. Efficient stochastic parallel gradient descent training for on-chip optical processor[J]. *Opto-Electron Adv*, 2024, **7**(4): 230182.
- [51] Zhao W K, Peng Y Y, Zhu M Y, et al. Ultracompact silicon on-chip polarization controller[J]. *Photonics Res*, 2024, **12**(2): 183–193.
- [52] Seldowitz M A, Allebach J P, Sweeney D W. Synthesis of digital holograms by direct binary search[J]. *Appl Opt*, 1987, **26**(14): 2788–2798.
- [53] Shen B, Wang P, Menon R. Optimization and analysis of 3D nanostructures for power-density enhancement in ultra-thin photovoltaics under oblique illumination[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(S2): A311–A319.
- [54] Kim G, Menon R. An ultra-small three dimensional computational microscope[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, **105**(6): 061114.
- [55] Shen B, Wang P, Polson R, et al. Ultra-high-efficiency metamaterial polarizer[J]. *Optica*, 2014, **1**(5): 356–360.
- [56] Shen B, Wang P, Polson R, et al. Integrated metamaterials for efficient and compact free-space-to-waveguide coupling[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(22): 27175–27182.
- [57] 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*, 2015, **9**(6): 378–382.
- [58] 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.
- [59] Ma H S, Yang J B, Zhao N, et al. Inverse-designed 6×6 waveguide crossing for a Benes-based network[J]. *Opt Express*, 2024, **32**(24): 42908–42915.
- [60] Liu Y J, Wang S, Wang Y J, et al. Subwavelength polarization splitter-rotator with ultra-compact footprint[J]. *Opt Lett*, 2019, **44**(18): 4495–4498.
- [61] 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.
- [62] Zou J H, Yu Y, Zhang X L. Single step etched two dimensional grating coupler based on the SOI platform[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(25): 32490–32495.
- [63] Lu L L Z. Researches on silicon subwavelength structure optical devices[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
卢鲁璐子. 硅基亚波长结构光子器件研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [64] Chen H X, Jia H, Wang T, et al. A gradient-oriented binary search method for photonic device design[J]. *J Lightwave Technol*, 2021, **39**(8): 2407–2412.
- [65] 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.
- [66] Rasmussen C E, Williams C K I. *Gaussian Processes for Machine Learning*[M]. Cambridge: MIT Press, 2006.
- [67] Fujisawa T, Mitarai T, Okimoto T, et al. Bayesian design of mosaic-based mode multiplexers for various wavelength bands[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(16): 26842–26853.
- [68] 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.
- [69] Sun A L, Deng X Y, Xing S Z, et al. Inverse design of an ultra-compact dual-band wavelength demultiplexing power splitter with detailed analysis of hyperparameters[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(16): 25415–25437.
- [70] Ma H S, Huang J, Zhang K W, 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.
- [71] 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.
- [72] Ma H S, He X, Zhu G Y, et al. Different-mode power splitters based on a multi-dimension direct-binary-search algorithm[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(17): 27393–27406.
- [73] Sun A L, Xing S Z, Deng X Y, et al. Edge-guided inverse design of digital metamaterial-based mode multiplexers for high-capacity multi-dimensional optical interconnect[J]. *Nat Commun*, 2025, **16**(1): 2372.
- [74] 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.
- [75] Li Y Z, Wang Z M, Du H L, et al. Integrated communication and sensing system based on Si-SiN dual-layer optical phased array[J]. *Opt Express*, 2024, **32**(19): 33222–33231.
- [76] Yang K Y, Shirpurkar C, White A D, et al. Multi-dimensional data transmission using inverse-designed silicon photonics and microcombs[J]. *Nat Commun*, 2022, **13**(1): 7862.
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-35446-4>.
- [77] Hajomer A A E, Bruynsteen C, Derkach I, et al. Continuous-variable quantum key distribution at 10 GBaud using an integrated photonic-electronic receiver[J]. *Optica*, 2024, **11**(9): 1197–1204.
- [78] Yuan H, Wang Z C, Peng Z, et al. Ultra - compact and NonVolatile nanophotonic neural networks[J]. *Adv Opt Mater*, 2023, **11**(16): 2300215.
- [79] Duan J Z, Liu C L, Zeng J C, et al. Ultra-compact silicon-based 1×8 power splitter based on digital metamaterials[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2025, **37**(6): 317–320.
- [80] 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.
- [81] 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.
- [82] Cong Y, Lv H L, Liu S, et al. Ultra-compact and polarization-independent power splitter with a variable splitting ratio[J]. *Appl Opt*, 2025, **64**(11): 3055–3062.
- [83] 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.
- [84] Zhou F Y, Lu L L Z, Zhang M M, et al. Ultra-compact, low-loss and low-crosstalk wavelength demultiplexer for CWDM system based on the photonic-crystal-like metamaterial structure[C]// *Proceedings of 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2017: 1.
- [85] Yang J B, Ma H S, Chen Y T, et al. Flat-topped wavelength division multiplexer: CN218122293U[P]. 2022-12-23.
杨俊波, 马汉斯, 陈宇泰, 等. 一种平顶波分复用器: CN218122293U[P]. 2022-12-23.
- [86] 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.
- [87] Ma H S, Du T, Jiang X P, et al. Three-dimensional mode-division multiplexing system[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(11): 18555–18566.
- [88] Jiang W F, Mao S Q, Hu J Z. Inverse-designed counter-tapered coupler based broadband and compact silicon mode multiplexer/demultiplexer[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(20): 33253–33263.
- [89] Liu Y Z, 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): 15925–5932.
- [90] Fukuda H, Yamada K, Tsuchizawa T, et al. Silicon photonic circuit with polarization diversity[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(7): 4872–4880.
- [91] 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.
- [92] Cong Y, Lv H L, Liang Y F, et al. Inverse design of an ultra-compact polarization beam splitter[J]. *Appl Opt*, 2025, **64**(5): 1288–1294.
- [93] Chen Y T, Chen H, Ma H S, et al. On-chip optical adder and differential-equation-solver based on Fourier optics and metasurface[J]. *Nanomaterials*, 2022, **12**(19): 3438.
- [94] Yu X, Wei Z Q, Sha F Y, et al. Parallel optical computing capable of 100-wavelength multiplexing[J]. *eLight*, 2025, **5**(1): 10.
- [95] Ma H S, Du T, Jiang X P, et al. Inverse-designed ultra-compact multi-channel and multi-mode waveguide crossings[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(18): 29235–29244.

作者简介



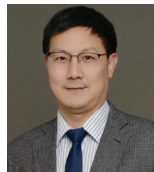
【通信作者】马汉斯(1992-), 男, 博士, 湖南工商大学讲师, 研究方向为基于智能算法的硅基片上微纳光电器件。参与完成国家重点研发计划项目、国家自然科学基金项目、国防科技大学项目等多个重要课题, 主持湖南省教育厅科学研究项目。在 *Nanophotonics*、*Journal of Lightwave Technology*、*Optics Express*、*Photonic Sensors* 等期刊, 以第一作者发表论文 13 篇, 授权专利 10 余项。

E-mail: mahansi2024@163.com



【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。研究成果入选中国光学重要成果。主持国家 863 项目、国家自然科学基金等 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。

E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn



【通信作者】吴加贵(1981-), 男, 西南大学教授, 博士生导师, OSA Member, IEEE Member, ACM Member, 中国光学学会光电专委会委员, 中国密码学会混沌保密通信委员会会员, 混沌与非线性电路专委会委员, 中国人工智能学会会员。美国加州大学洛杉矶分校 (UCLA) 高级研究科学家, 美国哥伦比亚大学访问学者, 重庆市科委杰出青年基金获得者。主要从事微纳光子器件, 激光物理, 信息安全等方面研究。近年来主持了两项国家自然科学基金面上项目, 主研国家自然科学基金、省市科学基金等项目 10 余项。在 *Nature Communications*、*Nature - Light-Science & Applications*、*Optics Express*、*IEEE Journal of Lightwave Technology*、《物理学报》等主流学术刊物上发表学术论文 100 余篇。国家自然科学基金委的项目评审专家, 入选 Elsevier 的“2022 年全球前 2% 顶尖科学家”。获得过重庆市自然科学二等奖和三等奖。

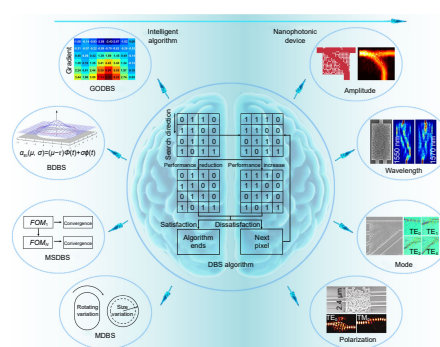
E-mail: mgh@swu.edu.cn



扫描二维码, 获取 PDF 全文

Silicon-based on-chip optical devices based on direct binary search algorithm

Ma Hansi^{1,2*}, Lin Zhen¹, Chen Yutai², Ran Chongchong^{2,3}, Chen Huan², Yang Jing⁴,
Yang Junbo^{2*}, Wu Jiagui^{3*}



Overview of DBS algorithm and its applications

Overview: Although traditional electrical interconnect technology has laid an important foundation for modern computing architecture, it is constrained by limited bandwidth and high power consumption, making it difficult to meet the continuously growing demand for computing power. Against the backdrop of Moore's law approaching the physical limit and the increasingly prominent bottleneck of chip-to-chip interconnection, silicon-based optical interconnection technology, with the advantages of compatibility with mature complementary metal oxide semiconductor processes and unique high refractive index contrast, has become a key path to break through the barriers of traditional electrical interconnection technology. In order to transform photonic chips into intelligent design paradigms, inverse-designed photonic devices have broken through traditional design limitations and can better meet the increasing demands of integrated, efficient, and functional photonic chips in the future. As a typical representative of inverse design algorithms, the direct binary search (DBS) algorithm has been widely used in the design of various photonic devices due to its simple principle, efficient convergence speed, and high fabrication robustness. This article deeply analyzes the core mechanism and design process of the DBS algorithm, and reveals its limitations in time cost, simulation times, convergence efficiency, and search freedom. In response to the above issues, this article sorts out the improvement directions of the DBS algorithm, with a focus on introducing gradient-oriented direct binary search algorithm, Bayesian direct binary search algorithm, multi-step direct binary search algorithm, and multi-dimension direct binary search algorithm. In addition, the technical implementation methods of the DBS algorithm in the modulation of optical-signal amplitude, wavelength, mode, and polarization are discussed in detail. Through design cases of typical devices, such as power splitter, wavelength division multiplexer, mode division multiplexer, and polarization rotation splitter, the specific application of the DBS algorithm in optimizing multiple physical dimensions is analyzed. Finally, the possible development trends of future research in multifunctional photonic devices, other-material-based photonic devices, and large-scale photonic integrated chips are discussed. This article provides valuable references for related studies and promotes further exploration and application of inverse design in the photonic-chip field.

Ma H S, Lin Z, Chen Y T, et al. Silicon-based on-chip optical devices based on direct binary search algorithm[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(11): 250157; DOI: 10.12086/oe.2025.250157

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2022YFF0706005), National Natural Science Foundation of China (61805278, 12272407, 62275269, 62275271, 62305387), China Postdoctoral Science Foundation (2018M633704), Foundation of National University of Defense Technology (ZK23-03), Natural Science Foundation of Hunan Province (2023JJ40683, 2022JJ40552, 2020JJ5646, 2023JJ40223, 2024JJ6184), Natural Science Foundation of Hubei Province (2024AFB525), Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate (CX20230009), State Key Laboratory of High Performance Computing, National University of Defense Technology (202201-12), and Scientific Research Foundation of Hunan Provincial Education Department (24B0575, 22B0655)

¹School of Microelectronics and Physics, Hunan University of Technology and Business, Changsha, Hunan 410205, China; ²Department of Physics, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China; ³School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China; ⁴Xiangyang Polytechnic, Xiangyang, Hubei 441050, China

* E-mail: mahansi2024@163.com; yangjunbo@nudt.edu.cn; mgh@swu.edu.cn