

国防科技大学建校 70 周年专题

片上光互连器件的智能化设计研究进展*

杜特¹⁾ 马汉斯¹⁾²⁾ 姜鑫鹏¹⁾ 赵芬¹⁾³⁾ 张兆健¹⁾ 王志成¹⁾⁴⁾
彭政¹⁾⁴⁾ 张伊祎¹⁾⁵⁾ 张煜青¹⁾⁴⁾ 罗鸣宇¹⁾⁵⁾ 邹宏新¹⁾ 吴加贵⁴⁾
闫培光⁶⁾ 朱刚毅⁷⁾ 于洋¹⁾ 何新¹⁾ 陈欢¹⁾ 张振福¹⁾ 杨俊波^{1)†}

1) (国防科技大学理学院, 长沙 410073)

2) (国防科技大学计算机学院, 长沙 410073)

3) (重庆理工大学两江人工智能学院, 重庆 400054)

4) (西南大学人工智能学院, 重庆 400715)

5) (广西大学计算机与电子信息学院, 南宁 530004)

6) (深圳大学物理与光电工程学院, 深圳 518060)

7) (南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京 210023)

(2023 年 4 月 30 日收到; 2023 年 8 月 1 日收到修改稿)

光互连技术相比于电互连等传统通信技术具有带宽大、能耗低、抗干扰等系列优势,正在逐渐成为短距离、甚短距离数据终端间通信的重要手段和发展趋势.基于绝缘体上硅的片上光互连技术作为光互连在芯片尺度上的实现,在一系列复用技术的支持下得到了非常广泛的应用.智能设计方法具有原理直观、设计自由度高、材料兼容性好等优点.随着智能设计方法在片上光互连器件设计活动中的广泛应用,目前片上光互连器件逐渐呈现出超紧凑化、可调控化、系统集成化等重要发展趋势.本文首先归纳了几种目前最常用的片上光互连器件的智能设计方法,然后详细分析了智能化设计的片上光互连器件的几个重大研究进展与趋势,最后对未来智能化设计的片上光互连器件的发展进行了展望.

关键词: 片上光互连器件, 智能设计方法, 相变材料, 光子集成回路**PACS:** 42.82.Ds, 42.79.Ta, 42.30.-d, 42.82.Bq**DOI:** 10.7498/aps.72.20230705

1 引言

随着移动互联网产业和大数据产业的蓬勃发展,各种规模的数据终端之间的通信速率和通信容量面临着更高的要求 and 更大的挑战.光通信和光互连技术被认为是解决这一问题的根本途径^[1].相比于以铜线为传输媒介的电互连,光互连

凭借其带宽大、速率高、成本低、能耗低、抗电磁干扰等优势,成为了短距离数据中心之间、甚短距离计算机之间甚至集成电路之间数据通信的最佳解决方案^[1-3].特别是近些年来,基于绝缘体上硅(silicon on insulator, SOI)的片上光互连技术在波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)技术、偏振复用(polarization division multiplexing, PDM)技术、光时分复用(optical time division

* 国家自然科学基金(批准号: 60907003, 61805278, 12272407, 62275269, 62275271)、国家重点研发计划(批准号: 2022YFF0706005)、中国博士后科学基金(批准号: 2018M633704)、国防科技大学科研计划(批准号: JC13-02-13, ZK17-03-01)、湖南省自然科学基金(批准号: 13JJ3001)和新世纪高校优秀人才计划(批准号: NCET-12-0142)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn

multiplexing, OTDM) 技术和空分复用 (space division multiplexing, SDM) 技术等多种复用技术的支持下得到了非常广泛的应用^[4-15]. 这些技术使得片上光互连技术能够进一步提升传输容量、加快处理速度、降低成本以及削减能耗^[1,16-19].

一段时间以来, 有大量的基于耦合模 (coupled-mode) 理论、多模干涉 (multi-mode interference) 理论、传输线 (transmission line) 理论等传统设计方法的片上光互连器件问世^[20-26]. 这些器件为短距离至甚短距离数据终端之间信息的传输提供了重要的硬件基础, 也极大地拓展了光互连的应用场景. 但与此同时, 这些传统设计方法在设计器件时往往会面临设计思路不直接、人力成本高的问题, 设计出的器件很多也会面临紧凑度和集成度不足、功能单一等限制^[27-31].

近年来, 智能化设计在整个光子器件设计领域呈现出蓬勃的发展趋势^[32-36]. 利用智能设计方法, 人们设计出了大量的外形、结构和功能都很新颖的光子器件^[37-43]. 智能设计方法一般是指利用各种人工智能技术来解决复杂设计问题的方法, 它们通过模仿一些自然规律或者基于一些数学原理来寻找或接近目标, 可主动寻找规律, 自动学习和优化^[44]. 在许多情况下, 智能设计方法都是解决各种具有挑战性的工程问题的实用技术^[44]. 相比于传统的光子器件设计方法, 智能设计方法的原理简单、操作方便, 且优化过程不需要大量复杂的理论推导以及对物理过程细节的探究, 因此能够让研究者更加专注于器件的设计活动本身. 另外, 与传统设计方法相比, 智能设计方法的设计自由度更高, 更有利于设计多功能器件, 也更容易在较小的区域内得到符合设计要求的器件结构^[45-49]. 与传统设计结果相比, 智能化设计的光子器件在紧凑度和功能丰富度方面有了大幅的提升^[50-52]. 与此同时, 智能设计方法往往能够兼容各种光学材料, 从而设计出基于各种材料的器件结构. 这一特点使得智能设计方法的应用范围得到了极大的拓宽, 也使得研究者在设计基于各种材料的器件时无需单独探究每种材料的特性, 从而能够更加专注于器件功能、尺寸等方面的优化^[53-56]. 基于以上优势, 智能化设计大幅解决了传统方法在设计器件时所面临的多个问题和挑战, 使得包含片上光互连器件在内的大量光子器件得到了进一步的优化.

随着智能设计方法在片上光互连器件设计活

动中的广泛应用, 目前片上光互连器件已经取得了超紧凑化、可调控化、系统集成化等可喜的进展, 也在这些方面呈现出了更进一步发展的趋势. 本文对目前常用的片上光互连器件的智能设计方法进行介绍, 并详细分析智能化设计的片上光互连器件的这几个重要研究进展与趋势.

本文共包含 6 节. 第 1 节是文章的引言, 整体介绍了片上光互连技术的优势和发展现状、智能设计方法的优点和解决力以及本文的整体思路. 第 2 节介绍、归纳、分析了常用的光子器件的智能设计方法, 主要包括几种基于经典智能算法的智能设计方法和基于神经网络的智能设计方法. 第 3 节从不同的角度介绍了智能设计方法在设计片上光互连器件时的显著优势, 即大幅提升所设计器件的紧凑度, 为包含片上光互连系统在内的片上光子回路的大规模集成提供了重要的基础条件. 第 4 节介绍了“相变材料”这一新兴材料的独特优势, 以及基于智能设计方法对材料的广泛适应性而设计的片上可调控光互连器件. 第 5 节介绍了几种基于智能设计方法的推动片上光互连器件系统集成化的方式. 第 6 节对目前智能化设计的片上光互连器件的研究进展进行了总结, 并对相关领域未来发展的趋势做出了展望.

2 光子器件的智能设计方法

随着光子学研究的发展与光子器件的大规模应用, 光互连、光计算、光子神经网络、超透镜、超表面等新兴应用所展示出的独特优势让人们对各种结构、功能的光子器件产生了前所未有的兴趣^[57-68]. 近年来, 智能设计方法在光子器件设计领域呈现出了蓬勃的发展趋势. 利用智能设计方法, 设计出了大量具有新颖的外形、结构和功能的光子器件.

本节介绍、归纳、分析了几种应用广泛的光子器件的智能设计方法, 并从几个角度分析了它们在光子器件设计领域的优势. 本节所归纳的智能设计方法主要可以分为基于经典智能算法的智能设计方法和基于神经网络的智能设计方法两大类, 它们是目前光子器件智能化设计领域最活跃的方向, 也代表了光子器件智能化设计的发展趋势. 这些方法的提出与应用, 给包含片上光互连器件在内的大量光子器件提供了丰富的设计工具, 也创造出了一大批功能新颖、性能优良的新型光子器件.

2.1 现有的代表性光子器件智能设计方法

随着计算机性能的不断提高,充分利用计算机强大的计算能力帮助人类解决各种科学技术问题一直是人们追求的目标.基于这个目标,各种各样的智能设计方法如雨后春笋般在光子器件设计领域不断涌现.本节选取了几种最为常用的智能设计方法,包括几种基于经典智能算法的智能设计方法和基于神经网络的智能设计方法.在它们的辅助下,人们设计出了大量种类繁多、功能齐全的光子器件.可以预见的是,这些智能设计方法将继续为包含片上光互连器件在内的光子器件的设计提供充足的动力.为了更加充分地展示智能设计方法的优势,如卓越的设计能力和广泛的适用性,本小节中列举的一些智能化设计成果不局限于片上光互连器件.

2.1.1 基于经典智能算法的智能设计方法

下面介绍基于遗传算法、粒子群优化算法、直接二进制搜索算法、伴随法等经典智能算法的智能设计方法及它们在光子器件设计领域的广泛应用.这些智能设计方法的主体部分为算法优化,研究者通过选择合适的优化内容与优化目标,以及设置与调整算法的初始参量等操作,使得算法能够找到满

足优化目标的结果(一般为器件结构).

1975年,美国的J. Holland教授提出了遗传算法(genetic algorithm, GA)的概念^[69].该算法借鉴了进化学说中优胜劣汰的思想,通过个体基因的不断迭代获得最优解.算法的一个典型的流程图如图1(a)所示.作为一种启发式算法,GA拥有很好的全局搜索能力,不易陷入局部最优,因此在片上光互连器件的设计中备受关注^[70–72].例如,2009年,Sanchis等^[70]设计了模式可扩展的交叉波导,在传统交叉结构的基础上对交叉区域的波导进行分段,通过GA优化每段波导的宽度,以得到最大的传输效率,减小因波导交叉造成的损耗.该模式可扩展交叉波导的结构如图1(b)所示^[70].又如,2017年,Yu等^[71]提出的基于多模干涉耦合器(multi-mode interference, MMI)结构的超紧凑偏振旋转器,先将设计区域划分为多个同等大小的像素点,再利用GA对结构所要刻蚀的像素点位置数量进行优化,实现了1440–1580 nm波长范围内 TE_{00} 到 TM_{00} 的偏振旋转,如图1(c)所示.2019年,Liu等^[72]也利用GA设计了一种波长路由器,尺寸仅有 $1.4\ \mu\text{m}\times 1.8\ \mu\text{m}$.与上文提到的偏振旋转器不同,器件在初始化时没有采用划分均匀像素点的方式,而是在设计区域使用多种不同规则排列

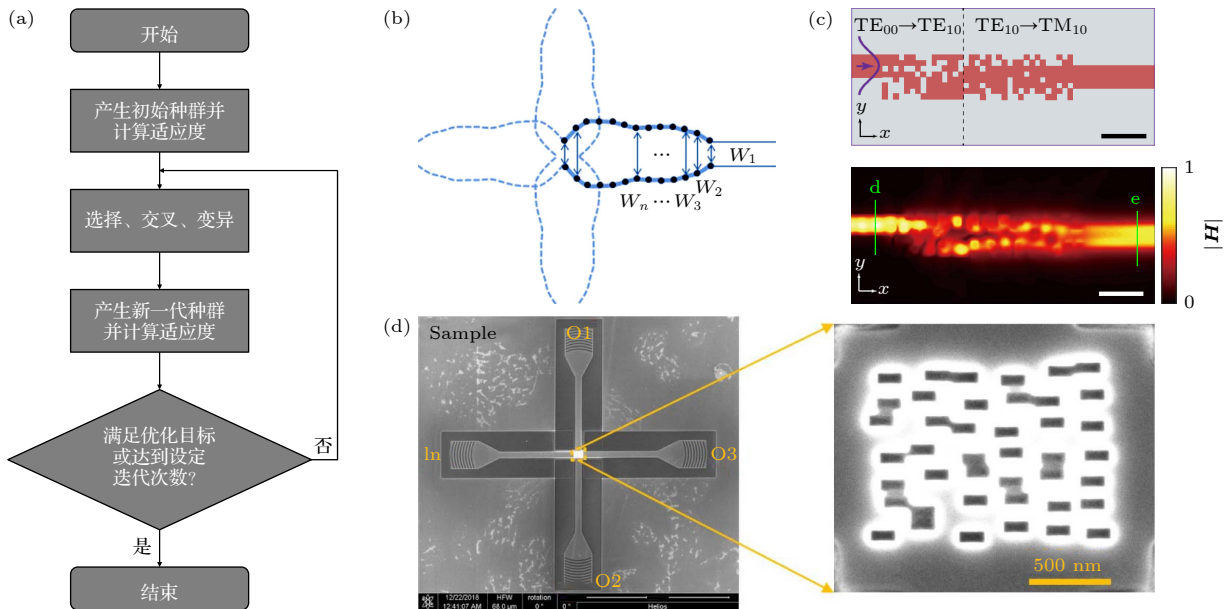


图1 典型的GA流程图及GA在片上光子器件设计领域的应用 (a) 一个典型的GA流程图; (b) 利用GA设计的模式可扩展的交叉波导^[70]; (c) 利用GA设计的超紧凑偏振旋转器^[71]; (d) 利用GA设计的波长路由器^[72]

Fig. 1. Typical flowchart of GA and its application in on-chip photonic devices design: (a) A typical GA flowchart; (b) mode-extensible crossing waveguide designed by GA^[70]; (c) ultra-compact polarization rotator designed by GA^[71]; (d) wavelength router designed by GA^[72].

的单元模型, 通过 GA 优化模型位置调节光的传输. 图 1(d) 给出了该波长路由器的扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 成像图 [72].

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法是一种基于群体智能的优化算法, 其基本思想是模拟鸟群、鱼群等群体动物的生存行为, 通过不断调整粒子的速度和位置, 优化目标函数, 找到最优解. PSO 算法由 Kennedy 和 Eberhart [73] 于 1995 年提出, 其基本优化原理如图 2(a) 所示. PSO 算法原理简单易懂, 容易实现, 因此在光子器件的设计过程中得到了广泛的应用 [74–76]. 例如, 2020 年, Chen 等 [74] 利用 PSO 算法优化了反锥形耦合器结构, 设计出一种片上偏振分束器, 其结构如图 2(b) 所示. 该片上偏振分束器能够在 5 μm 的长度内实现 TE_0 模式和 TM_0 模式的分束. 2021 年, Qin 等 [75] 利用 PSO 算法优化设计了一种单层超临界透镜, 可以在原子厚度的尺度上实现光波相位的调控, 它的 SEM 成像图如图 2(c) 所示. 2022 年,

Chen 等 [76] 又利用 PSO 算法通过优化锥形耦合器结构设计了一种多模式功率分束器. 该多模式功率分束器能够实现对 TE_0 — TE_4 共 5 种模式的 3 dB 功率分束, 其结构如图 2(d) 所示.

直接二进制搜索 (direct binary search, DBS) 算法是一种通过将状态空间转换为二进制编码空间从而进行求解的优化算法. 1987 年, Seldowitz 等 [77] 首次提出了 DBS 算法并将其应用于全息光学设计. 自此, DBS 算法进入了光子学领域研究者的视野. DBS 算法的优化流程如图 3(a) 所示. DBS 算法适合于求解简单的优化问题, 是目前逆向设计算法中最常用的算法之一. 该算法因其操作十分简单, 收敛速度快, 不需要复杂的理论推导和计算, 吸引了光子器件设计研究者的兴趣 [78–81]. 2014 年, DBS 算法首次被 Shen 等 [78] 应用于光子器件设计领域. 自此以后, DBS 算法被广泛应用于各种光子器件设计中 [79–81]. 2015 年, Shen 等 [79] 利用 DBS 算法设计了尺寸仅为 2.4 μm × 2.4 μm 的超紧凑偏振分束器, 如图 3(b) 所示. 实验结果表明, 在 32 nm

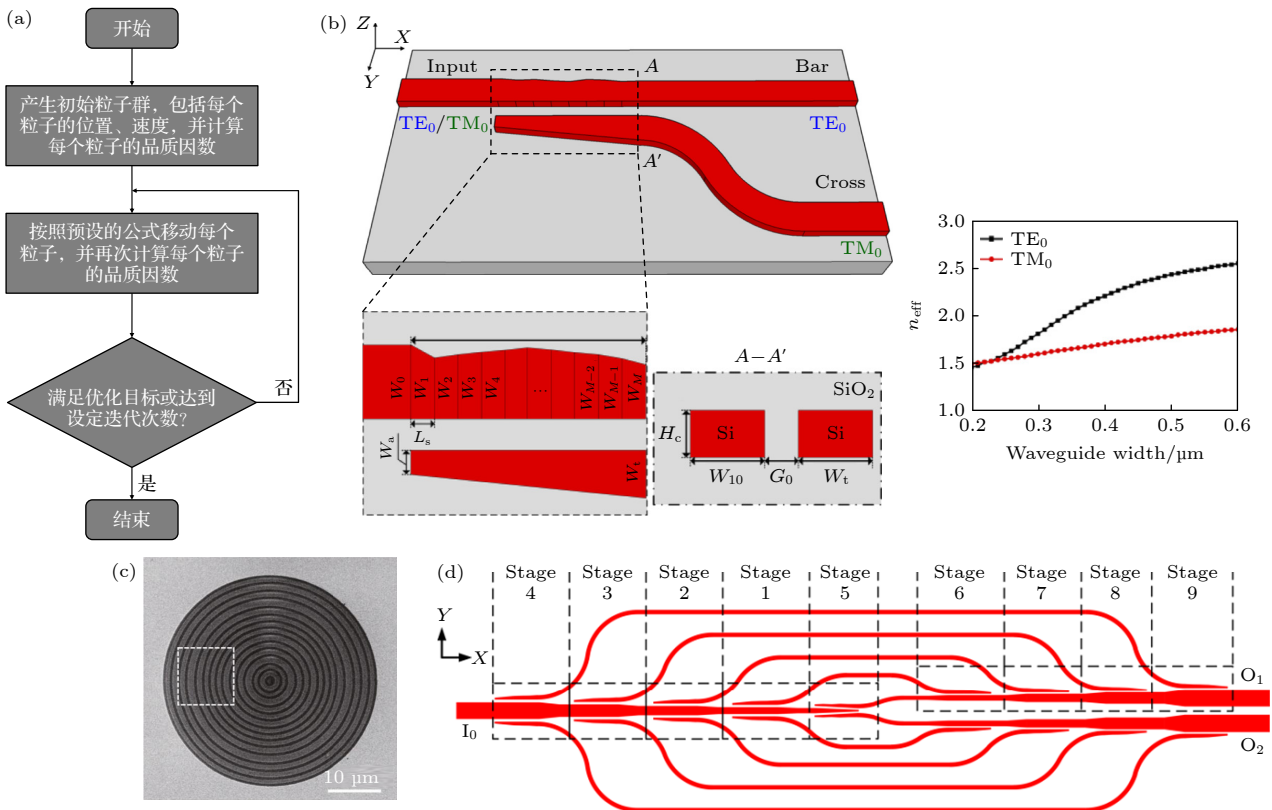


图 2 PSO 算法的流程图及 PSO 算法在光子器件设计领域的应用 (a) PSO 算法的流程图; (b) 利用 PSO 算法设计的片上偏振分束器 [74]; (c) 利用 PSO 算法优化设计的单层超临界透镜的 SEM 图 [75]; (d) 利用 PSO 算法设计的片上多模式功率分束器 [76]

Fig. 2. Flowchart of PSO algorithm and its application in photonic devices design: (a) Flowchart of PSO algorithm; (b) on-chip polarization beam splitter designed by PSO algorithm [74]; (c) SEM image of single-layer supercritical lens optimized by PSO algorithm [75]; (d) on-chip multi-mode power beam splitter designed by PSO algorithm [76].

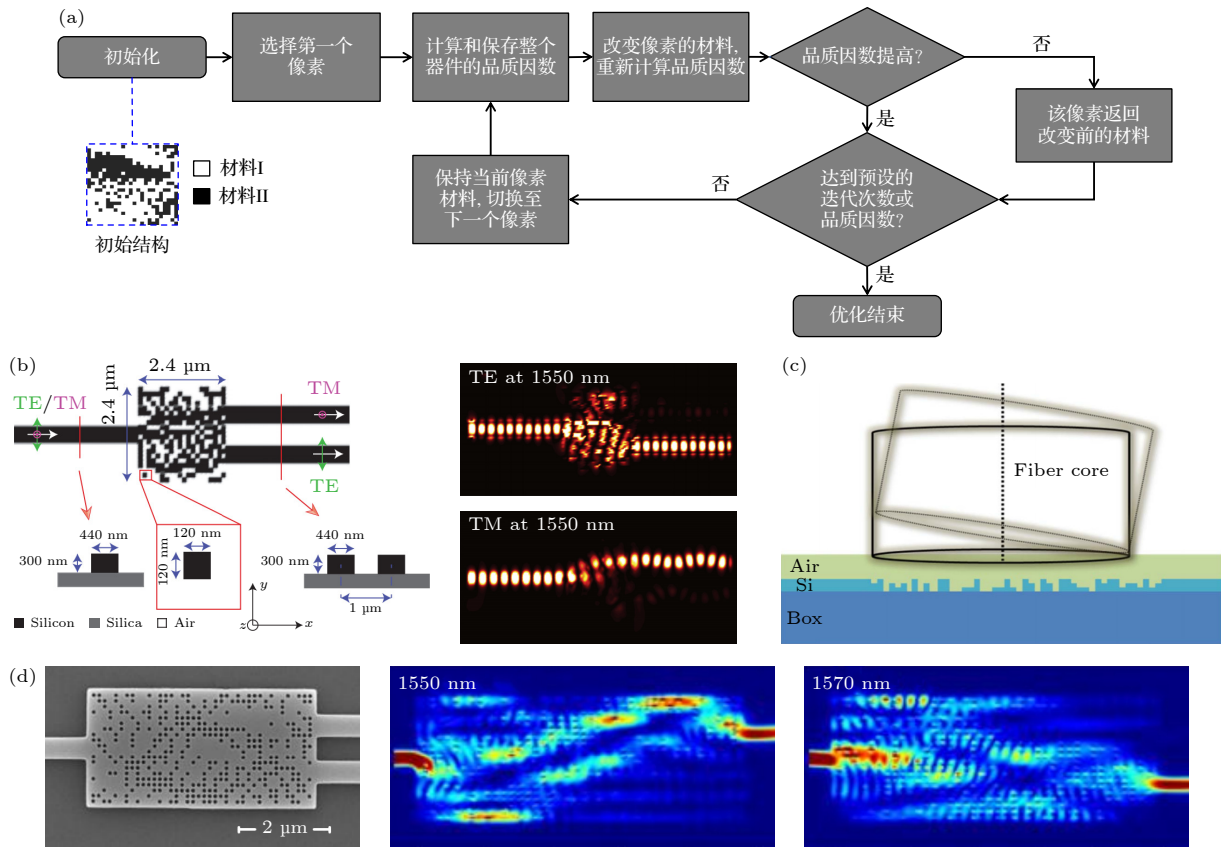


图 3 DBS 算法的流程图及 DBS 算法在光子器件设计领域的应用 (a) DBS 算法具体优化流程图; (b) 基于 DBS 算法设计的偏振分束器的结构图, 以及波长为 1550 nm 的 TE 和 TM 通过该器件时的光场图^[79]; (c) 利用改良的 DBS 算法设计的离散化纳米结构的侧视图^[80]; (d) 利用 DBS 算法设计的双通道波长解复用器及不同波长的光通过该器件时的光场图^[81]

Fig. 3. Flowchart of DBS algorithm and its application in photonic device design: (a) Flowchart of DBS algorithm; (b) structure diagram of the polarization beam splitter designed by DBS algorithm, and the light field diagram of TE and TM with a wavelength of 1550 nm passing through the device^[79]; (c) side view of the discretized nanostructures designed by the improved DBS algorithm^[80]; (d) dual-channel wavelength demultiplexer designed by DBS algorithm, and the optical field diagram when light of different wavelengths passing through the device^[81].

的带宽范围内, TE 和 TM 模式的传输效率都在 70% 以上, 相应的消光比大于 10 dB. 该器件的成功设计, 证明了 DBS 算法应用在片上光互连器件设计领域的可行性. 2016 年, Wen 等^[80] 提出了一种改良的 DBS 算法, 设计了一种类似条形码的一维纳米结构, 用于芯片与光纤的耦合, 解决了耦合角和偏振问题, 如图 3(c) 所示. 2017 年, Zhou 等^[81] 利用 DBS 算法设计了一个双通道的波长解复用器, 如图 3(d) 所示. 该器件具有 $2.6 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 的超紧凑占地面积, 在实验中显示出了 -2.3 dB 的插入损耗、 -16.4 dB 的串扰. 这些优点使其成为下一代芯片级光通信的有前途的组件.

伴随法 (adjoint method, AM) 是为了解决物理问题而提出的^[82]. 自提出以来, 它已被广泛应用于工业模型的优化设计^[83-85]. 近十年来, AM 也被广泛应用于光子器件的拓扑优化设计过程中^[86-88].

AM 是基于梯度信息进行优化的, 其核心思想是使用两次仿真的所得到的信息求出“全局梯度”, 再使用处理梯度信息的方法等进行优化^[89]. 得益于对梯度信息的利用, AM 的优化收敛速度很快, 且优化得到的光子器件性能较好, 在设计复杂功能光子器件时有一定优势. 时至今日, 已有大量的利用 AM 设计的片上光子器件问世. 例如, 2013 年, Lalau-Keraly 等^[86] 对 AM 在光子器件设计中的原理进行介绍, 并使用 AM 对一个功率分束器进行形状优化, 在 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 的区域内优化得到的分束器插入损耗低至 0.07 dB , 如图 4(a) 所示. 2018 年, Hughes 等^[87] 将 AM 应用到非线性光子器件的设计中, 进行了完整的推导并开发了一个完整的优化方法, 而后使用频域有限差分法进行数值仿真. 他们设计了两种光子器件, 当光功率较低时和较高时, 光子器件所实现的功能不一样, 如图 4(b) 和

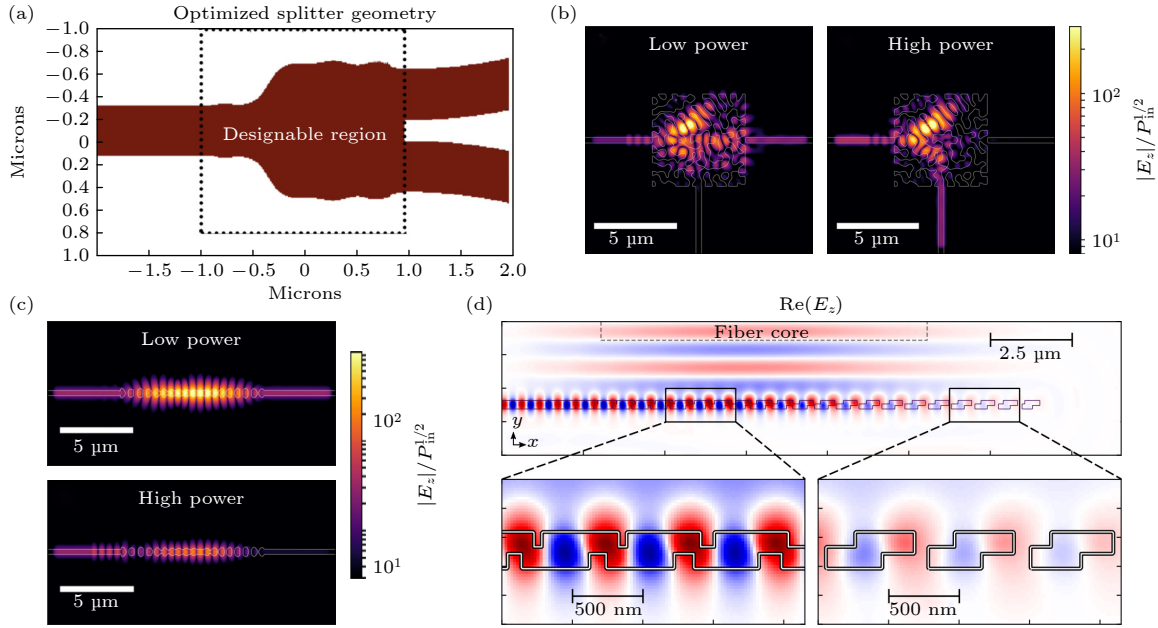


图 4 AM 在光子器件设计领域的应用 (a) 利用 AM 设计的功率分束器^[86]; (b), (c) 基于 AM 提出的两种非线性光子器件^[87]; (d) 使用 AM 优化的垂直光栅耦合器^[88]

Fig. 4. Application of AM in photonic device design: (a) Power splitter designed by AM^[86]; (b), (c) two nonlinear photonic devices designed by AM^[87]; (d) vertical grating couplers optimized by AM^[88].

图 4(c) 所示. 2018 年, Michaels 和 Yablonovitch^[88] 使用 AM 对垂直光栅耦合器进行优化设计, 首先得到的光栅耦合器在 1550 nm 处得到耦合效率为 99.2% (-0.035 dB) 的器件, 如图 4(d) 所示. 后续对该器件进行了约束优化, 以实现耦合效率超过 96% 和背反射小于 -40 dB 的垂直耦合器, 并可以使用 65 nm 分辨率的光刻机进行制作.

2.1.2 基于神经网络的智能设计方法

神经网络 (neural network) 是一种模仿大脑神经系统工作的强有力的计算模型, 可以利用数据学习和解决问题. 它无需事先确定输入输出之间的映射关系, 可以通过对自身的训练, 得到所需要的映射关系和规则, 从而在给定输入值时得到最接近期望输出值的结果. 神经网络起源于 20 世纪 50 年代, 到 20 世纪 90 年代, 误差反向传播 (error back propagation) 算法的提出使神经网络能够处理更加复杂的问题^[90]. 时至今日, 神经网络已全方位地走进人类生产生活的各个方面, 在目标识别^[91-100]、自然语言处理^[101-110]、智能交互^[111-113] 等很多领域都发挥了重要的作用. 随着计算机性能的不断提高, 神经网络的应用领域也变得愈加广泛.

自神经网络兴起以来, 各种结构的网络模型层出不穷, 数不胜数. 近些年来, 已有多种基于神经

网络的智能设计方法出现在了包含光互连器件在内的光子器件的设计过程中.

2019 年, Hammond 等^[114] 开发了一种实用的人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 架构, 包括用作“正向”设计和“逆向”设计的网络结构. 作为示例, 他们利用这个神经网络设计并制造了几个集成布拉格光栅, 如图 5(a) 所示. 经过训练, 他们提出的 ANN 的预测结果与实验测量结果吻合得很好, 证明了 ANN 在片上光子器件设计领域的成功. 类似地, 2021 年, Tu 等^[115] 利用深度神经网络 (deep neural network, DNN) 设计了一种光栅耦合器, 如图 5(b) 所示. 他们也建立了一种由光栅结构到光学响应的“正向”深度神经网络和一种更复杂的、由光学响应到光栅结构的“逆向”深度神经网络, 最终得到了较高的预测精度和较好的器件性能. 这两种网络架构也是基于神经网络的智能设计方法最常用的.

除了片上光子器件设计领域, 基于神经网络的智能化设计方法还在超表面等空间光调制器件设计领域发挥了重要的作用. 例如, 2022 年, An 等^[116] 关注于近场耦合效应对超表面设计的影响, 提出了一种基于深度学习的方法来预测大面阵中每一个超原子的精确电磁场响应. 首先, 他们通过仿真软件 CST 建立目标超原子的仿真数据集, 并基于卷

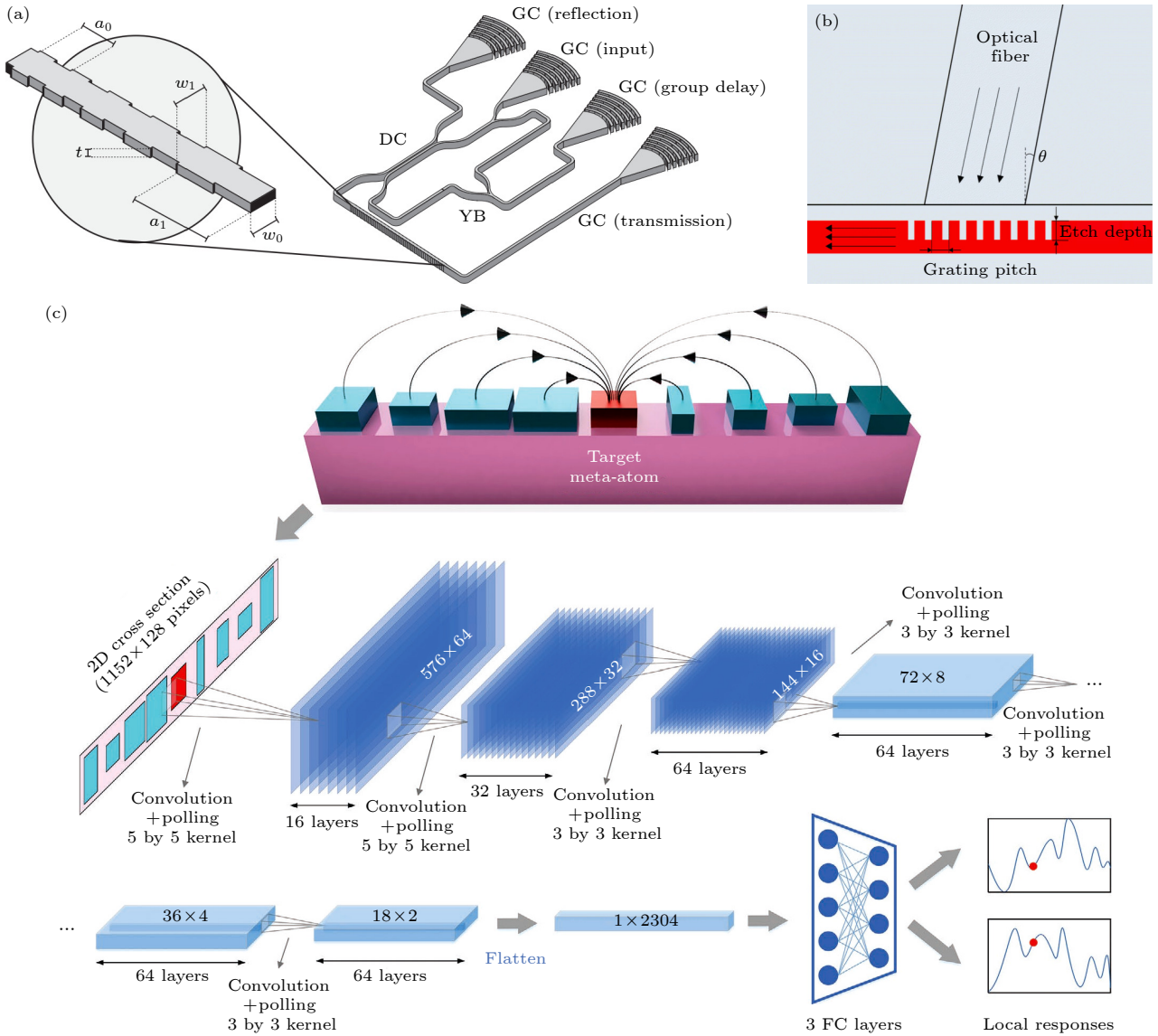


图 5 神经网络在光子器件设计领域的应用 (a) 基于神经网络架构设计的布拉格光栅^[114]; (b) 利用深度神经网络设计的光栅耦合器^[115]; (c) 用来预测超表面中的超原子光响应的 PNN 架构^[116]

Fig. 5. Application of neural network in photonic device design: (a) Bragg grating based on ANN architecture^[114]; (b) grating couplers designed using DNN^[115]; (c) PNN architecture for predicting meta-atom light responses in metasurfaces^[116].

积神经网络 (convolutional neural network, CNN) 建立预测网络模型 PNN (predicting neural network), 将目标超原子与邻近超原子的几何参数作为输入, 就可快速得到目标超原子的局部电磁场响应. 该预测网络模型的架构示意图如图 5(c) 所示. 该方法可用于提升超表面的效率, 如有效提升光束偏转器和超透镜的效率. 由于结构间的相互耦合作用被简化为一维模型, 后续还需要考虑复杂耦合模型的预测问题, 并用于提升多功能超表面的光响应. 与传统方法相比, 利用他们的神经网络设计出的光束偏转器和聚焦镜头在性能上有明显的提高.

在上述较为通用的网络架构的基础上, 人们又

聚焦于解决一些具体技术问题, 在光子器件的智能化设计过程中引入了很多新的神经网络架构, 从而使神经网络在光子器件设计领域逐渐成为了一种解决力强、适应性好的强大设计工具.

在前文所引述的工作中, “逆向”神经网络无疑具有非常强大的吸引力. 它在一定程度上能够根据输入的目标光响应迅速地反推出所需要的器件结构. 但是“逆向”神经网络也有一定的缺陷. 从原理上讲, 每一个器件结构都会单独对应一种光响应, 但是每一种光响应却未必会只对应一种器件结构. 这种“一多对应”的关系就会在“逆向”设计过程中造成“隐式冲突 (implicit conflicting)”^[117].

2018年, Liu等^[117]提出了一种“正、逆向串联神经网络 (tandem network)”的网络架构来解决“隐式冲突”. 他们构建了如图6(a)左图所示的串联神经网络, 即在“逆向”设计网络之后再串联一个预先训练好的“正向”预测网络. 在训练整个串联网络时只调整“逆向”设计网络中的权重分布. 他们将这个神经网络引入二氧化硅 (SiO_2) 和氮化硅 (Si_3N_4) 交错的多层膜系结构设计中, 来确定能够实现目标透射光谱的各层膜的厚度, 如图6(a)右图所示. 经过检验, 串联神经网络确实能够很好地克服隐式冲突, 从而顺利完成多层膜系结构的设计.

基础神经网络的另一个缺点是需要大量的数据作为训练集. 为了解决这一问题, 2021年, Ren等^[118]将DNN和GA结合, 提出了一种显著减小设计成本的设计方法——基于GA的深度神经网络 (genetic-algorithm-based deep neural network), 如图6(b)所示. 他们先利用GA的初代样本训练“正向”深度神经网络, 再将该神经网络反置作为“逆向”网络, 利用选择后的数据生成若干新的器件结构作为子代. 最后将这些后代添加到初始种群中, 并更新深度神经网络模型中的权重, 以开始下一次迭代. 该网络可以显著缩小设计类似器件所需要的计算量, 利用该网络, 他们设计了一系列的片上光互连器件. 同样为了解决所需数据量大的问题, 2022年, Zhao等^[119]提出了一种少样本数据增强迭代 (data enhanced iterative few-sample) 算法, 用来设计二维可编程手性超材料. 超材料示意图如图6(c)所示. 少样本数据增强迭代算法可分为“数据增强”和“迭代”两个主要阶段. 数据增强阶段是利用“正向”预测网络生成的“伪数据”来获得数据增强后的数据集. 迭代阶段是利用光谱以及附加的小误差参数来预测相应超材料的几何参数. 在迭代阶段, 他们同样用到了前文所述的串联神经网络. 最后, 通过将输出谱与输入谱进行比较来验证算法的结果是否令人满意. 该设计方法在灵活性、可扩展性和时间消耗方面明显优于传统逆设计方法和许多机器学习方法.

除了前文所述的工作之外, 2021年, Yeung等^[120]还开发了一种基于全局深度学习的逆设计框架来弥补训练完成的神经网络适用范围较为狭窄的短板. 他们首先将折射率、等离子体频率、结构参数等数据编码在彩色图像上, 之后利用这些图像训练条件深度卷积生成对抗网络 (conditional deep

convolutional generative adversarial network). 训练得到的网络可以用来设计跨越了多种材料、结构、目标的超表面, 一定程度上实现了神经网络的通用性. 该网络的训练和设计过程如图6(d)所示.

2.2 智能设计方法的优势

经过近几十年的发展, 智能设计方法已凭借其特有的优势在光子器件设计领域稳定立足. 相比于一些传统的光子器件设计方法, 智能设计方法具有设计思路直接、器件紧凑度高、人力成本低等几个显著的优势.

首先, 在方法的设计思路方面. 大多数智能设计方法在设计器件时都是利用器件结构与光响应之间的直接联系, 因此无需对器件中复杂的物理过程进行解析. 例如, 基于GA和PSO算法的智能设计方法往往将器件的几何参数或几何参数组合 (例如, 长度、角度、间隔) 作为待优化对象 (染色体或粒子), 每个几何参数或几何参数组合对应的光响应作为评价指标. 当它们进行优化时, 只需要将这些参量当作数字, 再按照预定方式进行搜索, 无需考虑几何参数或几何参数组合具体是如何对光响应产生影响的, 从而使研究者的设计更加方便和专注. 类似地, 基于DBS算法的智能设计方法在优化时也只利用每个正在搜索的像素的状态与整个器件的光响应之间的直接联系, 无需考虑器件中复杂的电磁场分布. 而基于神经网络的智能设计方法更是聚焦于建立器件结构与器件光响应之间的直接联系 (隐式函数), 从而“绕开”大量的仿真或实验工作来获取所需的数据. 之后再根据所获得的数据找到最优的器件结构. 与此同时, 智能设计方法对不同材料具有广泛兼容性, 这使得研究者无需在设计前专门对每种材料进行深入的理论研究. 在设计光子器件时, 每种材料的光学特性例如折射率和消光系数都是不相同的. 每种材料独有的光学特性会导致光响应的特异性. 传统的设计方法不可避免地要考虑每种材料的光学特性, 并针对该种材料进行单独设计. 相反, 智能设计方法避免了过多关注材料的光学特性这一弊端. 它们只需要收集该种材料的结构与光响应之间的对应数据并进行寻优, 无需专门为某种材料制订单独的优化方法.

其次, 在器件的紧凑度方面. 相比于绝大多数的传统设计方法, 大多数智能设计方法的搜索自由度更大. 从很多经典智能算法的寻优原理中可以

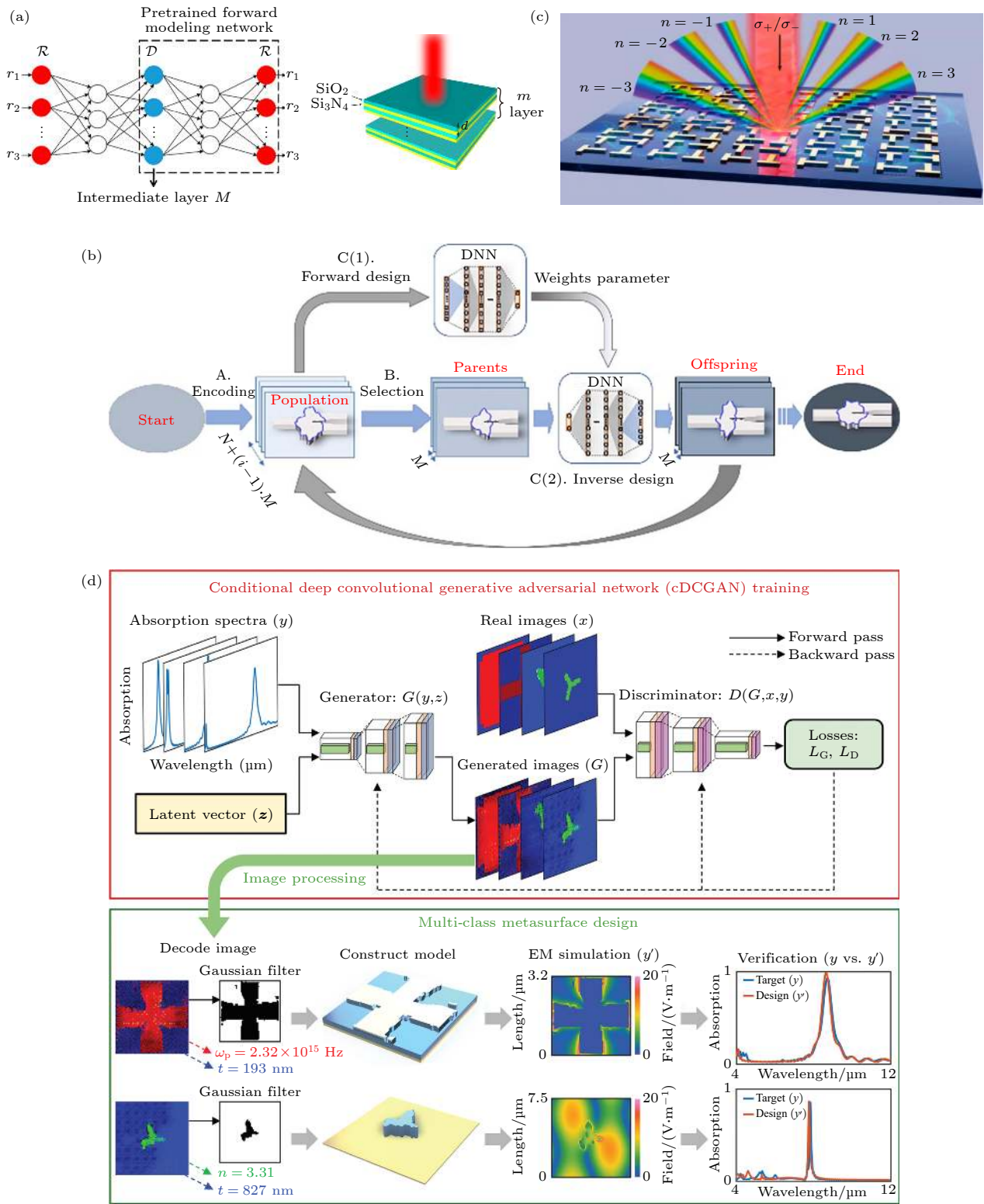


图 6 用来解决一些具体技术问题的神经网络架构 (a) “正、逆向串联”神经网络示意图以及利用该网络设计的多层膜系结构 [117]; (b) 基于 GA 的深度神经网络 [118]; (c) 利用少样本数据增强迭代算法优化得到的二维可编程手性超材料 [119]; (d) 一种基于全局深度学习的逆设计框架的训练和设计过程 [120]

Fig. 6. Neural network architectures used to solve some specific technical problems: (a) Schematic of the “forward and backward series” neural network and the multilayer structure designed by this network [117]; (b) GA-based DNN [118]; (c) two-dimensional programmable chiral metamaterial optimized by data enhanced iterative few-sample algorithm [119]; (d) training and design process of an inverse design framework based on global deep learning [120].

看出,它们往往能够在相当紧凑的范围内进行充分的搜索.这就使得利用智能设计方法在很小的空间范围内获得满足设计目标的器件结构的可能性更大,从而使得智能设计方法在所设计器件的紧凑度方面具有独特的优势.

最后,在优化的人力成本方面.很多智能设计方法都是由计算机代替人类进行试错并收集信息,再利用已完成的优化所产生的信息指导后续的优化.通过将繁重的信息收集与规律学习过程交给计算机完成,研究者得到了很大程度的解放,能够更加专注于器件功能、适应性、应用场景等方向的创新.

另外,大多数经典智能算法往往能够同时对多个几何参数进行搜索,而这是手动调参或参数扫描难以实现.这就使得很多智能设计方法相比于传统设计方法在优化速度方面具备了优势.

2.3 智能设计方法的有待提升之处

虽然与传统设计方法相比,智能设计方法在人力成本和器件尺寸方面都大幅减小,但是智能设计方法也存在一些有待提升之处.

首先是智能化设计的器件,在加工时往往会遇到一些挑战.智能化设计的器件往往非常紧凑,这就对器件的加工精度提出了很高的要求.例如,DBS算法设计的片上光互连器件往往需要在SOI的顶硅平面上刻蚀若干极微小的区域.刻蚀中心的偏移、刻蚀尺寸的变化以及两刻蚀区域之间硅材料的完整性都会对最终的器件光响应产生一定的影响.而且,由于反应离子刻蚀(reactive ion etching)滞后效应等效应的影响,现有的制造水平很难将设计出的器件结构的细节完全加工,而是会存在一定的误差.器件的尺寸越小,这些误差的影响就越大.因此,智能化设计的器件走向更高水平的应用还需要芯片加工工艺的进一步提升.

其次是智能化设计的器件,其中的物理过程相对难以定量描述.由于智能化设计的器件在一个非常紧凑的空间尺度内完成对电磁场的操控,因此其中的电磁场变化过程以及相互作用情况非常复杂.这个复杂的物理过程有时难以用数学方法进行定量描述,需要通过仿真来展示.

传统设计方法是智能化设计的基础,研究者只有在充分理解传统设计方法的思想、原理、过程的基础上,才能为智能化设计提供合适的初始参数

等条件,才能大幅避免智能化设计过程中的冗余成本.

3 智能化设计的超紧凑片上光互连器件

本节介绍智能化设计的光互连器件相对于传统设计结果的一个重要、显著的优势——器件尺寸大幅度减小,器件紧凑度大幅度提升.时至今日,不论是电子芯片领域的发展经验还是层出不穷的大规模集成光电子芯片,都显示出了单器件尺寸减小所带来的巨大效益^[121–123].片上光互连器件所占区域的减小可以使宝贵的芯片面积得到更加充分的利用.

传统方法设计片上光互连器件时,由于一些物理过程需要较大的作用尺度以及传统设计的参数空间较小等原因,有时设计出的器件不得不占用较大的面积.而以上问题和弊端都可以利用智能设计方法加以克服.智能设计方法可以利用其广阔的参数空间和充足的搜索自由度在一个很小的区域内搜索出能够实现目标光响应的器件结构.更进一步地,从优化目标的角度来说,智能设计方法往往无需深究在超紧凑的区域内发生的复杂物理过程,也无需过多关注所设计器件的具体形状,只需要关注目标光响应是否得到优化.

本节从两个方面介绍了智能化设计的超紧凑片上光互连器件的优势和成果.第1个方面是研究者无需指定特定的初始结构,可以利用智能设计方法直接设计出超紧凑的片上光互连器件;第2个方面是研究者可以基于传统的设计理论,先给定一个传统方法设计的器件基础,再利用智能设计方法在超紧凑空间内优化得到满足光响应要求的片上光互连器件.

3.1 通过智能设计方法直接设计超紧凑片上光互连器件

本节通过介绍3种在光互连领域有重要应用的器件——(多模)功率分束器、模式(分解)复用器和(多模)弯曲波导的智能化设计过程,来说明利用智能设计方法直接设计超紧凑光互连器件的优势:无需给定初始结构或仅给定简单形状作为初始结构,利用智能化设计强大的搜索能力直接搜寻满足光响应要求的器件结构.在这些器件的设计过

程中, 研究者的双手得到了很大程度的解放. 这些智能化设计的器件, 与传统方法设计的相同(似)功能的器件相比, 尺寸上往往会有数量级程度的缩小. 它们之间的对比清晰地显示了智能设计方法在提升器件紧凑度方面的巨大作用.

功率分束器是一种重要的光子器件, 可用于包含光互连在内的诸多应用场景. 特别是多模功率分束器, 常常用于多模光互连系统, 如模分复用 (mode-division multiplexing, MDM) 系统. 它能够对一束光束进行分裂, 让产生的新光束向不同方向传播, 从而实现信息的一对多传递. 2013 年, Zhang 等^[124]

利用 PSO 算法设计了一种波长不敏感的单模功率分束器, 该器件的结构如图 7(a) 所示. 该器件的外轮廓由 13 条线段的长度决定, PSO 算法用来寻找这 13 条线段长度的最优组合. 该器件的尺寸小于 $1.2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$, 相比于 2022 年 Kumari 和 Prince^[125] 利用光束传播法 (beam propagation method) 设计的基于 S 形曲线脊波导的波长不敏感单模功率分束器, 其尺寸有了数量级程度的减小. 利用光束传播法设计的功率分束器的结构如图 7(b) 所示, 它最小的分束区域 (区域 3) 中 S 形曲线脊波导的曲率半径为 $325 \mu\text{m}$, 器件的实际长度大于 $25 \mu\text{m}$.

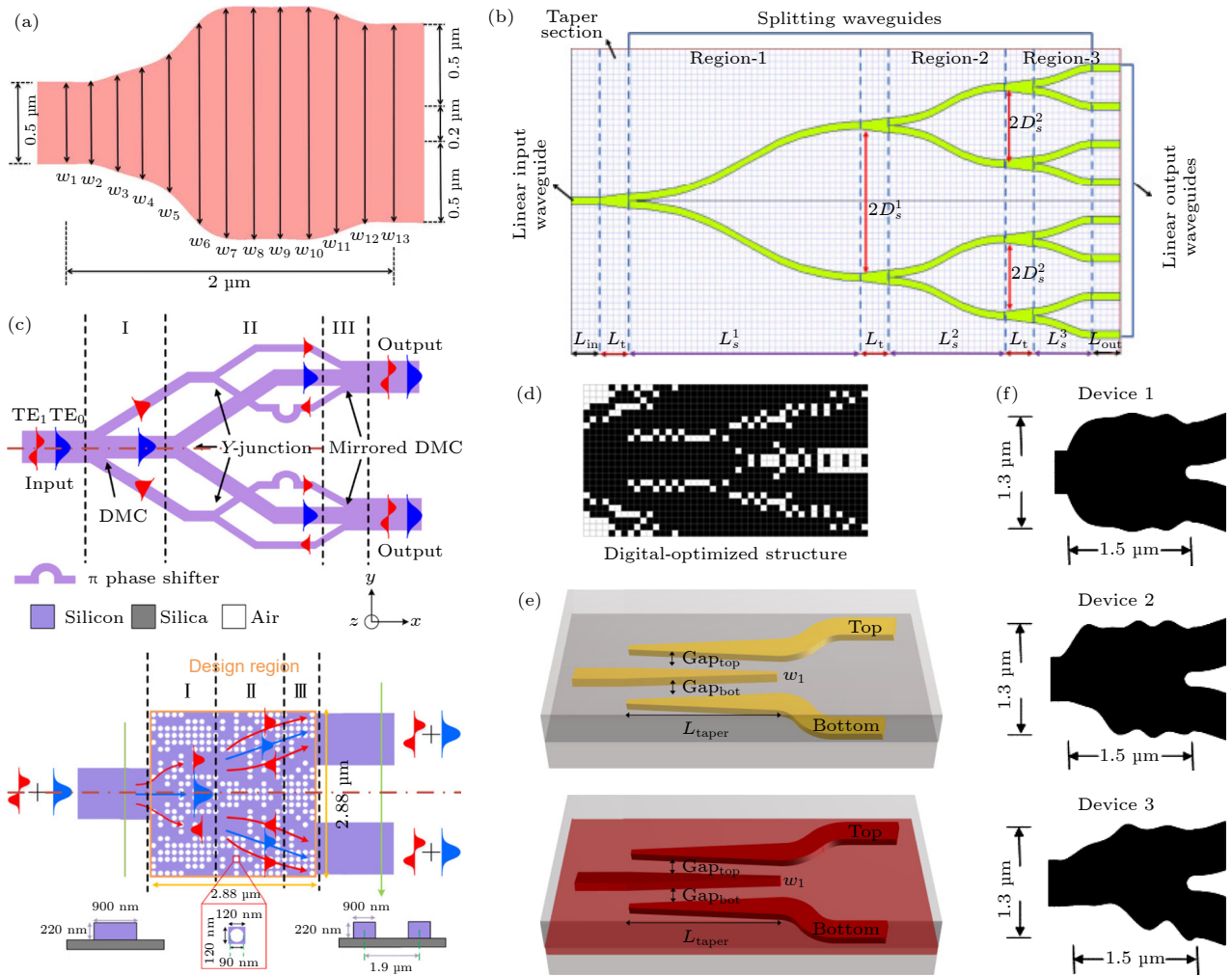


图 7 几种由不同方法设计的功率分束器及对比 (a) 利用 PSO 算法设计的波长不敏感的单模功率分束器^[124]; (b) 利用传统方法设计的基于 S 形曲线脊波导的波长不敏感单模功率分束器^[125]; (c) 传统方法设计双模功率分束器的原理示意图 (左) 和基于对称优化的 DBS 算法设计的双模功率分束器 (右)^[126]; (d) 利用多种算法分阶段优化设计的超宽波段适用的双模功率分束器^[127]; (e) 基于传统方法设计的任意分束比的功率分束器架构示意图^[128]; (f) 基于 QPSO 算法设计的几种不同分束比的功率分束器^[129]

Fig. 7. Several power splitters designed by different methods and their comparison: (a) Wavelength insensitive single-mode power splitter designed by PSO algorithm^[124]; (b) wavelength insensitive single-mode power splitter based on S-shaped curved ridge waveguide designed by conventional methods^[125]; (c) schematic of dual-mode power splitter designed by conventional method (left) and dual-mode power splitter designed by symmetric-optimize-DBS algorithm (right)^[126]; (d) dual-mode power splitter suitable for ultra-wide band optimized by multiple algorithms^[127]; (e) schematic of the power splitter with arbitrary split ratio designed by conventional methods^[128]; (f) power splitters with different split ratios designed by QPSO algorithm^[129].

随着人们对通信带宽的要求越来越高,光的模式作为一个单独的维度受到越来越多的重视. 利用光的不同模式之间互不干扰的特性,人们可以在一条通路里实现多种模式同时传播,从而成倍地增大通信带宽. 因此,适用于如MDM系统的多模光互连系统中的多模功率分束器应运而生. 2018年,Chang等^[126]分析了传统方法设计双模功率分束器时在紧凑度方面所受到的限制,并提出了一种基于对称优化的DBS算法设计的双模功率分束器,如图7(c)所示. 他们提出,如果按照耦合的方法设计双模功率分束器,则该分束器的重要组件——双模转换器(dual-mode convertor)需要100 μm 以上的耦合长度,整个器件的总长度可能大于200 μm ^[126]. 而他们提出的相同功能的双模功率分束器的尺寸仅为2.88 μm ×2.88 μm ,器件紧凑度得到了大幅度的提升. 除了他们的工作之外,2022年,Xu等^[127]也通过利用多种算法分阶段优化的方式得到了相同功能的、超宽波段适用的双模功率分束器. 该双模功率分束器的结构如图7(d)所示. 他们提出了一种模拟数字拓扑优化(analog and digital topology optimization)的方法,首先设计出模拟的拓扑结构,然后再利用DBS算法对模拟的拓扑结构进行二次优化,设计出适合加工的数字优化的结构. 他们优化得到的器件的尺寸为5.4 μm ×2.88 μm ,也能达到超紧凑的程度.

在光互连的实际应用场景中,光束并不总是要求平均分束,人们需要一套能够根据不同的需求场景灵活设计功率分束比的设计框架. 2021年,Zhu等^[128]提出了利用传统方法设计锥形波导从而构建基于不同材料的任意分束比的功率分束器,该分束器可用于波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)光子回路. 他们通过70 nm浅刻蚀的方式构建了基于硅材料的脊波导和基于氮化硅材料的锥形脊波导,再通过调整锥形脊波导之间的间隙宽度来实现不同分束比的光功率输出. 该设计架构如图7(e)所示,设计出的几种分束比的功率分束器所需的作用距离在45—80 μm 之间. 而在2019年,Sheng等^[129]基于改进的PSO算法——量子PSO(quantum particle swarm algorithm, QPSO)算法提出了一种可以设计任意功率分束比的功率分束器的智能化设计框架. 在QPSO算法中,粒子被认为具有量子行为,粒子的状态由波函数决定. 与传统的PSO算法相比,QPSO算法中粒子的多样

性将大大提高,因此该算法可以更好地处理设计目标复杂的问题^[129]. 他们利用QPSO算法优化18个顶点所处的坐标,设计了一系列的不同分束比的功率分束器. 这些器件的尺寸仅为1.5 μm ×1.3 μm ,接近亚微米的尺度. 比起前文所述的基于锥形波导的功率分束器,紧凑度提升了至少一个量级. 其中几个器件的示意图如图7(f)所示.

以上介绍的几种由不同方法设计的功率分束器,相同功能的智能化设计和传统设计结果在尺寸方面的对比如表1所列.

表1 相同功能的智能化设计和传统方法设计的功率分束器的尺寸对比

Table 1. Size comparison of power beam splitters designed by intelligent and conventional design methods with the same function.

功率分束器类型	智能化设计结果 最大长度/ μm	传统设计结果 最大长度/ μm
波长不敏感单模	2	>25
双模	2.88/5.4	>200
任意分束比	1.5	>45

模式(分解)复用器是片上模分复用光互连系统的关键组件. 通过模式复用器的调控,各个输入光路中的光会分别以不同的模式在总线中并行传输而互不干扰,之后再通过模式分解复用器进入对应的输出光路,从而成倍地提升光互连系统的通信带宽. 在极紧凑的尺寸内高效地实现模式(分解)复用一直是研究者们追求的目标,过去一段时间,基于定向耦合等传统设计方法,人们设计出了一些多通道的模式(分解)复用器. 然而,这些器件的尺寸往往较大,难以达到极紧凑的目标. 近些年,在智能设计方法的帮助下,越来越多的超紧凑模式(分解)复用器问世,为片上光子器件大规模集成带来了重大利好.

2018年,Chang等^[130]提出了一种基于DBS算法设计的二阶模式复用器. 该器件可以将片上光互连系统的通信带宽增大一倍,它的结构示意图如图8(a)所示. 该器件的尺寸为2.4 μm ×3 μm ,与2013年Ding等^[131]设计的基于锥形定向耦合器的二阶模式复用器相比(如图8(b)所示),长度从几十微米到了几微米,尺寸有了大幅度的减小. 2020年和2022年,Xie等^[132]和Zhou等^[133]分别提出了两种结构的四阶模式(分解)复用器. 这两种器件均是由DBS算法设计的,它们的结构示意图如

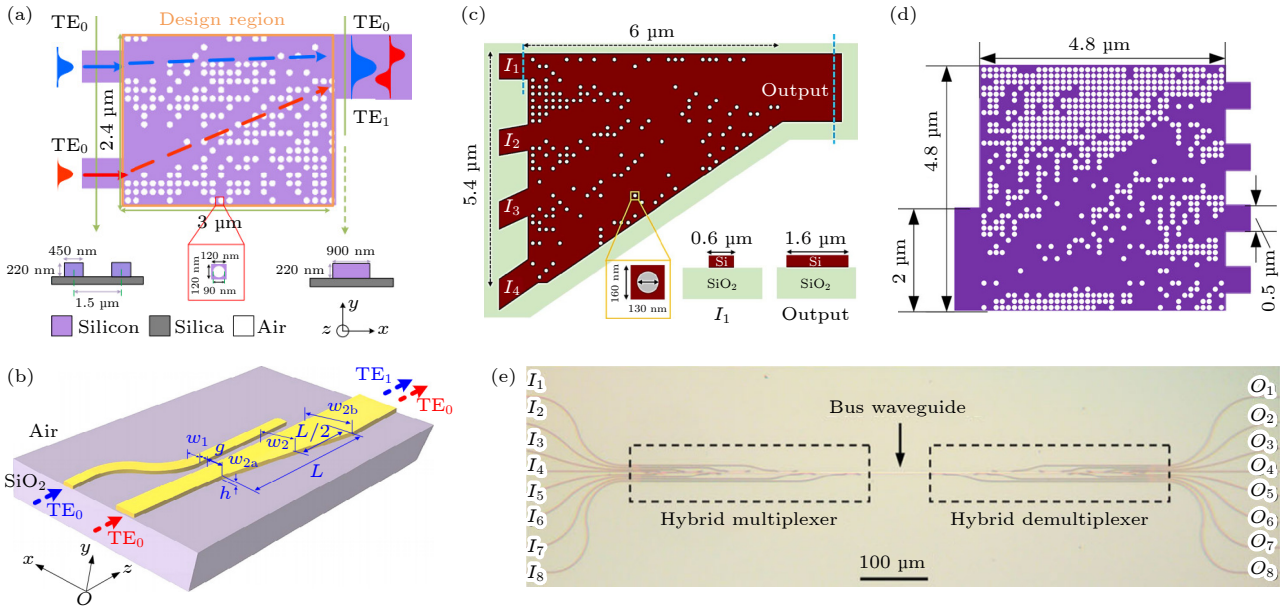


图 8 几种由不同方法设计的模式(分解)复用器及对比 (a) 基于 DBS 算法设计的二阶模式复用器^[130]; (b) 基于锥形定向耦合器的二阶模式复用器^[131]; (c), (d) 两种由 DBS 算法设计的四阶模式(分解)复用器^[132,133]; (e) 八阶模式/偏振(分解)复用器的光学显微镜成像图^[134]

Fig. 8. Several mode (de)multiplexers designed by different methods and their comparison: (a) Two-mode multiplexer based on the DBS algorithm^[130]; (b) two-mode multiplexer based on conical directional coupler^[131]; (c), (d) two kinds of four-mode (de)multiplexers designed by the DBS algorithm^[132,133]; (e) optical microscope image of the eight-mode/polarization (de)multiplexers^[134].

图 8(c) 和图 8(d) 所示. 这两种四阶模式(分解)复用器的尺寸相仿, 分别是 $5.4 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ 和 $4.8 \mu\text{m} \times 4.8 \mu\text{m}$. 相比于 2014 年 Wang 等^[134] 提出的传统方法设计的八阶模式/偏振(分解)复用器(两种偏振状态, 每种偏振状态四阶模式), 尺寸缩减了两个量级左右. Wang 等^[134] 提出的八阶模式/偏振(分解)复用器的光学显微镜成像图如图 8(e) 所示, 其长度达到了百微米的量级.

以上介绍的几种由不同方法设计的模式(分解)复用器, 相同或相似功能的智能化设计和传统设计结果在尺寸方面的对比如表 2 所列.

表 2 相同(似)功能的智能化设计和传统方法设计的模式(分解)复用器的尺寸对比
 Table 2. Size comparison of mode (de)multiplexers designed by intelligent and traditional design methods with the same (like) function.

模式(分解)复用器类型	智能化设计结果 最大长度/ μm	传统设计结果 最大长度
二阶	3	十微米量级
四阶/八阶(含偏振态)	6/4.8	百微米量级

除了一些用于片上光互连系统的功能器件外, 器件之间的连接波导的紧凑度也是一个不可忽视的问题. 以弯曲波导为代表的器件间连接波导也可

应用智能设计方法来大幅缩减其占地面积. 弯曲波导是几乎所有的大规模光子器件集成系统中不可或缺的连接组件, 用来引导光束改变传播方向, 从而帮助光子器件集成系统合理布局. 如果不对弯曲波导做专门设计, 则实现光路 90° 转弯的弯曲波导需要很大的转弯半径才能保证不出现大的损耗. 这对于片上光互连系统等光子器件集成系统的集成化来说非常不利. 除此之外, 随着光的模式逐渐被应用到光互连系统中来拓展带宽, 支持多模式低损耗的多模弯曲波导也成为了光互连系统的必须组件^[135].

2022 年, Zhou 等^[133] 在提出超紧凑四阶模式(分解)复用器的同时也提出了一种单模式的 90° 弯曲波导, 其结构示意图如图 9(a) 所示. 该 90° 弯曲波导同样也是基于 DBS 算法设计, 非对称结构, 尺寸为 $2.4 \mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$, 将原本需要很大转弯半径和很大占地面积的普通弯曲波导进行了充分的压缩.

至于能够支持多模式低损耗的多模弯曲波导, 也已有许多基于传统方法和智能设计方法的成果出现. 2013 年, Jiang 等^[136] 提出了一种基于修正欧拉曲线的多模 90° 弯曲波导, 其设计示意图如图 9(b) 所示. 该弯曲波导由两个 45° 弯曲波导组成, 波导核心宽度为 $2.36 \mu\text{m}$, 能够支持 4 种横磁(transverse magnetic, TM) 模式. 其有效半径可以

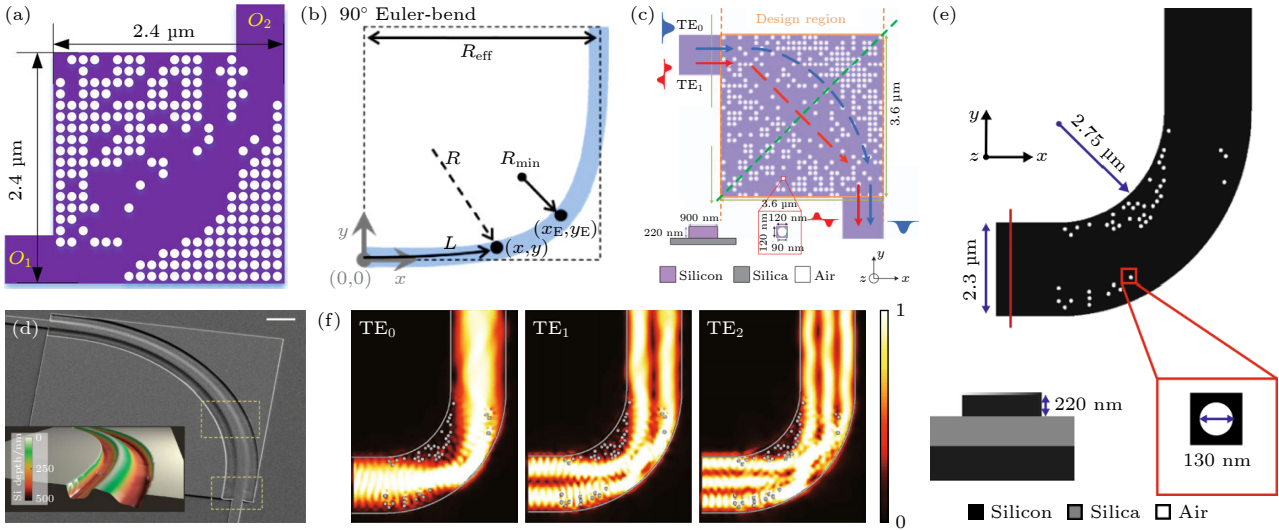


图 9 几种由不同方法设计的单、多模弯曲波导及对比 (a) 基于 DBS 算法设计的单模式 90° 弯曲波导 [133]; (b) 传统方法设计的基于修正欧拉曲线的多模 90° 弯曲波导 [136]; (c) 利用 DBS 算法设计的双模 90° 弯曲波导 [137]; (d) 基于 TO 的使用了灰度刻蚀技术的三模 90° 弯曲波导 [138]; (e) 利用 DBS 算法设计的三模 90° 弯曲波导 [139]; (f) 利用 DBS 算法设计的三模 90° 弯曲波导的模拟光场分布示意图

Fig. 9. Comparison of several single- and multi-mode bending waveguides designed by different methods: (a) Single-mode 90° bending waveguide designed by DBS algorithm [133]; (b) four-mode 90° bending waveguide based on modified Euler curve designed by conventional methods [136]; (c) two-mode 90° bending waveguide designed by DBS algorithm [137]; (d) three-mode 90° bending waveguide based on TO using grayscale etching technology [138]; (e) three-mode 90° bending waveguide designed by the DBS algorithm [139]; (f) schematic of simulated light field distribution of the three-mode 90° bending waveguide in (e).

小至 $45\ \mu\text{m}$, 约为常规 90° 弯曲波导有效半径 (大约 $175\ \mu\text{m}$) 的 $1/4$. 这是用传统方法设计的较为紧凑的多模弯曲波导的一个代表. 2018 年, Chang 等 [137] 基于一对非对称“Y”形结, 利用 DBS 算法设计了一种能够支持两种模式的双模 90° 弯曲波导, 其结构示意图如图 9(c) 所示. 该器件能够在 $3.6\ \mu\text{m} \times 3.6\ \mu\text{m}$ 尺寸范围内实现双模 90° 转弯, 并保持了很低的模间串扰. 为了实现 3 种横电 (transverse electric, TE) 模式的 90° 转弯, 2012 年, Gabrielli 等 [138] 提出了一种基于变换光学 (transformation optics, TO) 的三模 90° 弯曲波导. 该波导需要使用灰度刻蚀技术, 其结构在图 9(d) 中详细展示. 基于这种复杂的结构, 它们在 $78.8\ \mu\text{m}$ 的转弯半径下, 采用 $4\ \mu\text{m}$ 宽的波导实现了 3 种 TE 模式的 90° 转弯. 在该工作基础上, 2019 年, Liu 等 [139] 设计了同样功能的三模 90° 弯曲波导, 如图 9(e) 所示. 他们利用 DBS 算法在一段圆弧形波导基底上设计了这种三模 90° 弯曲波导, 该圆弧的转弯半径仅为 $2.75\ \mu\text{m}$, 波导宽度为 $2.3\ \mu\text{m}$, 与 Gabrielli 等 [138] 的工作相比, 器件尺寸同样有了量级程度的减小. 这又一次证明了智能设计方法在提升器件紧凑度方面的巨大作用. TE_0 — TE_2 三个模式在该三模 90° 弯曲波导中的模拟光场分布示意图如所图 9(f) 示.

以上介绍的几种由不同方法设计的弯曲波导, 相同或相似功能的智能化设计和传统设计结果在尺寸方面的对比如表 3 所列.

表 3 相同 (似) 功能的智能化设计和传统方法设计的 90° 弯曲波导的尺寸对比

Table 3. Size comparison of bendings designed by intelligent and traditional design methods with the same (like) function.

弯曲波导类型	智能化设计结果 转弯半径/ μm	传统设计结果 转弯半径/ μm
三模	2.75	78.8
其他多模	<3.6(双模)	45(4种TM模式)

3.2 利用智能设计方法优化传统设计结果得到的片上光互连器件

除了利用智能设计方法直接设计超紧凑片上光互连器件之外, 很多研究者还将目光放在了利用智能设计方法对传统设计的片上光互连器件的优化上. 他们将正向设计初步确定的器件结构作为初始结构, 利用智能设计方法的优化能力在超紧凑的尺度内对已有结构的光响应进行优化提升或者大幅减小原器件的占地面积.

如前文所述, 2020 年 Chen 等 [74] 利用 PSO 算

法优化反锥形耦合器结构设计出的片上偏振分束器就是一个典型的代表. 该器件的结构如图 10(a) 所示, 其设计过程如下: 首先, 按照传统方法的耦合模理论设计出大致的倒锥形波导耦合区域; 之后, 利用 PSO 算法优化耦合区域中波导的形状, 使得输入端口的 TM_0 模式能够在很短的距离内耦合至“交叉”出口. 相比于完全基于传统耦合模理论设计的同功能偏振分束器, 例如 2017 年 Wu 等 [140] 设计的如图 10(b) 所示的结果, 其能够将达到预期目标所需的耦合长度大幅度减小. Chen 等 [74] 设计的片上偏振分束器的耦合长度为 $5\ \mu\text{m}$, 而 Wu 等 [140] 设计片上偏振分束器需要在大于 $20\ \mu\text{m}$ 的长度内实现 TE_0 模式和 TM_0 模式的分束.

类似地, 2018 年, Huang 等 [141] 提出的偏振分

束器也是基于“智能设计方法优化传统光互连器件”这一原理. 按照他们所解释的原理, 传统的并列靠近的直波导若要发生耦合需要一段较长的耦合距离, 为了减小这段耦合距离, 他们选择在一段很短的耦合区域内加入硅材料进行辅助, 利用 AM 设计硅材料的特定位置分布, 从而使目标光束在这段很短的区域内就达到目标耦合效率. 他们设计了几种应用于不同波长条件下的偏振分束器, 这些器件的结构如图 10(c) 所示. 在这些器件中横向和纵向的模拟电磁场密度分布也如图 10(c) 所示.

除了偏振分束器之外, 2017 年, Piggott 等 [142] 利用带有制造约束的水平集方法设计的“50-50 定向耦合器”也是一个“智能优化传统光互连器件”的实例. 他们同样也是在一段耦合区域中改变耦合波

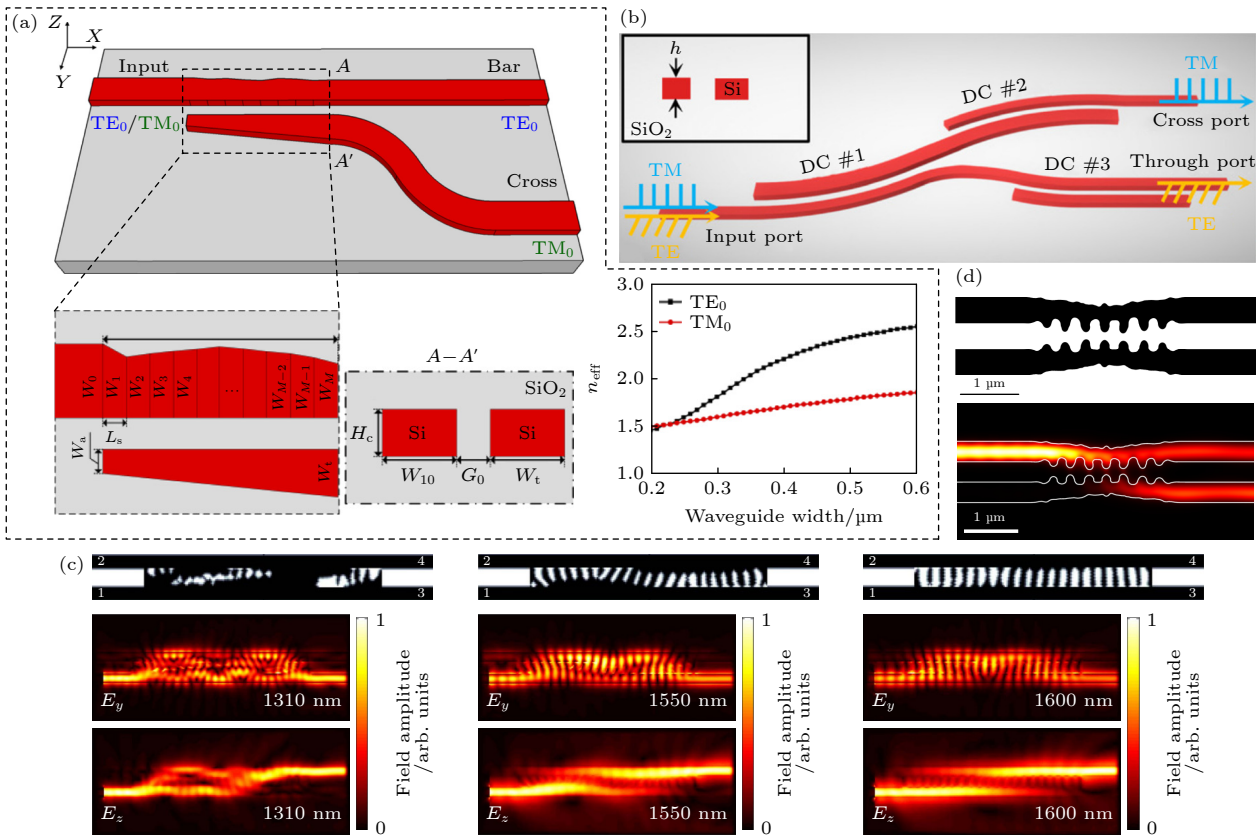


图 10 几种利用智能设计方法优化传统光互连器件得到的结果及其对比器件 (a) 利用 PSO 算法优化反锥形耦合器结构设计出的片上偏振分束器 [74]; (b) 完全基于传统耦合模理论设计的偏振分束器 [140]; (c) 利用 AM 优化耦合区域间隙设计的几种用于不同波长条件下的偏振分束器, 以及其中的横向和纵向的模拟电磁场密度分布 [141]; (d) 利用带有制造约束的水平集方法设计的功率分束器, 以及其中的模拟电磁场密度分布 [142]

Fig. 10. Several results obtained by using intelligent design methods to optimize conventional optical interconnect devices, and their comparison devices: (a) On-chip polarization beam splitter designed by using the PSO algorithm to optimize the anti-conical coupler [74]; (b) polarization beam splitters designed by conventional methods [140]; (c) several polarization beam splitters designed for different wavelength conditions using the AM to optimize the coupling region gap, and their simulated electromagnetic field density distributions [141]; (d) power splitter designed using a level set method with manufacturing constraints, and the simulated electromagnetic field density distribution in it [142].

导的形状来辅助提升耦合效率,从而大幅减小了光束耦合至目标比例所需要的长度.该器件的结构示意图以及其中的模拟电磁场密度分布如图 10(d)所示.

4 智能化设计的可调控片上光互连器件

片上光互连器件的超紧凑化对光互连的发展起到了极为重要的推动作用.与此同时,光互连的进一步发展还体现在对功能选项的需求的增加上.例如,如果能够实现互连光路的自主开关、不同情境下对复用因素的选择性提取、实时控制光路中的光场强度等,那么光互连的应用范围与应用场景都会得到极大地拓展.

过去一段时间,人们尝试了利用硅波导的电光、热光效应实现对光子器件的调控^[143,144].基于电光、热光效应设计的可调控器件拥有成熟的技术,但有以下不足:硅材料折射率的改变范围小,导致器件尺寸大,与片上光互连器件紧凑化、集成化的趋势相违背;需要持续的外界能量输入来维持调控,能耗较大.因此,将可以在极紧凑空间内大幅度改变折射率的相变材料集成到光互连器件上就成为了可调控片上光互连器件的一大重要发展趋势^[145].

另一方面,利用传统的设计方法设计可调控片上光互连器件时难以避免大量的理论计算或者参数扫描,这使得研究者在设计过程中要付出大量的人力成本.由于智能设计方法对不同材料具有广泛的兼容性,因此智能设计方法正在成为一种方便快捷的设计可调控片上光互连器件的手段.

4.1 用于可调控光子器件设计的相变材料

具有非易失性、可调控功能的光互连器件是下一代光子集成回路 (photonics integrated circuit, PIC) 的重要组成部分.目前,可调控光子器件已有多种实现方法.例如,利用内嵌的加热器改变硅波导的温度从而微调器件的折射率^[143];利用基于谐振器的开关帮助提高调制强度^[146];利用等离子体实现器件可调控^[147]等.但是,这些方法都存在一些较难克服的弊端.例如,内嵌加热器的尺寸一般比较大并且功耗较高;基于谐振器的开关对温度的

波动比较敏感;等离子体虽然具有超快和高能效的特点,但是其可拓展性受到高插入损耗和传播损耗的限制.

相变材料 (phase change materials) 的出现和兴起为下一代片上光互连器件提供了新的解决方案.相变材料是一种具有多种稳定结构和电子态的材料^[148,149].这些稳定结构和电子态 (例如多种相变材料的“晶态”和“非晶态”) 之间可以互相转化,称为相变.一个典型的相变过程的示意图如图 11(a)所示.相变可以通过外部加热^[150]、调节作用在相变材料上的光脉冲^[151]或电流强度^[152]的方式来实现.很多种相变材料的晶态 (crystalline) 和非晶态 (amorphous) 之间存在明显的折射率差 (Δn), 通过将这些相变材料集成到光子器件中可以对光进行大范围的相位和振幅调制^[153].

除了能够提供明显的折射率变化之外,很多相变材料还具有可多次重构、相变速度快、相态非易失的特性.一些相变材料能够进行 10^{12} 次的反复相变,有些相变材料的相变切换速度可达到纳秒量级,很多相变材料的晶态或者非晶态在不消耗额外能量的情况下可以稳定存在多年^[154–156].这些特性使得近几十年来很多相变材料在可调控光器件领域得到了非常广泛的应用.下面选取几种片上光互连之外的相变材料的应用场景加以展示,如图 11(b)–(d)所示.

锗锑碲 ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, GST) 是目前应用最广泛的相变材料之一,其晶态和非晶态之间有着巨大的折射率差.当入射波长为 1550 nm 时,两种状态的折射率差值为 3.56,并且两种状态在较低的温度下都可以稳定存在.GST 在光开关、光子神经网络以及光学存储等领域展现出了巨大的应用潜力^[157–162].但是由于 GST 的复折射率的虚部值较大,导致了较大的吸收损耗,在应用时需要考虑这一问题.锗锑硒碲 ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}$, GSST) 被认为是 GST 的低损耗替代品^[163].密度泛函理论模型表明,通过适当的替换,可以设计出具有特定带隙和折射率的材料^[163].在 GSST 中,部分碲元素被硒元素所取代,导致带隙增加,从而减少近红外波段的光的损耗.在降低损耗方面,锑基硫族化合物硫化锑 (Sb_2S_3) 和硒化锑 (Sb_2Se_3) 也是一类非常有前景的材料^[164,165].这两种材料在 C 波段范围内的本征吸收损耗几乎为 0 (复折射率的虚部实数值 $k < 10^{-5}$)^[165].此外,它们的非晶态的折射率实部比 GST 更接近硅的折射率

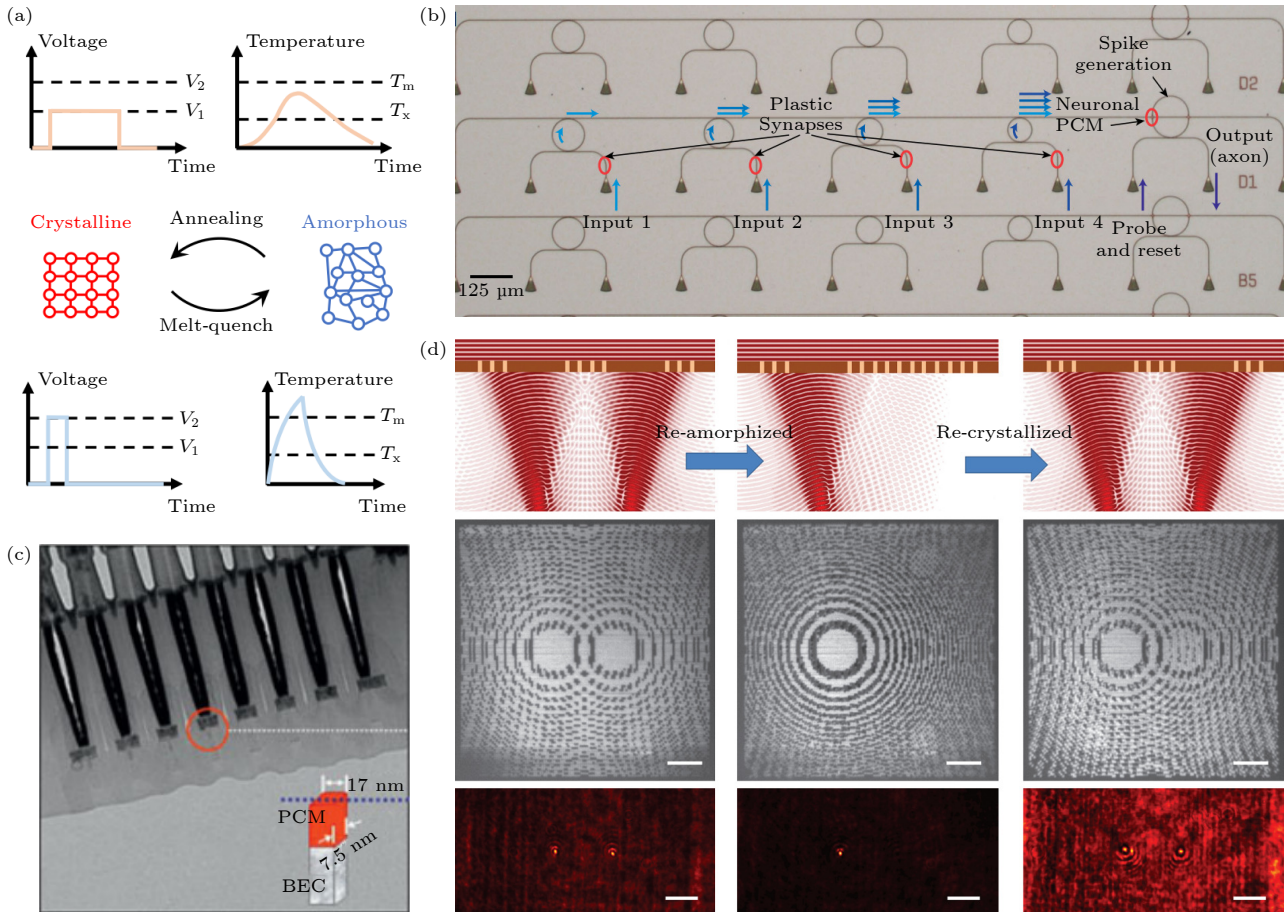


图 11 相变材料的典型相变过程和相变材料在可调控光器件领域的应用 (a) 一个典型的相变过程的示意图; (b) 基于相变材料设计的全光神经突触网络; (c) 基于相变材料设计的相变存储器单元; (d) 基于相变材料设计的可调控超表面

Fig. 11. Typical phase change process of phase change materials and their application in the field of controllable optical devices: (a) Diagram of a typical phase change process; (b) all-optical synaptic networks based on phase change materials; (c) phase-change memory cell based on phasechange material; (d) controllable metasurface based on phase change material.

实部, 与硅波导具有良好的模式匹配^[165]. 与 GST 相比, 硫化锑和硒化锑的低损耗优势在大规模光子集成电路和可编程门阵列等领域中有着巨大的应用前景. 除了上述几种硫系相变材料之外, 二氧化钒 (VO_2) 因为其较低的转变温度和极快的电开关速度在敏感器件以及光信息存储等领域也备受关注^[166]. 此外, 硒化铟 (In_2Se_3) 两个转换态中间附近的折射率与硅的折射率相近, 根据此特性设计出的超透镜可以实现聚焦长度在正负值之间进行切换^[167].

4.2 智能化设计的可调控片上光互连器件

随着片上光互连器件及其所在系统结构复杂度和功能复杂度的增加, 人们对设计功能可调控的片上光互连器件的需求日渐强烈. 一方面, 可调控片上光互连器件能够在单个器件区域内实现多种功能, 从而减小了潜在的器件需求数量; 另一方面,

可调控片上光互连器件可以大大增加片上集成系统的功能选项.

近些年来, 已经出现了很多利用传统方法设计的可调控片上光互连器件. 它们的功能涵盖光开关、交叉波导等诸多光互连应用领域, 大大增加了所在系统的功能自由度, 为所在系统的应用前景提供了丰富的想象空间. 例如, 2019 年, Xu 等^[150]提出了几种低损耗、宽带宽的可调控方向性耦合开关, 并对它们进行了加工和测试. 它们的光学显微镜图和细节部分的 SEM 图如图 12(a) 所示. 他们利用非对称定向耦合器的基本设计, 在器件基本结构上引入 GST 材料, 实现了“ 1×2 ”和“ 2×2 ”的两种可调控光开关. 操作者可以通过改变 GST 材料的相态来选择从入射端口入射的光从哪个端口出射. 器件的耦合区域长度约为 $30 \mu\text{m}$, 属于紧凑的程度. 器件的插入损耗为 1 dB 左右, 并且能够在

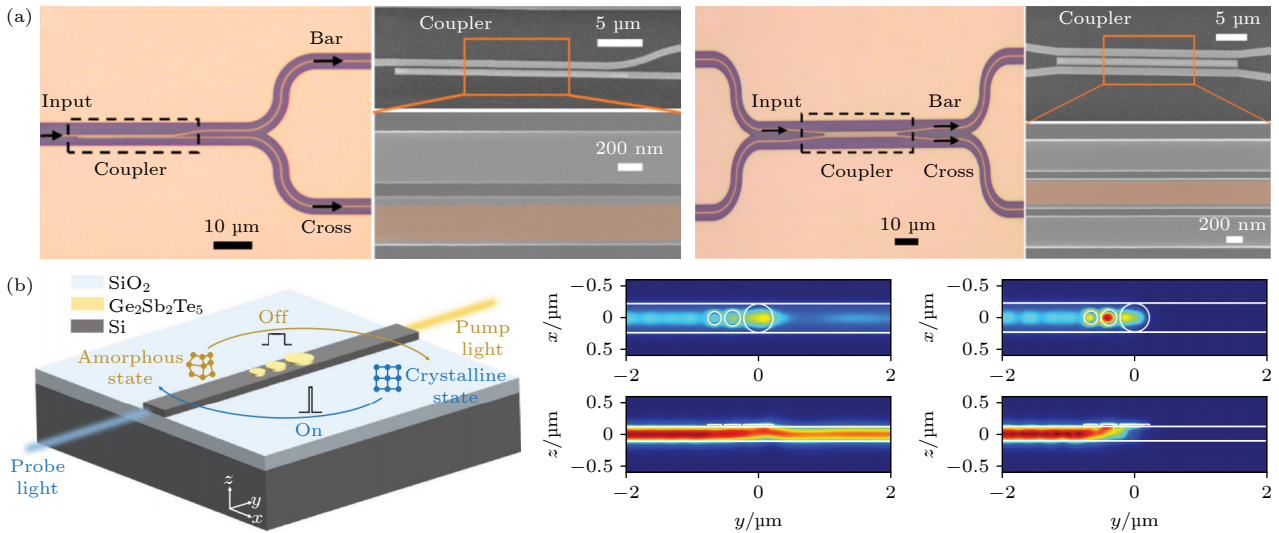


图 12 基于传统方法设计的可控切片上光互连器件 (a) 几种可控方向性耦合开关的光学显微镜图和细节部分的 SEM 图^[150]; (b) 一种高消光比的可控光开关的结构示意图和调控效果光场图^[157]

Fig. 12. Controllable on-chip optical interconnection devices designed by traditional methods: (a) Optical microscope images of several controllable directional coupling switches and the SEM images of their details^[150]; (b) structural and performance of the optical switch with a high ER^[157].

30 nm 宽的波段内保持 10 dB 的串扰. 这些可控光开关除了可用于光互连之外, 还可用于神经形态计算、量子计算和微波光子学等方面. 又如, 2022 年, Li 等^[157] 利用小的 GST 纳米盘的局部共振构建了一个芯片上的可控光开关. 他们通过在硅波导上设置多个级联的 GST 纳米盘来有效地散射和吸收入射光, 从而获得了高的消光比 (extinction ratio, ER), 如图 12(b) 所示. 3 个 GST 纳米片的总体积仅为 $0.229 \mu\text{m}^2 \times 35 \text{ nm}$, 所占空间极小. 该开关在实验验证中可以实现高达 27 dB 的高消光比, 具有对比度高、占地面积小、能耗低、结构稳定性好等优点.

虽然上述基于传统方法设计的可控切片上光互连器件能够实现非常丰富的功能, 且能够达到很高的性能, 但是它们依然避免不了高的人力成本. 近些年来, 由于智能设计方法对不同材料具有广泛的兼容性, 可以像设计硅器件一样设计基于相变材料的器件, 因此, 利用智能设计方法直接设计相变材料正在成为一种方便、快捷、应用广泛的可控切片上光互连器件的设计手段. 利用智能设计方法设计的可控切片上光互连器件的功能, 除了能够涵盖前文所述的可控光开关、交叉波导等方面外, 还包含了可控模式转换器、可控功率分束器等新鲜的概念. 而在具体设计方法的选择方面, 基于 DBS 算法的智能设计方法凭借其独特的优势受到

了广大研究者的欢迎.

2020 年, Chen 等^[168] 利用 DBS 算法优化调整 GSST 在硅波导中的分布, 从而设计了一种宽带的可控模式转换器, 其结构图以及工作原理如图 13(a) 所示. 当 TE_0 模式进入这个模式转换器时, 通过调整 GSST 的相态, 该模式转换器可以选择性地输出 TE_0 模式或 TE_1 模式. 器件的尺寸为 $22 \mu\text{m} \times 3.5 \mu\text{m}$, 属于紧凑的程度. 2021 年, 国防科技大学杨俊波课题组^[169] 基于 DBS 算法设计了一系列的单模和多模纳米光子波导开关. 其中, 三模可控光开关的结构示意图如图 13(b) 所示. 他们通过在硅波导上“打孔刻蚀”并填充相变材料 GST, 来改变所设计区域的有效折射率. DBS 算法可以帮助确定 GST 在硅波导中的分布. 当目标模式的光进入所设计的器件后, 操作者可以通过改变 GST 的相态来实现该光波的通过或阻断. 同样是在 2021 年, Delaney 等^[170] 提出了一种基于像素化相变材料的功率分束比可调的功率分束器. 其结构示意图如图 13(c) 所示. 他们通过在 MMI 的上表面之上覆盖薄层 (23 nm) 硒化锑材料并选择性改变部分材料的相态从而实现 MMI 两输出端口输出功率之比可控的功能. 硒化锑材料的相态分布由 DBS 算法确定. 该器件的尺寸为 $22 \mu\text{m} \times 3.5 \mu\text{m}$, 相比于最先进的干涉仪有了量级程度的减小. 面向相似的功能目标, 2022 年, 国防科技大学杨俊波

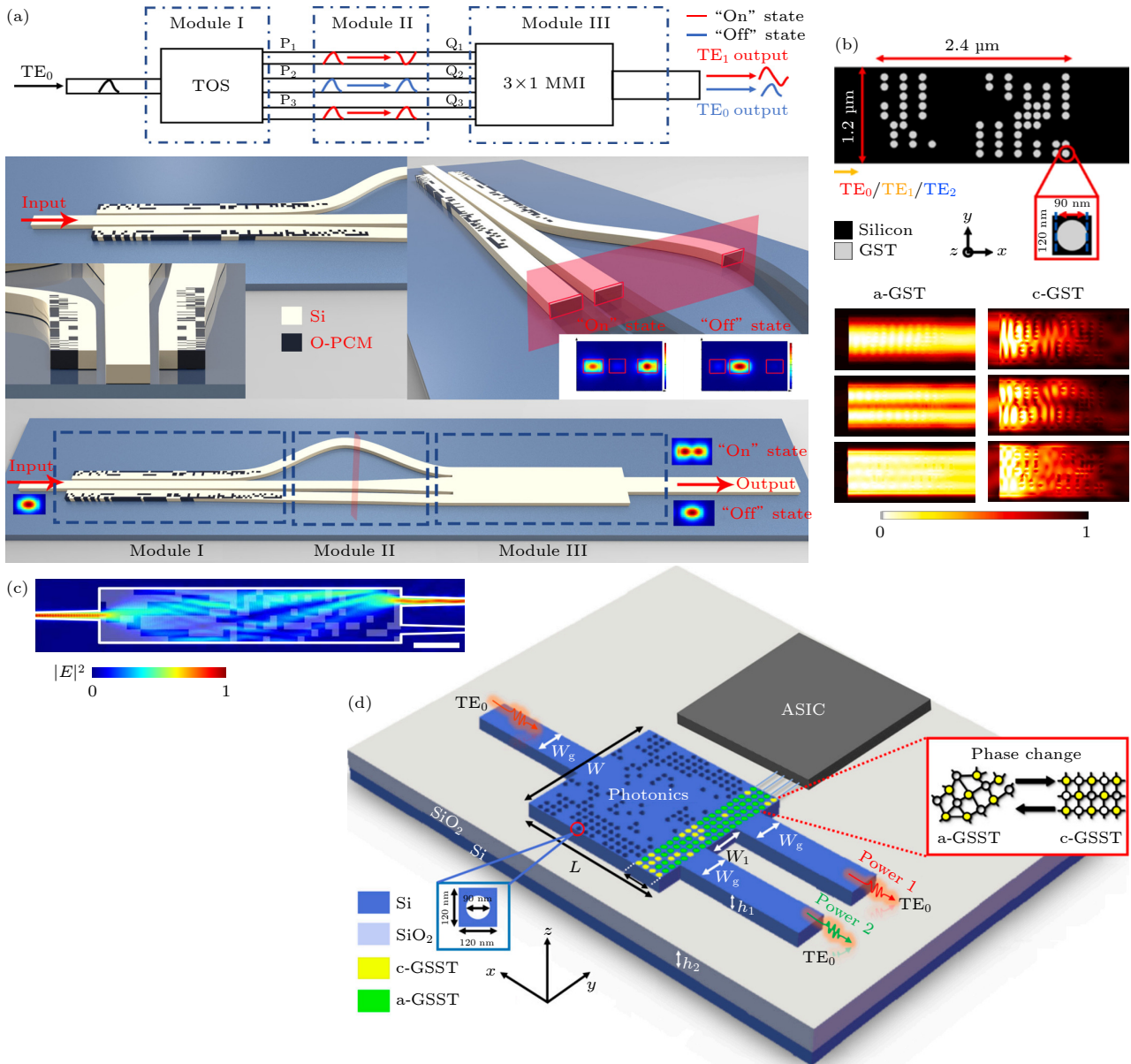


图 13 利用智能设计方法设计的可控片上光互连器件 (a) 基于 DBS 算法设计的一种可控模式转换器^[168]; (b) 基于 DBS 算法设计的可控三模式纳米光子波导开关^[169]; (c) 基于像素化相变材料设计的功率分束比可调的功率分束器^[170]; (d) 基于 DBS 算法设计的任意功率分束比的功率分束器^[171]

Fig. 13. Controllable on-chip optical interconnection devices designed by intelligent methods: (a) Controllable mode converter based on the DBS algorithm^[168]; (b) controllable three-mode nanophotonic waveguide switch based on the DBS algorithm^[169]; (c) power splitter with arbitrary split ratio based on pixelated phase change material^[170]; (d) power splitter with arbitrary split ratio based on the DBS algorithm^[171].

课题组^[171]同样利用 DBS 算法设计了一种任意功率分束比的功率分束器. 该器件的主体由两部分组成, 第 1 部分为仅刻蚀的方形硅区域, 刻蚀圆孔的分布由 DBS 算法确定. 第 2 部分为全部填充了 GSST 的四列刻蚀圆孔, 如图 13(d) 所示. 通过单独改变第二部分每个圆孔中 GSST 的相态, 可以对两个输出通道的透过率之比进行任意地配置. 相比于前一年 Delaney 等^[170]的工作, 该文章中提出的器

件尺寸更小、调控精度更高. 这个分束器拥有的极小尺寸和数字可编程性的优点, 不仅能够应用在光互连系统中, 还可以有助于光电混合芯片的实现.

5 智能化设计的系统集成化片上光互连器件

第 3 节介绍了智能设计方法带来的片上光互

连器件紧凑度的提升. 智能化设计的片上光互连器件, 相比于传统设计结果, 尺寸往往会有数量级程度的减小, 这对片上大规模 PIC 的发展具有非常重要的意义. 但是, 要想实现片上大规模 PIC 的集成, 还需要考虑器件间、模块间、芯片间的连接和布局. 因此, 这就要求片上大规模 PIC 的重要组成部分——片上光互连系统要尽可能地将器件间的连接部分的尺寸压缩, 并适应片上大规模 PIC 的布局方式.

目前, 为了进一步提升片上光互连系统的集成度和适应度, 聚焦于设计集成化的片上光互连器件, 人们努力推进如下几个方面的进展. 第一是设计多用途集成光互连器件. 由于智能设计方法不受传统设计逻辑的局限, 因此它可以尝试将多种功能集成在一个更小的空间内. 通过设计具有多种用途的片上光互连器件, 将原本的一片功能区域压缩为一个器件, 取消器件间的连接部分, 从而大幅度提升整个光互连系统的集成度. 第二是将多个功能器件紧密排列, 设计例如“全数字化集成模块”的整体光互连区域. 考虑到将某些功能集成到一个器件上可能存在较大的难度, 可以将已设计完成的几个尺寸相近的器件紧密排列并再次进行整体优化, 设计

模块化集成的光互连器件. 第三是设计集成化层间光互连器件. 随着单层芯片上 PIC 的集成度提升越来越困难, 光子芯片开始向多层结构的方向发展. 因此芯片的层间光互连成为了片上大规模 PIC 的迫切需要, 集成化层间光互连器件也成为了提升光互连系统集成度的关键器件. 经过一系列的努力, 人们在以上三方面取得了大量的成果.

5.1 智能化设计的多用途集成光互连器件

多用途集成光互连器件是指一个集成了多种光互连功能的、可应用于不同光互连场景、服务于不同光互连需求的固定器件. 在不同的应用场景中, 该器件可以发挥不同的光互连的作用. 多用途集成光互连器件的作用如同将一片功能区域中的若干个器件压缩为一个器件, 能够在保证系统功能完整的前提下再次大幅缩减系统的占地面积, 可以说是一种片上光互连器件高度集成化的理想情况.

虽然将若干功能器件的功能集成到一个单独的固定器件上的实现难度很大, 但是它所能带来的效益依然吸引着研究者们. 例如, 2014 年, Piggott 等^[172]提出了一种波长分解复用光栅耦合器, 其扫描电子显微镜成像图如图 14(a) 所示. 该器件作为

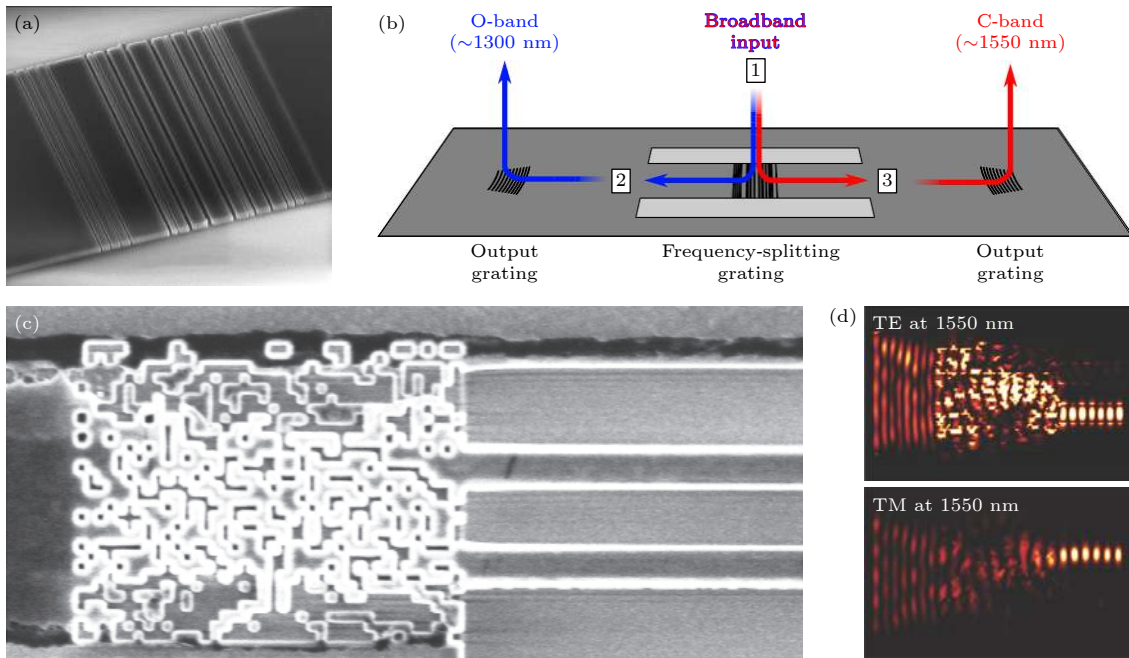


图 14 智能化设计的多用途集成光互连器件 (a) 波长分解复用光栅耦合器的 SEM 成像图^[172]; (b) 波长分解复用光栅耦合器的工作原理; (c) 模式转换偏振分束器的 SEM 成像图^[79]; (d) 不同偏振态的光输入模式转换偏振分束器后该器件横截面中的模拟电磁场密度分布^[79]

Fig. 14. Multi-purpose integrated optical interconnection devices designed by intelligent methods: (a) SEM image of the wavelength demultiplexing grating coupler^[172]; (b) working principle of the wavelength demultiplexing grating coupler; (c) SEM image of the mode-switching polarization beam splitter^[79]; (d) the density distribution of the simulated electromagnetic field in the device^[79].

一种光栅耦合器,基本作用是将空间中的光束耦合至片上.但它与普通的光栅耦合器不同的是,它能够将在O波段(波长大约为1300 nm)和C波段(波长大约为1550 nm)的光耦合至两个不同的波导中并向两个不同的方向输出,其工作原理示意图如图14(b)所示.作为一个固定器件,它既可以用于O波段工作环境中,又可以在C波段工作环境中使用,实现光互连系统的光源输入或实现空间-片上光互连.又如,Shen等^[79]在2015年采用智能设计方法设计的模式转换偏振分束器也是一种多用途集成光互连器件,如图14(c)所示.当它被用于多偏振态系统中时,它可以当作普通的偏振分束器使用,而当它被用于多模式系统中时,它又可以当作模式转换器来使用.不同偏振态的光输入该器件之后该器件横截面中的模拟光场分布如图14(d)所示.

5.2 智能化设计的模块化集成光互连器件

在很多片上光互连系统中,单独的片上光互连器件之间通常采用大量直波导和弯曲波导连接.长距离的波导具有较大的尺寸和较高的损耗,特别是一些传统方法设计的弯曲波导,其曲率半径要达到数十微米才能使损耗降到最低.大量的直波导和弯曲波导不可避免地导致片上光互连系统的尺寸和损耗的增加.这是一个可能严重制约片上光互连系统发展的问题.为了解决这个问题,国防科技大学

杨俊波课题组^[69]提出了一种设计模块化集成光互连器件的方法.首先,利用DBS算法等智能化设计算法设计“数字化”光互连器件.然后,将这些器件紧密排列并再次对整体进行优化,从而得到满足需求的模块化集成光互连器件.如图15(a)所示的可调谐的模式产生器就是一个基于此方法设计的模块化集成光互连器件^[173].它由一个可调谐的非对称定向耦合波导和一个模分复用器直接连接组成,避免了器件之间通过波导相连,从而大幅度减小了整个模块的尺寸.基于同样的设计方法,该课题组还设计了一个图15(b)所示的偏振模式转换器,其长度仅为10 μm.仿真结果显示其插入损耗小于1.1 dB,消光比大于20.5 dB^[174].相比利用模式杂化理论设计的偏振转换器,基于此方法设计的模块化集成光互连器件的尺寸减小了约60 μm^[175].

模块化集成的概念还可进一步拓展至非“数字化”结构、无需整体优化的器件.例如,Huang等^[176]在2020年设计的聚焦波长分解复用器,如图15(c)所示,可以看作是光栅耦合器和波长分解复用器直接连接集成的模块化集成光互连器件.此器件的功能是将空间入射的宽带光分解为两种不同波长的光并从片上的两路分别输出.此器件虽然在两个部分连接后未再进行整体优化,但是由于其两个部分的性能均未受到连接的影响,因此可以直接作为一个模块化集成光互连器件使用.又如,2022年,Ruan等^[177]提出了一种基于双层形状伴随法

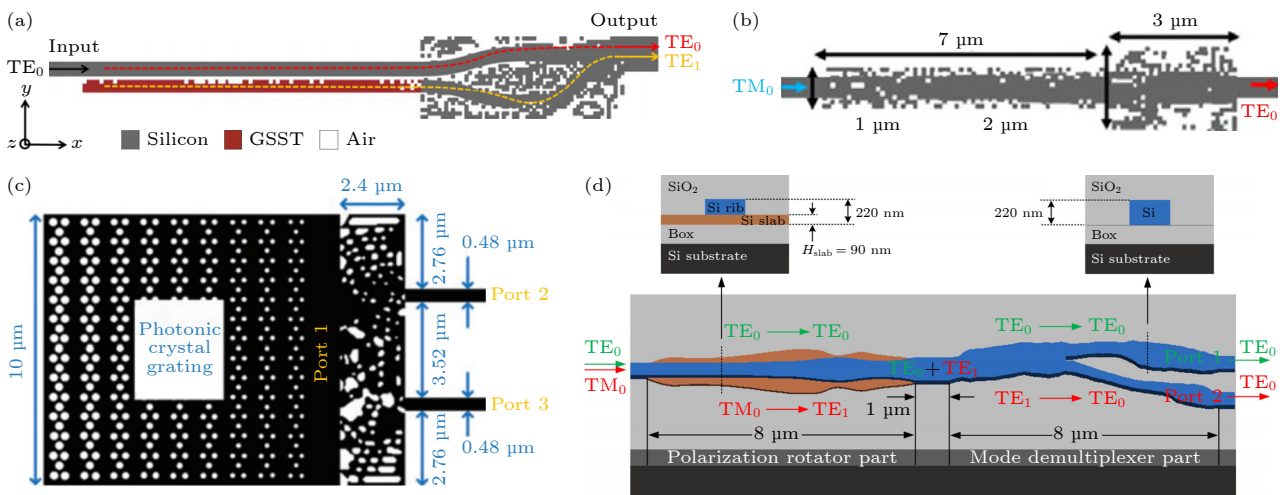


图 15 智能化设计的模块化集成光互连器件 (a) 模块化集成的可调谐模式产生器^[173]; (b) 模块化集成的偏振转换器^[174]; (c) 由光子晶体光栅和聚焦波长解复用器直接相连得到的模块化集成光互连器件^[176]; (d) 模块化集成的偏振分束转换器,由双层结构的偏振转换器和模式分解复用器直接相连而成^[177]

Fig. 15. Modular integrated optical interconnect devices designed by intelligent methods: (a) Modular integrated tunable mode generator^[173]; (b) modular integrated polarization converters^[174]; (c) modular integrated focusing wavelength demultiplexer^[176]; (d) modular integrated polarization beam-splitting converter^[177].

(bi-level shape adjoint method) 和拓扑伴随法 (topology adjoint method) 设计的偏振分束转换器 (polarization splitter-rotator), 其结构示意图如图 15(d)所示. 该器件由双层结构的偏振转换器和模式分解复用器直接相连而成, 通过选择性偏振转换和模式分解复用将 TM_0 和 TE_0 两种偏振态的混合光波分为两路 TE_0 输出.

模块化集成器件可以避免将多个功能集成到一个器件上时所面临的设计方面的困难, 是一种简单、有效地提升片上光互连系统集成度的思路.

5.3 智能化设计的集成化层间光互连器件

目前, 大多数片上光互连系统都设计在单层平台上, 成二维排布的方式. 随着对系统集成度要求的提高, 整个系统在光路布局等方面将面临越来越大的困难. 很多时候为了解决光路布局问题, 光互连系统不得不使用大量的交叉波导、弯曲波导等器件, 这不仅对系统集成度的提升造成很大的影响, 还在光互连系统中引入了较高的插入损耗和串扰 [133]. 另一个方面, 随着人类对光子芯片功能需求的逐渐

增多, 在二维空间内单个器件的设计也会越来越复杂. 过度复杂的器件在设计时往往面临一些困难, 最终结果也很难满足全部的需求. 例如, 多通道的模式和偏振复用是增加光互连带宽的有效手段, 近些年来, 对多通道的模式和偏振复用器的需求十分强烈 [178]. 过去, 基于传统设计方法, Wang 等 [134] 利用不同模式的非对称定向耦合器级联组成了 8 通道的模式和偏振复用器; 同样基于非对称定向耦合原理, 该团队 [179] 还设计了 10 通道的双偏振模式复用器. 然而这些基于耦合原理的器件占地面积较大, 不符合大规模集成的要求. 虽然 Xie 等 [132] 采用 DBS 算法设计了超紧凑的 4 模式模分复用器, 但是如果在智能设计方法中大量增加设计目标, 比如直接优化 8 通道或者 10 通道的模分和偏振复用器, 不仅会导致优化时间成本剧增, 并且多目标优化可能会导致器件最终的性能不够理想.

三维电子集成电路给大规模 PIC 的设计带来了很好的启发 [180]. 人们试图通过设计多层 PIC 来解决上述两个问题. 多层设计的大规模 PIC 需要大量层间光互连系统提供通信. 实现层间光互连的

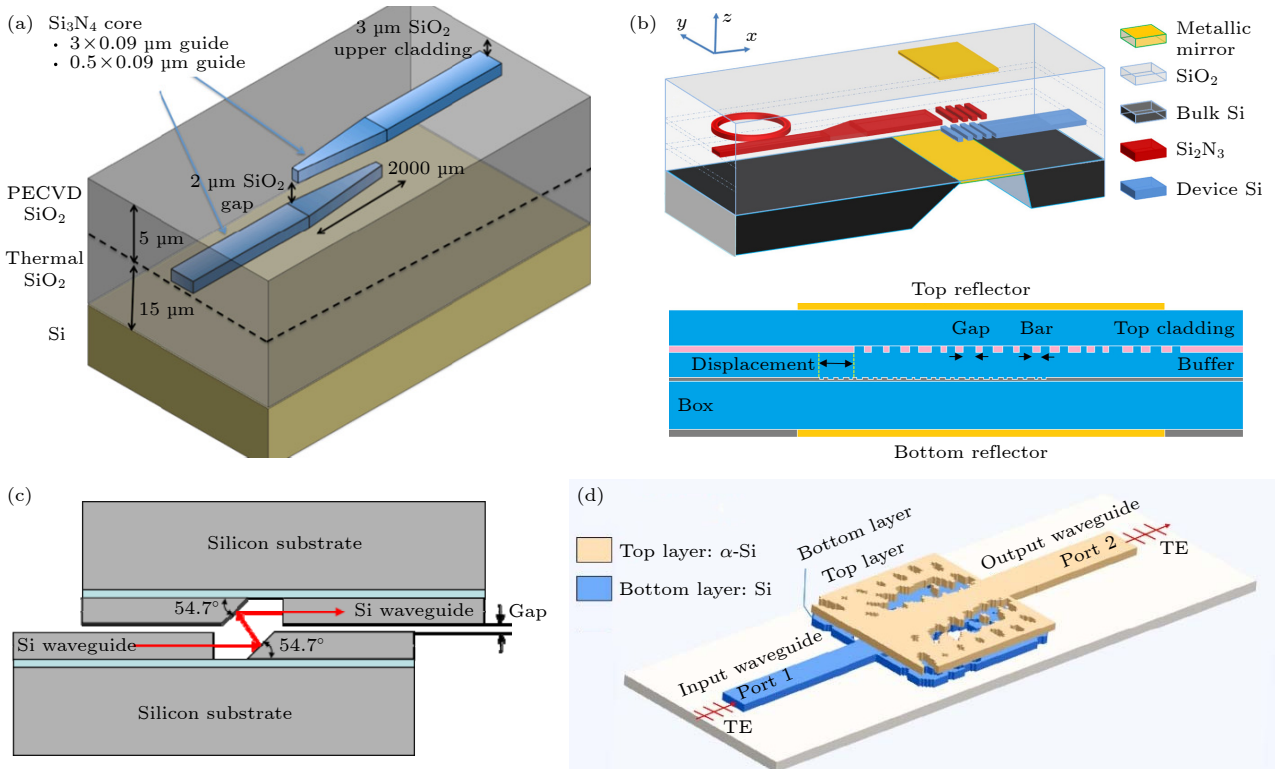


图 16 智能化设计的多层光互连系统 (a) 基于氮化硅波导的层间垂直耦合器 [181]; (b) 利用 GA 设计的层间光栅耦合器 [182]; (c) 基于硅波导的层间反射镜 [183]; (d) 采用智能设计方法设计的硅层间光学通道 [184]

Fig. 16. Multi-layer optical interconnection systems designed by intelligent methods: (a) Interlayer vertical coupler based on silicon nitride waveguide [181]; (b) interlayer grating coupler designed by the GA [182]; (c) interlayer reflectors based on silicon waveguides [183]; (d) silicon interlayer optical channel designed by intelligent method [184].

关键技术是设计层间光互连器件, 包括定向耦合器、光栅耦合器、反射镜等. 近些年来, 人们基于传统设计方法和智能设计方法, 设计了很多的层间耦合器件. 例如, 基于氮化硅波导, Moreira 等^[181]设计和加工了一个层间垂直耦合器, 其耦合区域长度为 2000 μm , 实现了在 1550 nm 波长的 0.2 dB 的耦合损耗, 如图 16(a) 所示. Sodagar 等^[182]利用 GA 为 Si/SiO₂/SiN 多层材料平台设计了具有单/双金属反射器的层间光栅耦合器, 如图 16(b) 所示. Zheng 等^[183]通过反射镜实现了 2.5 dB 耦合损耗的光接近通信 (optical proximity communication), 通过一对平行的反射镜, 可将一个硅平面上的信号光束大带宽地传输到另一个硅平行平面上, 如图 16(c) 所示. 这些传统方法设计的层间耦合器件, 虽然能够实现层间光互连, 但依然难以避免紧凑度不足、难以适应高度集成的弊端. 为了解决这一问题, Yu 等^[184]采用智能设计方法设计了集成的层间光互连器件组 (硅层间光学通道), 其尺寸仅为 2.8 μm × 2.8 μm , 在 1550 nm 波长的插入损耗为 0.55 dB, 在 1451—1712 nm 的带宽范围的插入损耗小于 1 dB, 如图 16(d) 所示.

目前, 随着多层微纳加工技术的日渐成熟, 层间光互连系统作为一个能够快速提升系统整体集成度的新技术, 已经凭借其设计简单、低损耗、低串扰的独特优势逐渐在大规模多层 PIC 中发挥重要作用.

6 总结和展望

6.1 本文总结

片上光互连凭借着其带宽大、速率高、成本低、能耗低、抗电磁干扰等优势, 逐渐成为了解决芯片间通信速率和通信容量壁垒的重要手段. 近些年来, 在多种智能设计方法的辅助下, 目前片上光互连器件已经取得了超紧凑化、可调控化、系统集成化等可喜的进展, 也在这些方面呈现出了更进一步发展的趋势. 本文综述了目前最为常用的几种片上光互连器件的智能设计方法, 并详细分析了片上光互连器件的几个重要的发展趋势.

本文归纳总结了几种有代表性的片上光互连器件的智能设计方法, 包括几种基于经典智能算法的智能设计方法和基于神经网络的智能设计方法.

这些片上光互连器件的智能设计方法都具有非常广泛的应用范围和非常大的影响力. 它们不仅能应用于片上器件, 还能应用于空间光调制器件, 同时不仅能应用于光互连, 还能应用于光计算、光子神经网络、超透镜、超表面等新兴应用领域. 在这些智能设计方法的帮助下, 信息光学、微纳光子学等学科的各个分支领域都开启了迅猛的发展.

本文从不同的方面介绍了智能化设计的片上光互连器件一个重要而显著的优势: 器件超紧凑化. 一方面, 研究者可以利用智能设计方法直接设计出满足预设目标的光互连器件, 无需为其提供专门的初始结构; 另一方面, 研究者也可以选择应用智能设计方法对传统设计的光互连器件进行优化, 从而大大减小其占地面积, 提升紧凑度. 本文通过若干组功能相同 (近) 的智能化设计器件与传统设计器件的对比, 显示了智能化设计对片上光互连器件紧凑度提升的明显作用.

本文介绍了基于相变材料的智能化设计的可调控的片上光互连器件. 实现光子器件的可调控意义非凡, 不仅能使器件或系统的功能更加灵活, 还能通过多种功能的集成来大幅减小器件或系统的占地面积. 传统的实现光子器件可调控的方法存在诸多弊端, 比如硅材料折射率的改变范围小、需要持续供能等. 相变材料凭借其折射率变化范围大、状态非易失的优良特性正在成为可调控光子器件的重要材料选择. 智能化设计的可调控片上光互连器件的功能丰富多样, 涵盖了可调控光开关、交叉波导、模式转换器、功率分束器等诸多方面, 显示出了智能设计方法和相变材料广泛的适应性和实用性.

本文从三方面介绍了人们通过设计集成化片上光互连器件来提升片上光互连系统的集成度和对 PIC 布局适应度的努力. 一是设计多用途集成光互连器件. 通过将多种功能器件的功能集成在一个固定的多种用途集成光互连器件上, 来大幅度提升整个器件系统的集成度. 二是将多个功能器件紧密排列, 设计多功能的模块化集成器件. 这样可以避免将某些功能集成到一个器件上时存在的设计难度. 三是设计集成化层间光互连器件. 为了解决在单层芯片上实现大规模 PIC 时遇到的器件复杂度、光路布局等瓶颈, 人们开始发展多层大规模 PIC. 因此, 需要大量的层间光互连系统作为连接.

集成化层间光互连器件作为一种实现层间光互连的重要方式为 PIC 集成度的提升做出了很大贡献。

智能化设计为片上光互连器件的发展提供了崭新的思路和充足的动力,在相变材料等新兴材料、多层设计等新兴设计思路的辅助下,智能化设计的片上光互连器件的发展更加具有广阔的想法空间。

6.2 智能化设计片上光互连器件的未来发展趋势展望

智能化设计的片上光互连器件作为一个新兴的领域,其未来的发展方向、发展思路自由且丰富。本节根据前文所做的总结梳理,提出以下几个方面的展望。

首先在设计方法方面。第一,几十年来,经典的智能算法已经在各个学科领域得到了广泛的应用,但是考虑到一些算法的优化思路与片上光子器件的设计需求匹配度不高,还有一些算法存在收敛速度慢、自由度较低、鲁棒性较差的弊端,因此期望未来出现更多在片上光子器件设计领域适应性强的、性能优良的算法。第二,神经网络作为一种强大的计算机工具已经在人们生产生活等各个方面一再地证明了其适应性和能力。未来随着计算机技术的进一步发展,更加先进的网络架构也会随之出现。与此同时,经典智能算法与神经网络的结合也会不断给本领域带来崭新的成果。第三,每一种算法都是为了解决一类问题而发明和使用的,随着片上光子器件的设计逐渐复杂化,单一的算法解决全部设计问题的难度也会随之增大。因此,未来将几种算法的优势结合起来,利用几种算法联合优化某一功能器件的情况将会越来越多地出现在人们眼前。

其次在器件功能方面。第一,相变材料的卓越性能已经深深地吸引了广大研究者的注意。未来可以预见的是,基于相变材料的可调控光子器件将会层出不穷。同时,基于智能设计方法对不同材料的广泛适应性,智能设计的超紧凑可调控片上光互连器件将会为片上光互连系统的发展和应用做出重大贡献。第二,虽然多用途集成光互连器件的实现难度很大,但是它所能带来的效益依然吸引着广大研究者。可以期望的是,未来随着智能设计方法的不断进步,多功能、多用途的片上光互连器件将会越来越常见。

最后在系统性能方面。第一,正如目前在电子芯片领域可以看到的那样,人们对单独器件的紧凑度、系统整体的集成度的追求是没有止境的。有强大的需求动力作为牵引,再加上使用材料、设计方法方面的不断创新,片上光互连器件的紧凑度一定会得到进一步提高。第二,片上光互连系统作为芯片间数据传输的桥梁,其通信带宽、通信速率等技术指标无疑是研究者们最关心的。伴随着波分复用技术、偏振复用技术、光时分复用技术和空分复用技术等先进技术的不断发展和应用,可以期望的是,未来片上光互连系统的通信带宽将得到进一步增大,通信速率将得到进一步提高。

参考文献

- [1] Zhou Z P 2021 *Silicon-based Optoelectronics* (Beijing: Science Press) p361 (in Chinese) [周治平 2021 硅基光电子学 (北京: 科学出版社) 第 361 页]
- [2] Zhou P J, Li Z Y, Yu Y D, Yu J Z 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104211 (in Chinese) [周培基, 李智勇, 俞育德, 余金中 2014 物理学报 **63** 104211]
- [3] Arumugam M 2001 *Pramana J. Phys.* **57** 849
- [4] Han L S, Kuo B P P, Alic N, Radic S 2018 *Opt. Express* **26** 14800
- [5] Wang Y, Gao S T, Wang K, Skafidas E 2016 *Opt. Lett.* **41** 2053
- [6] Sia J X B, Wang W J, Guo X, Zhou J, Zhang Z C, Rouified M S, Li X, Qiao Z L, Liu C Y, Littlejohns C, Reed G T, Wang H 2019 *IEEE Photonics J.* **11** 1
- [7] Nguyen V H, Kim I K, Seok T J 2020 *Appl. Sci.* **10** 4507
- [8] Xu H N, Shi Y C 2016 *Opt. Lett.* **41** 5047
- [9] Chung K K, Chan H P, Chu P L 2006 *Opt. Commun.* **267** 367
- [10] Tao S H, Fang Q, Song J F, Yu M B, Lo G Q, Kwong D L 2008 *Opt. Express* **16** 21456
- [11] Zhang Y, Qin X J, Wang J D, Yu Y F, Wei Z J, Zhang Z M 2022 *Chin. Opt. Lett.* **20** 122701
- [12] Wu Q, Zhu Y X, Zhuge Q B, Hu W S 2022 *J. Lightwave Technol.* **40** 7297
- [13] Wang X W, Chen Z W, Yin M Z, Wang W, Li Z B, Ni W H, Li F 2022 *J. Lightwave Technol.* **41** 2323
- [14] Zhai W L, Wen A J, Gao Y S, Shan D J, Fan Y Y 2022 *IEEE T. Microw. Theory* **70** 1821
- [15] Zhu S Y, Liu B, Ren J X, Wu X Y, Mao Y Y, Bai Y, Zhang H J, Yuan L Z, Zhang M T, Zhu X 2022 *J. Lightwave Technol.* **40** 4599
- [16] Liu Y, Ding R, Li Q, Xuan Z, Li Y C, Yang Y S, Lim A E J, Lo P G Q, Bergman K, Baehr-Jones T, Hochberg M 2014 *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition San Francisco, USA, March 09–13, 2014* pTh4G.6
- [17] Yu Y, Chen G Y, Sima C T, Zhang X L 2017 *Opt. Express* **25** 28330
- [18] Sun C L, Wu W H, Yu Y, Chen G Y, Zhang X L, Chen X, Thomson D J, Reed G T 2018 *Nanophotonics* **7** 1571
- [19] Zhou D, Sun C L, Lai Y X, Yu Y, Zhang X L 2019 *Opt. Express* **27** 10798

- [20] Xu L, Leijtens X J M, Docter B, de Vries T, Smalbrugge E, Karouta F, Smit M K 2009 *35th European Conference on Optical Communication* Vienna, Austria, September 20–24, 2009 p24
- [21] Ou K, Yu F L, Li G H, Wang W J, Miroshnichenko A E, Huang L J, Wang P, Li T X, Li Z F, Chen X S, Lu W 2020 *Sci. Adv.* **6** eabc0711
- [22] Tian Sh N, Guo H M, Hu J B, Zhuang S L 2019 *Opt. Express* **27** 680
- [23] Sakamoto J, Goh T, Katayose S, Kasahara R, Hashimoto T 2019 *Opt. Commun.* **433** 221
- [24] Dong F X, Liu A J, Ma P J, Zheng W H 2018 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51** 495101
- [25] Michinel H, Costa M F, Frazao O, Pant B, Zhang W W, Tran D, Banakar M, Du H, Yan X Z, Littlejohns C G, Reed G T, Thomson D J 2020 *EPJ Web of Conferences* **238** 1007
- [26] Chen H B, He Z J, Wang W 2018 *Prog. Electromagn. Res. Lett.* **75** 47
- [27] Dai D X, Wang J 2014 *IEEE Photonics Soc. Newslett.* **28** 8
- [28] Dai D X, Bowers J E 2011 *Opt. Express* **19** 10940
- [29] Dai D X, Wang J, Shi Y C 2013 *Opt. Lett.* **38** 1422
- [30] Chesca B, John D, Cantor R 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 42601
- [31] Nath J P, Dhingra N, Saxena G J, Sharma E K 2020 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **32** 595
- [32] Jiang X P, Yuan H, He X, Du T, Ma H S, Li X, Luo M Y, Zhang Z J, Huan C, Yu Y, Zhu G Y, Yan P G, Wu J G, Zhang Z F, Yang J B 2023 *Nanophotonics* **12** 1891
- [33] Maidment P, Sorel M 2022 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)* San Jose, USA, May 15–20, 2022 p1
- [34] Jiang X P, Yuan H, Chen D B, Zhang Z J, Du T, Ma H S, Yang J B 2021 *Adv. Opt. Mater.* **9** 2100575
- [35] Jiang X P, Zhang Z J, Ma H S, Du T, Luo M Y, Liu D Q, Yang J B 2022 *Opt. Express* **30** 18250
- [36] Chang W J, Xu S Y, Cheng M F, Liu D M, Zhang M M 2020 *Opt. Express* **28** 28343
- [37] Shastri B J, Tait A N, Ferreira D L T, Pernice W H P, Bhaskaran H, Wright C D, Prucnal P R 2021 *Nat. Photonics* **15** 102
- [38] Li G H Y, Sekine R, Nehra R, Gray R M, Ledezma L, Guo Q S, Marandi A 2023 *Nanophotonics* **12** 847
- [39] Yeung C, Pham B, Tsai R, Fountaine K T, Raman A P 2022 *ACS Photonics* **10** 884
- [40] Jiang L, Li X Z, Wu Q X, Wang L H, Gao L 2021 *Opt. Express* **29** 2521
- [41] Meng C, Qiu J F, Tian Y, Ye Z, Wu J 2016 *15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)* Hangzhou, China, September 24–27, 2016 p1
- [42] An S S, Fowler C, Zheng B W, Shalaginov M Y, Tang H, Li H, Zhou L, Ding J, Agarwal A M, Rivero-Baleine C, Richardson K A, Gu T, Hu J J, Zhang H L 2019 *ACS Photonics* **6** 3196
- [43] Aoad A, Simsek M, Aydin Z 2017 *Int. J. Numer. Model.* **30** 2129
- [44] Ma L F, Li J, Liu Z H, Zhang Y X, Zhang N E, Zheng S Q, Lu C C 2021 *Chin. Opt. Lett.* **19** 11301
- [45] Liu Y J, Sun W Z, Xie H C, Zhang N, Xu K, Yao Y, Xiao S M, Song Q H 2018 *Opt. Lett.* **43** 2482
- [46] An X P, Cao Y, Wei Y X, Zhou Z H, Hu T, Feng X, He G Q, Zhao M, Yang Z Y 2021 *Opt. Lett.* **46** 3881
- [47] Wiecha P R, Arbouet A, Girard C, Muskens O L 2021 *Photonics Res.* **9** 182
- [48] Zeng Z S, Lu L H, He P X, Liu D M, Zhang M M 2021 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **33** 1289
- [49] Yeung C, Ho D, Zhang Z, Raman A P, Pham B, Fountaine K T, Levy K 2022 *ACS Photonics* **9** 1577
- [50] Yu Z J, Cui H R, Sun X K 2017 *Photonics Res.* **5** 15
- [51] Ma T G, Tobah M, Wang H Z, Guo L J 2022 *Opto-Electronic Science* **1** 210011
- [52] Schubert M F, Cheung A, Williamson I, Spyra A, Alexander D H 2022 *ACS Photonics* **9** 2327
- [53] Hodge J A, Mishra K V, Zaghoul A I 2021 arXiv: 2101.09131 [physics. app-ph]
- [54] Campbell S D, Werner D H, Werner P L 2021 *Proc. SPIE* **11769** 117690N
- [55] Deotare P B 2012 *Ph. D. Dissertation* (Boston: Harvard University)
- [56] Urban P J, Pluk E G C, KleIn E J, Koonen A M J, Khoe G D, de Waardt H 2006 *2nd Institution of Engineering and Technology International Conference* Osaka, Japan, June 21–22, 2006 p93
- [57] Shen Y C, Harris N C, Skirlo S, Prabhu M, Baehr-Jones T, Hochberg M, Sun X, Zhao S, Larochelle H, Englund D, Soljačić M 2017 *Nat. Photonics* **11** 441
- [58] Yu T, Ma X, Pastor E, George J K, Wall S, Miscuglio M, Simpson R E, Sorger V J 2021 arXiv: 2102.10398 [physics. optics]
- [59] Wu C M, Yu H S, Lee S, Peng R M, Takeuchi I, Li M 2021 *Nat. Commun.* **12** 96
- [60] Chen H, Li J T, Shang Z Y, Wang G Q, Zhang Z M, Zhao Z X, Zhang M Y, Yin J D, Wang J Z, Guo K, Yang J B, Yan P G 2022 *Laser Photonics Rev.* **16** 2200254
- [61] Yang K Y, Skarda J, Cotrufo M, Dutt A, Ahn G H, Sawaby M, Vercurysse D, Arbabian A, Fan S H, Alù A, Vučković J 2020 *Nat. Photonics* **14** 369
- [62] Wu Y T, Shi Y C, Zhao Y, Li L Y, Wu P H, Dai P, Fang T, Chen X F 2019 *Opt. Express* **27** 38541
- [63] Huang L C, Whitehead J, Colburn S, Majumdar A 2020 *Photonics Res.* **8** 1613
- [64] Guo L H, Hu Z L, Wan R Q, Long L Y, Li T, Yan J C, Lin Y, Zhang L, Zhu W H, Wang L C 2018 *Nanophotonics* **8** 171
- [65] Ossianer M, Meretska M L, Hampel H K, Lim S W D, K N, Jauk T, Capasso F, Schultze M 2023 *Science* **380** 59
- [66] Li T Y, Xu X H, Fu B Y, Wang S M, Li B J, Wang Z L, Zhu S N 2021 *Photonics Res.* **9** 1062
- [67] Guo W P, Liang W Y, Cheng C W, Wu W L, Wang Y T, Sun Q, Zu S, Misawa H, Cheng P J, Chang S W, Ahn H, Lin M, Gwo S 2020 *Nano Lett.* **20** 2857
- [68] Ollanik A J, Smith J A, Belue M J, Escarra M D 2018 *ACS Photonics* **5** 1351
- [69] Huang J, Ma H S, Chen D B, Yuan H, Zhang J P, Li Z K, Han J M, Wu J G, Yang J B 2021 *Nanophotonics* **10** 1011
- [70] Sanchis P, Villalba P, Cuesta F, Hakansson A, Griol A, Galan J V, Brimont A, Marti J 2009 *Opt. Lett.* **34** 2760
- [71] Yu Z J, Cui H R, Sun X K 2017 *Opt. Lett.* **42** 3093
- [72] Liu Z H, Liu X H, Xiao Z Y, Lu C C, Wang H Q, Wu Y, Hu X Y, Liu Y C, Zhang H Y, Zhang X D 2019 *Optica* **6** 1367
- [73] Kennedy J, Eberhart R 1995 *ICNN95-International Conference on Neural Networks* Perth, WA, Australia, November 27–December 1, 1995 p1942
- [74] Chen W W, Zhang B H, Wang P J, Dai S X, Liang W, Li H X, Fu Q, Li J, Li Y, Dai T G, Yu H, Yang J Y 2020 *Opt. Express* **28** 30701
- [75] Qin F, Liu B Q, Zhu L W, Lei J, Fang W, Hu D J, Zhu Y, Ma W D, Wang B W, Shi T, Cao Y Y, Guan B O, Qiu C

- W, Lu Y R, Li X P 2021 *Nat. Commun.* **12** 32
- [76] Chen W W, Lin J, Li H X, Wang P J, Dai S X, Liu Y X, Yao R K, Li J, Fu Q, Dai T G, Yang J Y 2022 *Opt. Express* **30** 46236
- [77] Seldowitz M A, Allebach J P, Sweeney D W 1987 *Appl. Optics* **26** 2788
- [78] Shen B, Wang P, Polson R, Menon R 2014 *Opt. Express* **22** 27175
- [79] Shen B, Wang P, Polson R, Menon R 2015 *Nat. Photonics* **9** 378
- [80] Wen X, Xu K, Song Q H 2016 *Photonics Res.* **4** 209
- [81] Zhou F Y, Lu L L Z, Zhang M M, Chang W J, Li D Y, Deng L, Liu D M 2017 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)* San Jose, USA, May 14–19, 2017 p1
- [82] Cao Y, Li S T, Petzold L, Serban R 2003 *SIAM J. Sci. Comput.* **24** 1076
- [83] Jameson A 2003 *Aerodynamic Shape Optimization Using the Adjoint Method* (Brussels: Von Karman Institute)
- [84] McNamara A, Treuille A, Popović Z 2004 *ACM Transactions On Graphics (TOG)* **3** 449
- [85] Pedersen C B W, Allinger P 2006 *IUTAM Symposium on Topological Design Optimization of Structures, Machines and Materials*, Copenhagen, Denmark, 2006 p229
- [86] Lalau-Keraly C M, Bhargava S, Miller O D, Yablonovitch E 2013 *Opt. Express* **21** 21693
- [87] Hughes T W, Minkov M, Williamson I A D, Fan S H 2018 *ACS Photonics* **5** 4781
- [88] Michaels A, Yablonovitch E 2018 *Opt. Express* **26** 4766
- [89] Dai Y H 2002 *SIAM J. Optimiz.* **13** 693
- [90] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J 1986 *Nature* **323** 533
- [91] Sermanet P, Eigen D, Zhang X, Mathieu M, Fergus R, LeCun Y 2013 arXiv: 1312.6229 [cs.CV]
- [92] Girshick R, Donahue J, Darrell T, Malik J 2016 *IEEE T. Pattern Anal.* **38** 142
- [93] Ren S Q, He K M, Girshick R, Sun J 2017 *IEEE T. Pattern Anal.* **39** 1137
- [94] Redmon J, Divvala S, Girshick R, Farhadi A 2016 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* Las Vegas, USA, June 27–30, 2016 p779
- [95] Wang S, Fei S 2019 *Industrial Control Computer* **32** 103 (in Chinese) [汪宋, 费树岷 2019 *工业控制计算机* **32** 103]
- [96] Lin T Y, Dollar P, Girshick R, He K, Hariharan B, Belongie S 2016 arXiv: 1612.03144 [cs.CV]
- [97] Joseph R A F 2017 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* Honolulu, USA, July 21–26, 2017 p6517
- [98] Lin T Y, Goyal P, Girshick R, He K M, Dollar P 2020 *IEEE Trans. Pattern Anal.* **42** 318
- [99] Redmon J, Farhadi A 2018 arXiv: 1804.02767v1 [cs.CV]
- [100] Tan M X, Pang R M, Le Q V 2020 *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* Seattle, USA, June 13–19, 2020 p10778
- [101] Bahdanau D, Cho K, Bengio Y 2014 *Statistics* **3** 1467
- [102] Nguyen H Q, Nguyen T M, Vu H H, Nguyen V V, Nguyen P T, Dao T N M, Tran K H, Dinh K Q 2019 *6th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS)* Hanoi, Vietnam, December 12–13, 2019 p240
- [103] Wu Y H, Schuster M, Chen Z F, Le Q V, Norouzi M 2016 arXiv: 1609.08144 [cs.CL]
- [104] Cho K, van Merriënboer B, Bahdanau D, Bengio Y 2014 *Statistics* **2** 1467
- [105] Sennrich R, Haddow B, Birch A 2015 arXiv: 1511.06709 [cs.CL]
- [106] Johnson M, Schuster M, Le Q V, Krikun M, Wu Y H, Chen Z F, Thorat N, Viégas F, Wattenberg M, Corrado G, Dean M H 2017 *T. Assoc. Comput. Ling.* **5** 339
- [107] Jean S, Cho K, Memisevic R, Bengio Y 2014 arXiv: 1412.2007 [cs.CL]
- [108] Tu Z P, Lu Z D, Liu Y, Liu X H, Li H 2016 arXiv: 1601.04811 [cs.CL]
- [109] Gao L, Mi H B, Zhu B Q, Feng D W, Li Y C, Peng Y X 2019 *IEEE Access* **7** 105319
- [110] Li Y C, Feng D W, Lu M L, Li D S 2019 *In Knowledge Science, Engineering and Management: 12th International Conference, KSEM Athens, Greece, August 28–30, 2019* p37
- [111] Li Y C, Chen H X, Sun X G, Sun Z C, Li L, Cui L Z, Yu P S, Xu G D 2021 *CIKM '21: Proceedings of the 30th ACM International Conference on Information & Knowledge Management* Queensland Australia, November 1–5, 2021 p988
- [112] Li Y C, Chen H X, Li Y L, Li L, Yu P S, Xu G D 2023 *IEEE T. Knowl. Data En.* (early access) DOI: 10.1109/TKDE.2023.3237741
- [113] Chen H X, Li Y C, Sun X G, Xu G D, Yin H Z 2021 *WSDM '21: Proceedings of the 14th ACM International Conference on Web Search and Data Mining* Virtual Event Israel, March 8–12, 2021 p1056
- [114] Hammond A M, Camacho R M 2019 *Opt. Express* **27** 29620
- [115] Tu X, Xie W S, Chen Z M, Ge M F, Huang T Y, Song C L, Fu H Y 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 2790
- [116] An S S, Zheng B W, Shalaginov M Y, Tang H, Li H, Zhou L, Dong Y X, Haerinia M, Agarwal A M, Rivero B C, Kang M, Richardson K A, Gu T, Hu J J, Fowler C, Zhang H L 2022 *Adv. Opt. Mater.* **10** 2102113
- [117] Liu D J, Tan Y X, Khoram E F, Yu Z F 2018 *ACS Photonics* **5** 1365
- [118] Ren Y M, Zhang L X, Wang W Q, Wang X Y, Lei Y F, Xue Y L, Sun X C, Zhang W F 2021 *Photonics Res.* **9** B247
- [119] Zhao Z Y, You J, Zhang J, Du S Y, Tao Z L, Tang Y H, Jiang T 2022 *Nanophotonics* **11** 4465
- [120] Yeung C, Tsai R, Pham B, King B, Kawagoe Y, Ho D, Liang J, Knight M W, Raman A P 2021 *Adv. Opt. Mater* **9** 2100548
- [121] Meindl J D 2003 *Comput. Sci. Eng.* **5** 20
- [122] Mack C A. 2011 *IEEE T. Semiconduct. M.* **24** 202
- [123] Schaller R R 1997 *IEEE Spectrum* **34** 52
- [124] Zhang Y, Yang S Y, Lim A E J, Lo G Q, Galland C, Baehr-Jones T, Hochberg M 2013 *Opt. Express* **21** 1310
- [125] Kumari S, Prince S 2022 *International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET)* Chennai, India, March 24–26, 2022 p231
- [126] Chang W J, Ren X S, Ao Y Q, Lu L H, Cheng M F, Deng L, Liu D M, Zhang M M 2018 *Opt. Express* **26** 24135
- [127] Xu J F, Liu Y J, Guo X Y, Song Q H, Xu K 2022 *Opt. Express* **30** 26266
- [128] Zhu J B, Chao Q, Huang H Y, Zhao Y X, Li Y, Tao L, She X J, Liao H, Huang R, Zhu Z J, Liu X, Sheng Z, Gan F W 2021 *Appl. Opt.* **60** 413
- [129] Sheng J C, Liu Y J, Xu K 2019 *The International Photonics and Optoelectronics Meeting Wuhan China*, November 11–14, 2019 paper OW3D.6
- [130] Chang W J, Lu L L Z, Ren X S, Li D Y, Pan Z P, Cheng M F, Liu D M, Zhang M M 2018 *Opt. Express* **26** 8162

- [131] Ding Y H, Xu J, Da R F, Huang B, Ou H Y, Peucheret C 2013 *Opt. Express* **21** 10376
- [132] Xie H C, Liu Y J, Wang S, Wang Y J, Yao Y, Song Q H, Du J B, He Z Y, Xu K 2020 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **32** 166
- [133] Zhou H L, Wang Y L, Gao X Y, Gao D S, Dong J J, Huang D M, Li F, Alexander W P K, Zhang X L 2022 *Laser Photonics Rev.* **16** 2100521
- [134] Wang J, He S L, Dai D X 2014 *Laser Photonics Rev.* **8** L18
- [135] Li C L, Liu D J, Dai D X 2019 *Nanophotonics* **8** 227
- [136] Jiang X H, Wu H, Dai D X 2018 *Opt. Express* **26** 17680
- [137] Chang W J, Lu L L Z, Liu D M, Zhang M M 2018 *Optical Fiber Communication (OFC) Conference* San Diego, USA, March 11–15, 2018 p1
- [138] Gabrielli L H, Liu D, Johnson S G, Lipson M 2012 *Nat. Commun.* **3** 1217
- [139] Liu Y J, Xu K, Wang S, Shen W H, Xie H C, Wang Y J, Xiao S M, Yao Y, Du J B, He Z Y, Song Q H 2019 *Nat. Commun.* **10** 3263
- [140] Wu H, Tan Y, Dai D X 2017 *Opt. Express* **25** 6069
- [141] Huang J, Yang J B, Chen D B, He X, Han Y X, Zhang J J, Zhang Z J 2018 *Photonics Res.* **6** 574
- [142] Piggott A Y, Petykiewicz J, Su L, Vučković J 2017 *Sci. Rep.* **7** 1786
- [143] Yu L H, Yin Y L, Shi Y C, Dai D X, He S L 2016 *J. Operat. Theo.* **3** 159
- [144] Gentry C M, Zeng X, Popović M A 2014 *Opt. Lett.* **39** 5689
- [145] Wuttig M, Bhaskaran H, Taubner T 2017 *Nat. Photonics* **11** 465
- [146] Sherwood-Droz N, Wang H, Chen L, Lee B G, Lipson M 2008 *Opt. Express* **16** 15915
- [147] Ono M, Hata M, Tsunekawa M, Nozaki K, Sumikura H, Chiba H, Notomi M 2020 *Nat. Photonics* **14** 37
- [148] Gong Z L, Yang F Y, Wang L T, Chen R, Wu J Q, Grigoropoulos C P, Yao J 2021 *J. Appl. Phys.* **129** 30902
- [149] Fang Z R, Chen R, Tara V, Majumdar A 2023 *Sci. Bull.* **68** 783
- [150] Xu P P, Zheng J J, Doyle J K., Majumdar A 2019 *ACS Photonics* **6** 553
- [151] Wang Q, Rogers E T F, Gholipour B, Wang C M, Yuan G H, Teng J H, Zheludev N I 2016 *Nat. Photonics* **10** 60
- [152] Zhang Y F, Fowler C, Liang J H, Azhar B, Shalaginov M Y, Deckoff-Jones S, An S S, Chou J B, Roberts C M, Liberman V, Kang M, Ríos C, Richardson K A, Rivero-Baleine C, Gu T, Zhang H L, Hu J J 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 661
- [153] Shportko K, Kremers S, Woda M, Lencer D, Robertson J, Wuttig M 2008 *Nat. Mater.* **7** 653
- [154] Kim S, Burr G W, Nam W K Sung W 2019 *MRS Bull.* **44** 710
- [155] Loke D, Lee T H, Wang W J, Zhao R, Shi L P, Yeo Y C, Chong T C, Elliott S R 2012 *Science* **336** 1566
- [156] Orava J, Greer A L, Gholipour B, Hewak D W, Smith C E 2012 *Nat. Mater.* **11** 279
- [157] Li W F, Cao X Y, Song S N, Wu L S, Wang R B, Jin Y, Song Z T, Wu A M 2022 *Laser Photonics Rev.* **16** 2100717
- [158] Stegmaier M, Iacute C R, Bhaskaran H, Wright C D, Pernice W H P 2016 *Adv. Opt. Mater.* **5** 1600346
- [159] Feldmann J, Youngblood N, Wright C D, Bhaskaran H, Pernice W H P 2019 *Nature* **569** 208
- [160] Feldmann J, Youngblood N, Karpov M, Gehring H, Li X, Stappers M, Le Gallo M, Fu X, Lukashchuk A, Raja A. S, Liu J, Wright C D, Sebastian A, Kippenberg T J, Pernice W H P, Bhaskaran H 2021 *Nature* **589** 52
- [161] Pernice W H P, Bhaskaran H 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 171101
- [162] Raoux S, Xiong F, Wuttig M, Pop E 2014 *MRS Bull.* **39** 703
- [163] Zhang Y F, Chou J B, Li J Y, Li H S, Du Q Y, Yadav A, Zhou Si, Shalaginov M Y, Fang Z R, Zhong H K, Roberts C, Robinson P, Bohlin B, Ríos C, Lin H T, Kang M, Gu T, Warner J, Liberman V, Richardson K, Hu J J 2019 *Nat. Commun.* **10** 4279
- [164] Fang Z R, Zheng J J, Saxena A, Whitehead J, Chen Y Y, Majumdar A 2021 *Adv. Opt. Mater.* **9** 2002049
- [165] Delaney M, Zeimpekis I, Lawson D, Hewak D W, Muskens O L 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 2002447
- [166] Yang S, Shamim A, Vaseem M 2019 *Adv. Mater. Technol.* **4** 11
- [167] Wang N N, Li T T, Sun B S, Wang Z, Zhou L J, Gu T Y 2021 *Opt. Lett.* **46** 4088
- [168] Chen H X, Jia H, Wang T, Tian Y H, Yang J H 2020 *J. Lightwave Technol.* **38** 1874
- [169] Ma H S, Yang J B, Huang J, Zhang Z J, Zhang K W 2021 *Results Phys.* **26** 104384
- [170] Delaney M, Zeimpekis I, Du H, Yan X Z, Banakar M, Thomson D J, Hewak D W, Muskens O L 2021 *Sci. Adv.* **7**
- [171] Yuan H, Wu J G, Zhang J P, Pu X, Zhang Z F, Yu Y, Yang J B 2022 *Nanomaterials* **12** 669
- [172] Piggott A Y, Lu J, Babinec T M, Lagoudakis K G, Petykiewicz J, Vučković J 2014 *Sci. Rep.* **4** 7210
- [173] Ma H S, Luo M Y, He J, Du T, Zhang Z J, Jiang X P, He X, Fang L, Yang J B 2022 *J. Lightwave Technol.* **40** 7869
- [174] Ma H S, Du T, Zhang Z J, Jiang X P, Fang L, Yang J B 2023 *Opt. Commun.* **526** 128912
- [175] Dai D X, Wu H 2016 *Opt. Lett.* **41** 2346
- [176] Huang J, Yang J B, Chen D B, Bai W, Han J M, Zhang Z J, Zhang J J, He X, Han Y X, Liang L M 2020 *Nanophotonics* **9** 159
- [177] Ruan X K, Li H, Chu T 2022 *J. Lightwave Technol.* **40** 7142
- [178] Li C L, Zhang M, Xu H N, Tan Y, Shi Y C, Dai D X 2021 *Photonix* **2** 1991
- [179] Dai D X, Li C L, Wang S P, Wu H, Shi Y C, Wu Z H, Gao S M, Dai T G, Yu H, Tsang H K 2018 *Laser Photonics Rev.* **12** 1700109
- [180] Shen W W, Chen K N 2017 *Nanoscale Res. Lett.* **12** 56
- [181] Moreira R, Barton J, Belt M, Huffman T, Blumenthal D 2013 *Advanced Photonics Congress Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics* Rio Grande, USA, July 14–17, 2013 paper IT2A.4
- [182] Sodagar M, Pourabolghasem R, Eftekhar A A, Adibi A 2014 *Opt. Express* **22** 16767
- [183] Zheng X, Cunningham J E, Shubin I, Simons J, Asghari M, Feng D, Lei H, Zheng D, Liang H, Kung C C, Luff J, Sze T, Cohen D, Krishnamoorthy A V 2008 *Opt. Express* **16** 15052
- [184] Yu Z X, Qiu J F, Dong Z L, Zheng L, Guo H X, Wu J 2018 *Asia Communications and Photonics Conference (ACP)* Hangzhou, China, October 26–29, 2018 p1

SPECIAL TOPIC—The 70th anniversary of National University of Defense Technology

Research progress of intelligent design of on-chip optical interconnection devices*

Du Te¹⁾ Ma Han-Si¹⁾²⁾ Jiang Xin-Peng¹⁾ Zhao Fen¹⁾³⁾ Zhang Zhao-Jian¹⁾

Wang Zhi-Cheng¹⁾⁴⁾ Peng Zheng¹⁾⁴⁾ Zhang Yi-Yi¹⁾⁵⁾ Zhang Yu-Qing¹⁾⁴⁾

Luo Ming-Yu¹⁾⁵⁾ Zou Hong-Xin¹⁾ Wu Jia-Gui⁴⁾ Yan Pei-Guang⁶⁾

Zhu Gang-Yi⁷⁾ Yu Yang¹⁾ He Xin¹⁾ Chen Huan¹⁾

Zhang Zhen-Fu¹⁾ Yang Jun-Bo^{1)†}

1) (*College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

2) (*College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

3) (*School of Artificial Intelligence, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China*)

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

5) (*School of Computer, Electronic and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China*)

6) (*College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

7) (*School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and*

Telecommunications, Nanjing 210023, China)

(Received 30 April 2023; revised manuscript received 1 August 2023)

Abstract

Compared with traditional communication technologies such as electrical interconnection, optical interconnection technology has the advantages of large bandwidth, low energy consumption, anti-interference, etc. Therefore, optical interconnection is becoming an important approach and development trend of short distance and very short distance data terminal communication. As the chip level optical interconnection is implemented, silicon on insulator (SOI) based on-chip optical interconnection has been widely utilized with the support of a series of multiplexing technologies. In recent decades, many on-chip optical interconnection devices have been developed by using conventional design methods such as coupled-mode, multimode interference, and transmission line theories. However, when used in device design, these conventional methods often face the problems such as complex theoretical calculations and high labor costs. Many of the designed devices also encounter the problems of insufficient compactness and integration, and single function.

Intelligent design method has the advantages such as pellucid principle, high freedom of optimization, and good material compatibility, which can solve the problems of conventional design methods to a large extent. With the widespread use of intelligent design methods in the design of on-chip optical interconnection devices, three main trends have emerged. Firstly, the size of on-chip optical interconnect device is gradually developing

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60907003, 61805278, 12272407, 62275269, 62275271), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFF0706005), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2018M633704), the Scientific Research Program of National University of Defense Technology, China (Grant Nos. JC13-02-13, ZK17-03-01), the Natural Science Foundation of Hunan Province, China (Grant No. 13JJ3001), and the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-12-0142).

† Corresponding author. E-mail: yangjunbo@nudt.edu.cn

towards ultra compact size. Secondly, the number of intelligently designed controllable on-chip optical interconnect devices is increasing. Thirdly, on-chip optical interconnect devices are gradually developing towards integration and systematization. This paper summarizes the most commonly used intelligent design methods of photonic devices, including intelligent algorithms based intelligent design methods and neural networks based intelligent design methods. Then, the above three important research advances and trends of intelligently designed on-chip optical interconnection devices are analyzed in detail. At the same time, the applications of phase change materials in the design of controllable photonic devices are also reviewed. Finally, the future development of intelligently designed on-chip optical interconnection devices is discussed.

Keywords: on-chip optical interconnection device, intelligent design method, phase change material, integrated photonic circuit

PACS: 42.82.Ds, 42.79.Ta, 42.30.-d, 42.82.Bq

DOI: [10.7498/aps.72.20230705](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230705)



片上光互连器件的智能化设计研究进展

杜特 马汉斯 姜鑫鹏 赵芬 张兆健 王志成 彭政 张伊祎 张煜青 罗鸣宇 邹宏新 吴加贵 闫培光 朱刚毅
于洋 何新 陈欢 张振福 杨俊波

Research progress of intelligent design of on-chip optical interconnection devices

Du Te Ma Han-Si Jiang Xin-Peng Zhao Fen Zhang Zhao-Jian Wang Zhi-Cheng Peng Zheng
Zhang Yi-Yi Zhang Yu-Qing Luo Ming-Yu Zou Hong-Xin Wu Jia-Gui Yan Pei-Guang Zhu Gang-Yi
Yu Yang He Xin Chen Huan Zhang Zhen-Fu Yang Jun-Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 184204 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230705

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230705>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

绝缘体上铌酸锂薄膜片上光子学器件的研究进展

Research progress of photonics devices on lithium-niobate-on-insulator thin films
物理学报. 2020, 69(15): 157801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200302>

宽带高效聚焦的片上集成纳米透镜

Broadband efficient focusing on-chip integrated nano-lens
物理学报. 2020, 69(24): 244201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200948>

基于移动渐近线算法的大角度偏转分束器的智能设计

Intelligent design of large angle deflection beam splitter based on method of moving asymptotes
物理学报. 2021, 70(23): 234102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210117>

相变材料与超表面复合结构太赫兹移相器

Terahertz phase shifter based on phase change material-metasurface composite structure
物理学报. 2021, 70(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201495>

基于相变材料超表面的光学调控

Tunable metasurfaces based on phase-change materials
物理学报. 2020, 69(15): 154202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200453>

基于阵列波导光栅的光纤布拉格光栅解调技术综述

Review of fiber Bragg grating interrogation techniques based on array waveguide gratings
物理学报. 2022, 71(9): 094207 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212063>