



智能硅基多维复用 与处理芯片

Intelligent Silicon-Based Multi-Dimensional Multiplexing and Processing Chips

王健 /WANG Jian, 郑爽 /ZHENG Shuang, 曹晓平 /CAO Xiaoping

(华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074)

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

摘要: 全面综述了硅基光子单一维度和多个维度的复用与处理, 梳理了智能硅基光子集成器件的发展过程。智能硅基多维复用与处理芯片能充分开发和利用光子多维度资源, 并能结合硅基光子集成芯片的优势, 有望解决光通信新容量危机和新能耗危机提供核心光电子支撑技术和芯片, 从而为实现光通信可持续发展和其他相关应用提供潜在芯片级集成化解决方案。

关键词: 硅基光子学; 光通信; 光子集成芯片; 多维复用与处理; 人工智能; 神经网络

Abstract: In this paper, silicon-based photonic single- and multi-dimensional multiplexing and processing are comprehensively reviewed. The development of intelligent silicon-based photonic integrated devices is also reviewed. Intelligent silicon-based multi-dimensional multiplexing and processing chips can fully develop and make use of multiple physical dimension resources of photons and take the distinct advantages of silicon-based photonic integrated circuits. It is expected to provide the key optoelectronic supporting techniques and chips for addressing the capacity crunch and energy consumption crisis of optical communications. Consequently, intelligent silicon-based multi-dimensional multiplexing and processing chips provide the potential chip-level integrated solutions for realizing the sustainable development of optical communications and other related applications.

Keywords: silicon photonics; optical communications; photonic integrated circuits; multi-dimensional multiplexing and processing; artificial intelligence; neural network

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002008

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/34.1228.TN.20200423.1629.004.html>

网络出版日期: 2020-04-23

收稿日期: 2020-03-20

在硅基光电子概念提出之前, 互补金属氧化物半导体 (CMOS) 集成电路遵循着摩尔定律飞速发展。20

世纪 80 年代, R. SOREF 等发现硅基集成平台对于 1 550 nm 通信波段也非常适合^[1-2]。此后, 硅基光子集成得到了极大关注和快速发展。硅在近红外波段的折射率约为 3.5。如果以空气或二氧化硅为包层, 可利用硅与包层的大折射率差将光场紧密地束缚在微纳尺度下的波导结构内, 然后通过电光、热光等调制手段有效调控光场, 进而逐步将光的调制、探测和发射全部集

成在毫米级别的芯片上^[3]。硅光子集成的优势在于: 以光为载体的信息传输具备超高速、低损耗、低功耗以及高带宽的特点; 硅光子集成的工艺流程可以与现有硅基 CMOS 集成电路工艺兼容, 这有助于混合硅基光电子的集成^[4]。近年来, 硅基光子集成器件逐渐从学术界的研究转变到产业界的实际应用当中, 特别是在高速光通信中硅基集成器件的使用上 (包括调制

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFB2203604、2018YFB2200204)、国家自然科学基金 (11774116)、湖北省杰出青年基金 (2018CFA048)、广东省重点领域研发计划 (2018B030325002)、长江学者奖励计划青年学者、国家万人计划青年拔尖人才、华中科技大学学术前沿青年团队 (2016QYTD05)

器、探测器、光开关以及相干接收机等)扮演着核心的角色^[5-10]。一系列的进展和突破加速了大数据时代和全球信息一体化进程的到来。同时,海量数据的传输和处理对高速大容量光通信提出了更高的要求。

在以光纤网络传输为核心的光通信系统中,通信容量的提升面临着很大的压力。传统的光通信技术主要围绕着光的波长维度进行开发利用,例如,在C+L波段采用更加密集的波分复用技术(WDM)来增大通信容量^[11]。与此同时,对光单一维度资源的开发也面临着越来越大的挑战,并且慢慢接近极致。光的多维度资源利用,如光时分复用(OTDM)、偏振复用(PDM)、高级调制格式等技术引领了光通信的发展变革^[12-16]。然而,近年来这些光波维度资源几乎达到极致,例如,光时分复用(OTDM)技术已达到T波特符号率^[14],PDM技术受限于两个偏振^[15],高级调制格式已经达到超高维度正交幅度调制(4096-QAM)^[16];因此,光波的空间结构维度被视为新的维度资源。

光波的空间结构维度可以与光波的波长、偏振、时间和复振幅等多个维度资源相结合,以进一步提升通信容量。对光纤网络系统而言,光波空间结构维度资源的利用实际上是对光纤介质的改变和升级。由现有的单芯单模光纤发展出多芯光纤、少模光纤和多芯少模光纤等,通过将空分复用(SDM)技术与WDM、PDM、OTDM和高级调制格式技术相结合来提升通信容量^[17-22]。2012年,研究人员在实验中结合WDM、PDM和高级调制格式实现了11 bit/(s·Hz)的净频谱效率,其中标准单模光纤(SSMF)在165 km的传输速率为101.7 Tbit/s,共使用了370个密集波分复用(DWDM)信道,这些信道间隔为25 GHz,覆

盖整个C+L波段,每个25 GHz信道被细分为4个子带,每个子带携带73.5 Gbit/s正交频分复用(OFDM)信号,在每个调制的副载波上用PDM和128-QAM调制^[11]。近年来,SDM技术利用空间域的光场复用进一步提升通信容量。按照不同的空间模式,空间域结构光场包括轨道角动量(OAM)模式、贝塞尔模式、线偏振(LP)模式、矢量模式、空间阵列等^[20]。例如,在自由空间光通信中,利用双同心环偏振复用8个OAM模式(32个信道),实验实现了2.56 Tbit/s通信容量和95.7 bit/(s·Hz)频谱效率^[21];在光纤通信中,利用环形芯光纤有效抑制径向高阶模式,结合12.5 Gbaud 8-QAM信号、两个OAM高阶模式(模群复用)、112个波长,实验实现了18 km光纤OAM复用通信,无须多输入多输出(MIMO)数字信号处理^[22]。

在整个光通信系统中,光波全维度资源的利用对硅基集成芯片在光波多维复用和处理上提出了更高的要求。为充分发挥全维度资源在光通信系统中的优势,硅基光子集成芯片也需要具备多维复用与处理的能力^[23-24]。同时,随着近年来大数据时代的到来和人工智能的兴起,人们对硅基光子集成芯片的要求也从常规的多功能、可调谐、可编程转变为智能化,要求硅基光子集成芯片能够在某些方面(比如光计算等)超越并替代传统电子芯片的功能^[25-27]。

1 光子的基本维度资源和硅基光子集成芯片的优势特点

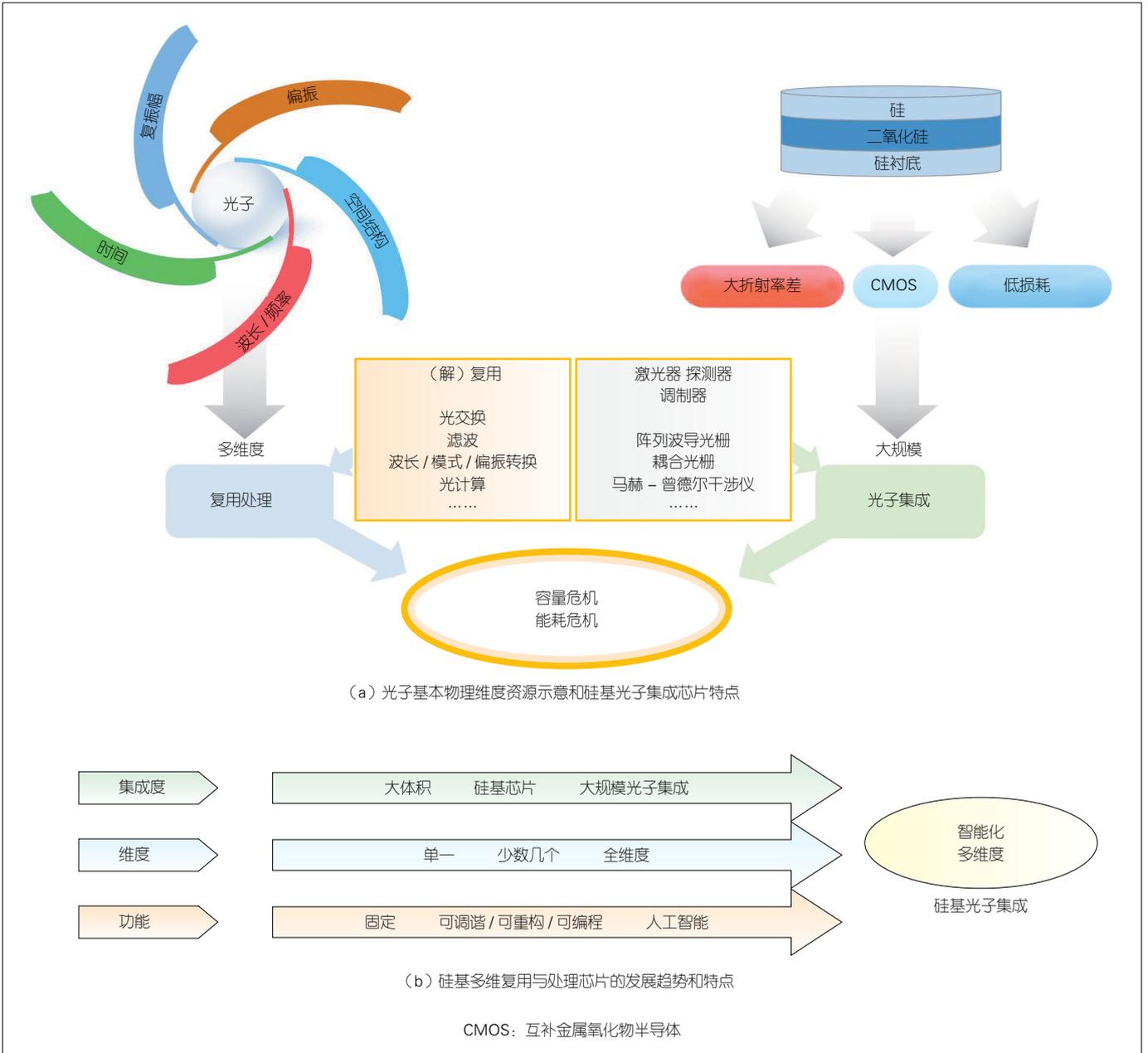
与光相关的应用几乎都是围绕光子的各个维度资源展开的。光最大的特点是具有多个维度。如图1(a)所示,光子的基本维度资源包括复振幅、波长/频率、时间、偏振以及空间域。在高速光通信中,围绕复振幅、波长、

时间、偏振维度分别开发了高阶调制格式、WDM、TDM、PDM技术。光子多维度复用和信号处理有望有效缓解当前的信息容量危机和能耗危机。光子多维复用传输技术的快速发展,对芯片上的光子多维复用和处理提出了新的要求。同时,近年来,硅基光子的发展非常迅速,部分产品已经商业化,这一方面得益于CMOS集成电路成熟的工艺;另一方面,硅基集成在集成度、功耗、损耗等性能指标上具有明显优势。经过近20年的发展,硅基光子集成芯片在单元结构(包括光栅、微环、阵列波导光栅等)、调制器、探测器、衰减器、偏振处理器上已经日渐成熟,为满足光通信系统中光子多维复用和处理的需求打下了坚实的基础^[28-30]。

图1(b)总结了硅基光子集成芯片的发展趋势和特点。从集成度来看,早期的体元件逐渐被片上硅基集成器件替代,最终要实现的是集成光路(PICs),实现片上系统(SoC)。硅基集成芯片对光子复用和处理的维度也逐渐从单一维度发展为少数维度,并最终升级为全维度。这将极大地有助于整个光通信系统全维度资源的充分利用和发展。此外,硅基集成芯片的功能也将逐步从固定功能发展到可调谐、可重构、可编程,并最终实现芯片的高度智能化以处理更加复杂的任务^[25-30]。

2 硅基光子单一维度复用和处理芯片

近年来,为了更好地匹配融合现有光通信系统,硅基光子集成芯片在单一维度的复用和处理上取得了很多研究成果。就WDM技术而言,实现波分的基本原理是利用光束干涉,具体又可分为双光束干涉以及多光束干涉。常见的波分复用器件有马赫-



▲图1 光子基本物理维度资源和硅基光子集成的发展趋势

曾德尔干涉仪 (MZI)、微环谐振器 (MRR) 以及阵列波导光栅 (AWG) 等^[31-34]。其中, MZI 作为双光束干涉器件, 可以通过级联的方式实现平坦通带的滤波, 从而减小外界温度等对波长漂移的影响, 具有更高的容忍度; 而 MRR、AWG 等器件, 可以实现更窄带宽的滤波, 因此在多通道密集波长复用中发挥着重要的作用。

模式复用技术利用波导中的不同模式作为信息传输的载体, 其关键是激发波导中的不同高阶模式并加载到主干路波导中实现多种模式复用, 其关键器件是模式复用器, 用来实现从基模到高阶模的有效转换。模式复用器的实现方案有很多已被报道, 主要有多模干涉仪 (MMI) 结构、绝热模式演变耦合结构以及非对称耦合结构

等。由于 MMI 型模式复用器结构较为复杂, 不利于模式通道数的扩展, 而绝热模式演变耦合型对工艺误差较为敏感; 因此, 基于非对称耦合结构的模式复用器以其低串扰、低插损、大带宽等特点获得了广泛的应用^[35-38]。除了片上波导模式复用之外, 硅光子集成芯片也可用来产生光纤或自由空间模式, 比如少模光纤内的线偏振

(LP)模式,自由空间中的矢量模式、OAM模式等^[39-42]。

偏振态也是光的一个重要属性。对于硅波导而言,硅和包层空气或二氧化硅存在大折射率差,其双折射效应极为显著;因此,大多数硅波导器件均具有非常严重的偏振敏感特性。为实现片上PDM,近年来各种片上偏振分束器件(PBS)已被报道,包括耦合结构和亚波长结构等,为片上偏振复用系统的研究应用提供了基础^[43-46]。

此外,硅基集成器件对高级调制格式的加载主要是依靠高速的、基于载流子色散效应的硅基调制器。一般常用的硅基调制器可分为两类:一类是基于微环谐振腔结构,另一类是基于MZI结构。这两类结构的优缺点也十分明显:微环调制所需的功耗低,但是带宽窄;MZI结构尺寸大(毫米级别),功耗大一些,可以实现宽带工作^[47-50]。

硅基光子单一维度处理芯片,主要集中在波长、模式和偏振3个方面。波长维度的光信号处理在光通信中有着重要应用,全光的光谱滤波、波长转换以及波长选择性光开关等在WDM以及全光网络中有着重要作用^[51-57]。硅基片上模式处理主要包括模式合成转换、模式过滤以及模式光开关等,为模分复用通信系统提供更大的灵活性^[58-61]。硅基片上偏振处理器除了用于偏振复用的偏振分束器之外,还有偏振起偏器、偏振旋转器以及偏振旋转分束器^[62-65]。

硅基光子单一维度复用和处理芯片走向实际应用的困难可能在于器件的性能。尽管从集成度上来看硅基光子集成具备优势,但是在有些情况下牺牲了器件的部分性能。以硅基AWG为例,在保证低损耗和低串扰的情况下,目前很难做到更多通道、更密集的WDM。针对模式和偏振复用,

片上更高阶的模式耦合和激发是一个难点,新兴的亚波长结构为此提供了新的设计方法。

3 硅基光子多维复用/解复用芯片

目前,WDM、PDM和MDM等单一维度复用/解复用技术均已应用于光通信,将多种复用方式综合运用还可形成多维复用技术,从而显著增加可用通道数和提高通信容量,这也是未来超大容量光通信/光互连的一个重要发展趋势;因此,与之相匹配的硅基光子多维复用/解复用芯片也受到了广泛关注。

3.1 波长-模式混合复用/解复用

将多模式和多波长相互结合可以实现一种波长-模式的混合复用/解复用。根据前面提到的波分复用器以及模分复用器结构,一种简单的方案是将两种复用/解复用器结构相互级联,从而实现混合复用/解复用。如图2(a)所示的波长-模式混合复用/解复用器,它由一个基于级联非对称定向耦合器结构的4通道模式解复用器以及两个支持16波长通道的双向型AWG构成。4个模式和16个波长携带的64通道多维复用光信号,首先被4通道模式解复用器分成4组基模,每组均含有16个波长通道,然后分别从模式解复用器的单模输出波导出射并分别进入各自的波分解复用器,由此实现不同波长从不同输出端口输出。其中,模式解复用器引入的模式通道间串扰 <-20 dB;而AWG波分复用器引入的波长通道间串扰约为 -14 dB^[66]。由于级联微环用于波分复用系统具有紧凑、低损耗以及低串扰等优势,另一种替代的方案是将模分复用器同阵列级联微环进行串联。基于非对称定向耦合器的4通道模式解复用器以及8通道级联微环方形滤波器,实现了模式串

扰约 -20 dB、波长串扰约 -25 dB的混合解复用^[67]。除此之外,图2(b)提出了另外一种将微环波长复用器与定向耦合模式复用器混合兼容的方式,其利用单模微环谐振器来选择性地耦合多模波导中的不同模式。由于微环还可以支持多个波长复用通道,从而可以实现微环在不同波长下对模式的选择性耦合^[68]。

3.2 偏振-模式混合复用/解复用

片上两种不同偏振的高阶模式均可利用级联非对称定向耦合器结构来实现复用解复用,而不同偏振的复用解复用则可以通过偏振旋转器(PR)以及偏振分束器(PBS)等来实现;因此,偏振-模式的混合复用可先通过PR或PBS结构得到对应偏振下的基模,然后通过级联的非对称定向耦合器结构完成不同高阶模式的复用。已有报道中提到利用PBS演示了同时实现4个横磁模(TM)和6个横电模(TE)的10通道偏振-模式混合复用器,在 $1525 \sim 1610$ nm的大波长范围内具有约 -10 dB串扰^[69]。同时,光纤内的不同偏振模式也可通过片上结构来实现复用解复用,如图2(c)所示,其利用5个紧密排放的小型二维垂直耦合光栅,可以实现对少模光纤的不同偏振共6个模式的激发或者检测^[70]。除此之外,不同偏振的空间模式可通过片上光栅结构进行复用解复用,利用二维叠加全息叉形光栅结构,将波导中的平面导模耦合成自由空间中的偏振多样性OAM模式,有望实现不同偏振下不同阶数的OAM模式复用^[71]。

3.3 偏振-波长混合复用/解复用

图2(d)展示了一种由PBS、PR以及AWG构成的偏振-波长混合解复用器。首先利用宽带PBS将入射光信号分为TE偏振及TM偏振两组,

每组都包含多个波长通道，然后 TM 偏振光经过一个 PR 被旋转和转换成 TE 偏振，最后这两组信号被分别输入到双向型 AWG 的两个输入波导进行多路波长解复用。这种混合解复用器件的性能分别由单一偏振以及波长解复用的性能决定，实现了偏振消光比 < -20 dB，波长串扰值约 -13 dB^[72]。

3.4 模式 / 波长复用 - 复振幅高级调制格式

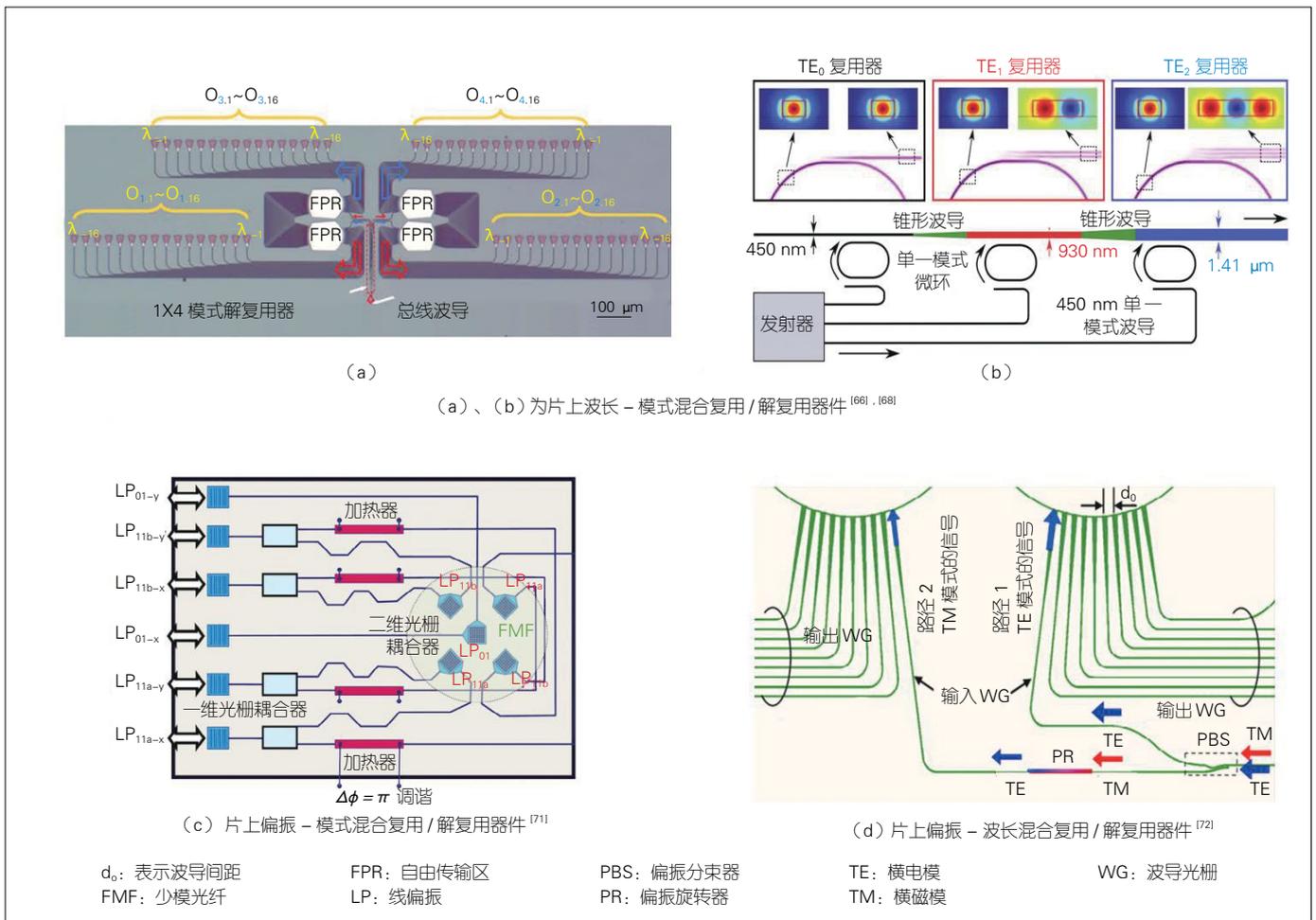
同时，将混合多维复用技术与各种高级调制格式相结合，可进一步提升光互连与光通信的容量。华中科技大学研究人员展示了一种模分复用技术结合高级调制格式的方案，两通道的模分复用由光栅辅助的非对称耦

合器结构实现，而调制格式则选择基于正交频分复用的偏置正交振幅调制 (OFDM/OQAM)，具有较高的旁瓣抑制率，可以有效地进行高阶调制^[73]。实验中，利用双通道 MDM 加载 256-QAM 信号，实现了 23.89 Gbit/s 的信息传输。此外，利用波分复用系统加载高阶调制格式的方案也有报道。该方案通过利用两个级联 AWG 构成 16 个波长通道的 WDM 系统，每个通道携带 10 Gbaud 的 16-QAM 信号，演示了具有 640 Gbit/s 吞吐量的可编程光学滤波和上传下载^[74]。

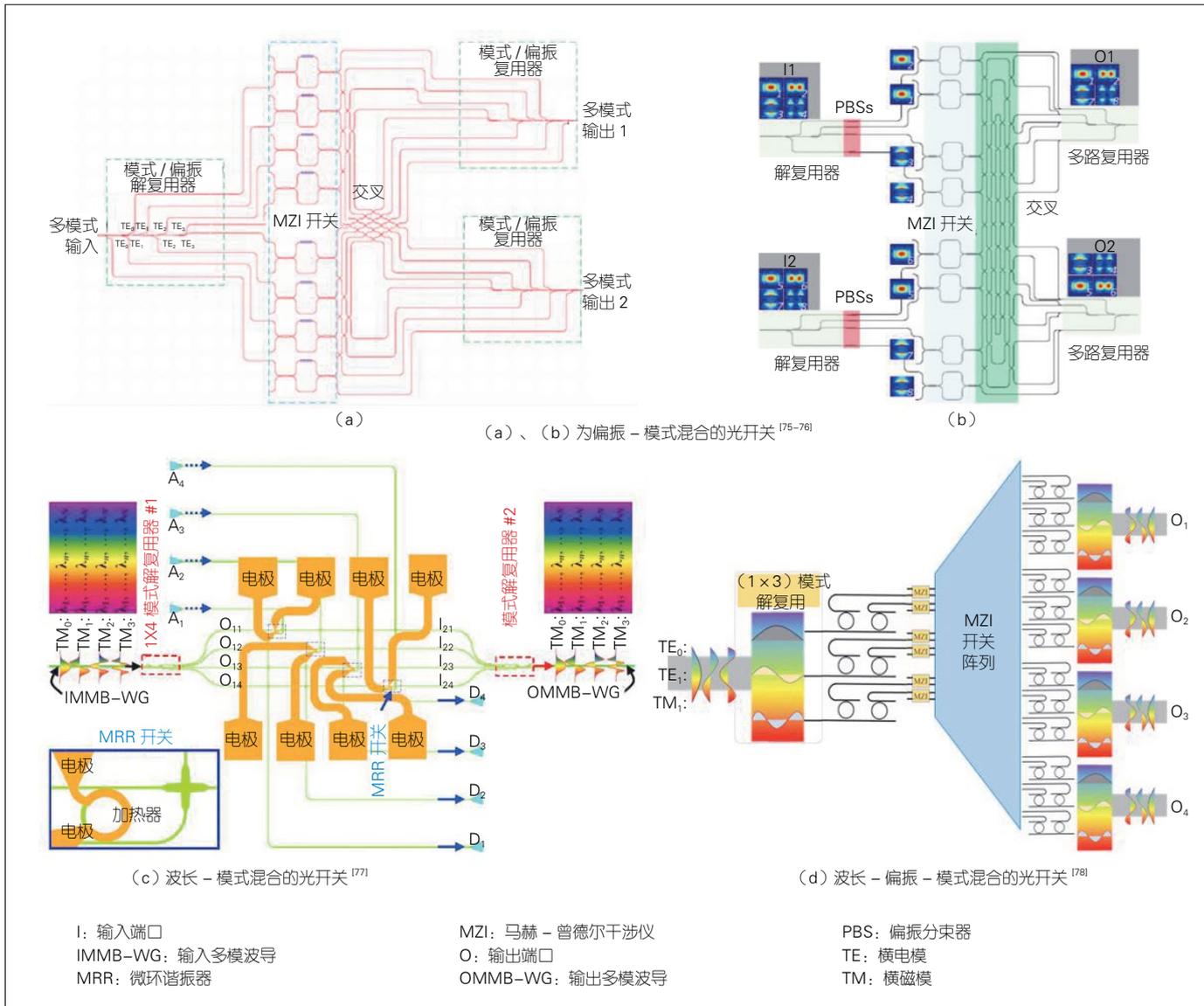
4 硅基光子多维处理芯片

近来针对混合多维复用信号的处理也引起了越来越多的关注，主要集

中在多维复用光开关方面。目前用于大规模光开关阵列中的交换单元，无论是 MRR 还是 MZI，都是针对波导中的基模工作；因此，多维混合复用系统中通常需要将高阶模式解复用为 TE 偏振基模，然后进行光交换处理。图 3 (a) 演示了一种偏振 - 模式混合的 1×2 选择光开关，利用 PBS 和非对称定向耦合器结构构成的支持 4 个 TE 偏振以及 4 个 TM 偏振模式的混合复分解复用器来实现共 8 个模式的解复用，然后通过 MZI 光开关阵列以及级联的光交叉实现 1×2 的路由选择，其平均串扰值 < -15 dB^[75]。基于类似工作原理并结合拓扑结构，图 3 (b) 演示了一种可以实现两个偏振、两个模式的 2×2 选择性光开关，该结构利用 PBS



▲图 2 硅基光子多维复用 / 解复用器件



▲图3 硅基光子多维处理器件

来减小模间串扰。经实验验证，同一通道间不同偏振模式的模间串扰以及不同通道间同一偏振模式的模内串扰均为 -23 dB 左右^[76]。对于混合 WDM-MDM 系统，可以通过模式复用解复用器件和阵列 MRR 光开关级联的方式实现多个波长和模式通道的选择性上传下载以及光切换，如图 3 (c) 所示^[77]。另外，同时针对波长、偏振、模式的光开关最近也开始有所报道，如图 3 (d) 所示，其利用偏振-模式混合复用器以及级联微环进行混合信号复用，然后

利用 MZI 光开关阵列实现通道交换^[78]。目前，多维混合复用光信号处理尚处于初始研究阶段，针对波长、偏振、模式的大规模无阻塞光开关阵列以及更多混合信号处理功能仍是个不小的挑战。特别地，光纤模式复用与芯片上模式复用的对接和融合是一个难点。目前，大多研究工作集中在利用硅基光子集成芯片实现对光纤多个模式的解复用，但还未实现光纤内模式与芯片上模式的一一对应耦合；因此，该工作还需进一步探索。

硅基光子集成芯片大多是针对某些特定应用的场景，如微环谐振腔、非对称 MZI、光开关阵列等都需要特定的设计，然后再制备出来。从电子的“现场可编程门阵列 (FPGA)”借鉴思路，能够在硅基光子集成平台上制备出类似的可编程光“FPGA”结构。图 4 所示是基于六边形结构的光“FPGA”，该结构的基本单元是由单个可调的 MZI 构成。通过该阵列，可以路由光在片上的传输路径，构建不同的功能性器件，包括微环结构、MZI

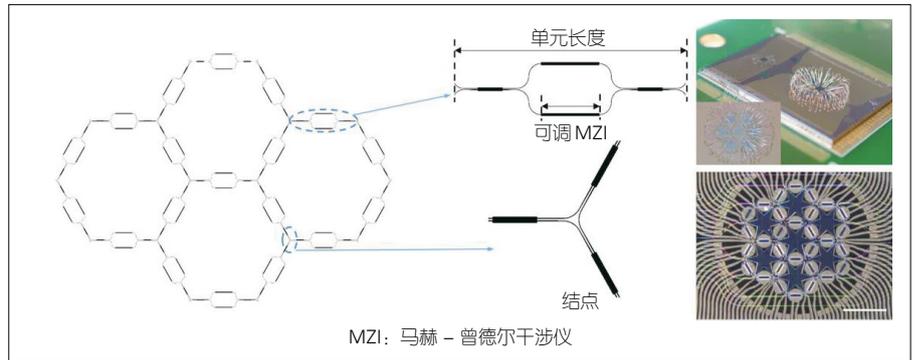
结构、光开关阵列、延时线等^[79-83]。

5 硅基光子集成芯片与人工智能

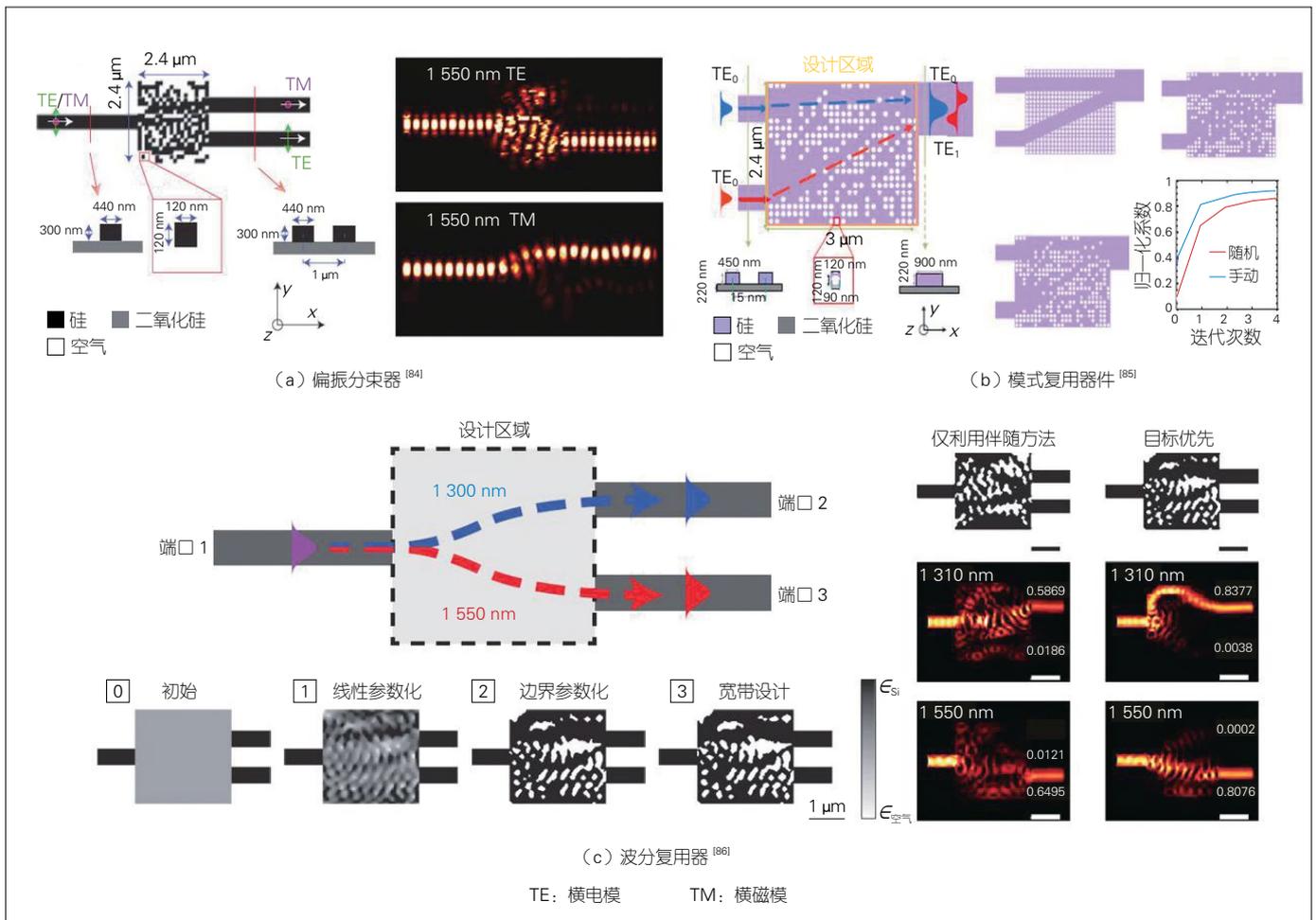
近年来,人工智能再度兴起,其中,深度学习、神经网络、大数据处理应用更加广泛。同时,随着硅基光子集成器件的逐步成熟,需要新的技术来与硅基芯片进行进一步融合。这些均为硅基光子集成芯片与人工智能的融合提供了契机。一方面,硅基集成芯片的技术已经成熟,另一方面,相比于电子,光子在传输、功耗等方面具备绝对优势;因此,近年来针对硅基芯片与人工智能的研究越来越多,这推动了硅基光子集成器件从单一功能、可调谐、可重构到智能化方向发展^[25-27],其中,包括硅光子芯片的算法优化、硅光子芯片上的深度学习、片上神经网络模拟等。这些研究为硅基光子集成芯片的发展提供了新的方向,也为进一步实际应用提供了更丰富的选择。

5.1 光子集成器件的常规算法优化

图5(a)为一款超小紧凑的集成光学偏振分束器,该器件的尺寸仅为 $2.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$ 。将器件离散化为400个 $120 \text{ nm} \times 120 \text{ nm}$ 的方块,可称之为像素。每个这样的像素有两种状态:



▲图4 硅基光子可编程处理器^[80]



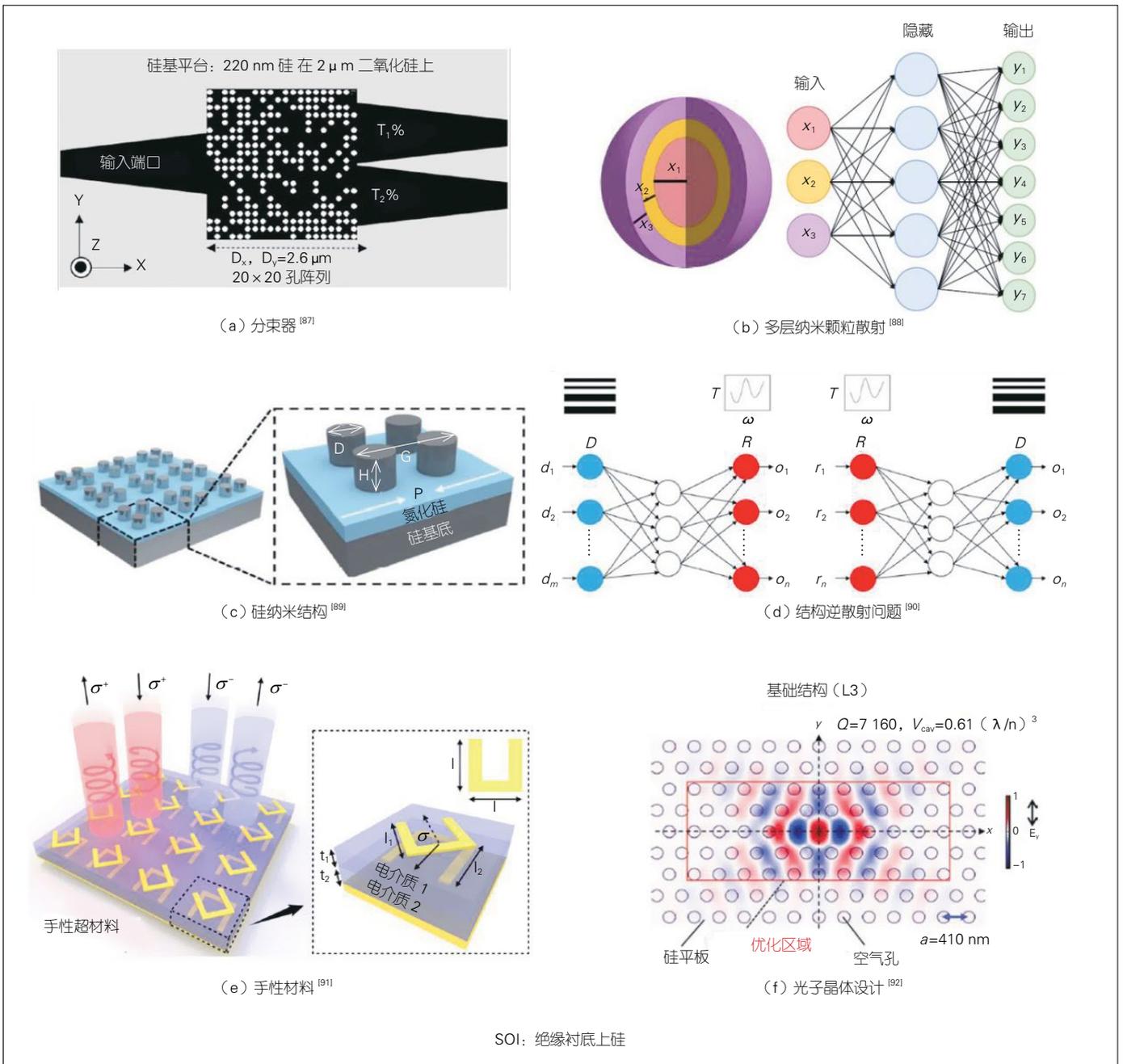
▲图5 基于常规算法优化的硅基光子集成器件^[84-86]

硅或空气。通过使用一个非线性优化算法（二值化直接搜索）进行优化，该器件的工作波段可处于 1 550 nm。具体方法为：首先，一个随机选择的像素被选择为刻蚀，然后计算其输出结果（这里是两个偏振的平均透射效率），如果这个平均透射效率有提高，那么这个像素就确定为刻蚀，如果没

有提高就为不刻蚀。如此循环迭代很多次后，偏振分束器的性能接近最佳。实验制作中，输入输出波导以及核心器件的刻蚀仅需要一次，不需要套刻。器件的平均传输效率超过 70%，消光比超过 10 dB，工作带宽为 32 nm。仿真中，该器件在波导厚度上的工艺误差在 $\pm 20 \text{ nm}$ ^[84]。该结构为微纳光子集

成器件的设计提供了一种可选择的思路；但算法不够智能且计算较为复杂，一旦器件尺寸变大，像素增多就使得计算量急剧增大。

图 5 (b) 为硅基超紧凑模式复用器件，它同样通过二值化直接搜索算法实现 2 个模式和 3 个模式的复用和解复用。不同在于，工艺上刻蚀像素单元是



▲图 6 神经网络结构优化的光子集成器件^[87-92]

圆孔形状，而不是之前的方形^[85]。图5(c)为基于另一种算法优化的硅基波分复用器。采用粒子群优化(PSO)与时域有限差分(FDTD)相结合的方法进行优化设计^[86]，这种方法已被证明在设计紧凑、多参数光学器件方面具有强大能力，文中紧凑、超低损耗、中心波长分别在1550 nm和1310 nm的波长解复用器得以设计和验证。

5.2 光子集成器件的人工智能优化

除优化算法外，近几年来，深度学习也被引入光子集成器件的设计中。图6(a)是通过深度神经网络(DNN)来优化设计的分束器。按不同层的位置划分，DNN内部的神经网络层可分为输入层、隐藏层和输出层。一般第一层是输入层，最后一层是输出层，中间的层数都是隐藏层。层与层之间是全连接的，即第*i*层的任意一个神经元一定与第*i+1*层的任意一个神经元相连^[87]。反向传播算法(BP)是DNN学习中一个非常关键的过程，由正向传播和反向传播组成。在正向传播过程中，输入信息通过输入层、经隐藏层逐层处理并传向输出层。如果在输出层得不到期望的输出值，则取输出结果与样本标签误差的平方和作为目标函数，转入反向传播。通过对损失函数用梯度下降法进行迭代优化求极小值，找到合适的输出层和隐藏层对应的线性系数矩阵 \mathbf{W} 和偏置向量 \mathbf{b} ，网络的学习在权值修改过程中完成，误差达到所期望值时，学习结束。图6(a)所示的分束器经DNN优化后，端口反射率低于-20 dB，透射率超过90%。图6(b)提出了一种利用神经网络来模拟多层纳米颗粒光散射的方法。结果发现，网络只需要对数据进行小样本的训练就可以近似地模拟高精度的数据。一旦神经网络被训练，它可以比传统方法更快地模拟这种光学

过程^[88]。图6(c)中，双向的DNN被用于产生精准的硅纳米结构颜色。硅纳米结构颜色的印刷分辨率和色域都比sRGB高^[89]。精确的颜色是由纳米结构的局部磁偶极和电偶极共振决定的，它们对其几何变化非常敏感。通常情况下，特定颜色的设计和几何参数的迭代优化需要非常大的计算量，而获得数百万种不同的结构颜色是一个挑战。在这里，通过训练一个深度神经网络，可以准确地预测正演模拟过程中随机硅纳米结构产生的颜色，并解决反向设计过程中的非均匀性问题，该方法可以精确输出至少100万种不同颜色。研究表明，深度学习是降低纳米计算成本和最大化设计效率的有力工具，可以很好地指导硅结构颜色生成。图6(d)中，利用神经网络进行逆设计存在非均匀性是逆散射问题中的一个典型问题。该问题使得在一个大的训练数据集上训练神经网络变得非常困难，而这个大的训练数据集通常需要对复杂的光结构进行建模。将正向建模和反向设计结合在一个串联的网络中可以克服这一问题，使包含非均匀电磁散射实例的数据集能够有效训练深层神经网络^[90]。此外，如图6(e)和6(f)所示，深度学习和神经网络被进一步用于手性超材料和高Q值的光子晶体L3纳米腔体的设计，均获得不错的效果^[91-92]。

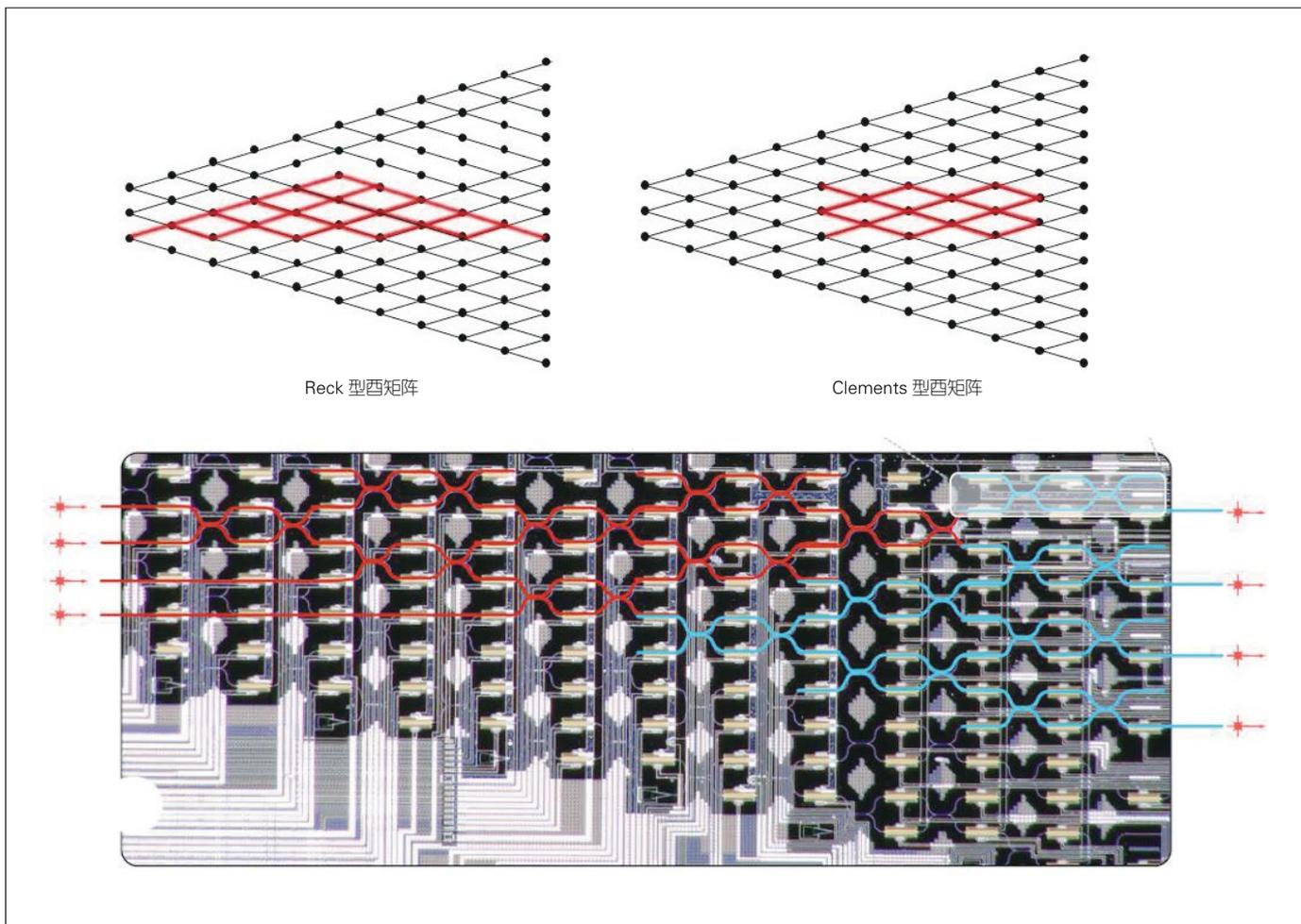
5.3 硅基光子集成芯片上的人工智能实现

除通过算法(包括常规算法和深度学习、神经网络等相关算法)对硅基等微纳光子器件的设计和优化之外，人工智能(包括深度神经网络和类真实神经网络的结构等)硅基光子集成芯片也得以实现^[93-99]。硅基光子集成芯片上的许多功能器件都基于光场的干涉效应，其中MZI结构最为常见。在2017年，美国麻省理工学院学者报

道了一个全光神经网络结构(非线性计算模块在片外实现)，用于实现语音识别的深度学习^[93]。如图7所示，该硅基阵列结构是一个2层全光神经网络结构，由56个可热调的MZI单元组成，并有4个输入和4个输出端口。一个任意的实值矩阵均可以通过奇异值分解(SVD)方法来获得，即 $\mathbf{M}=\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T$ ，其中 \mathbf{U} 为酉矩阵， \mathbf{V}^T 为酉矩阵 \mathbf{V} 的复共轭， $\mathbf{\Sigma}$ 为对角矩阵。片上酉矩阵的制备可以通过Reck或Clements型MZI阵列来实现，对角矩阵可通过光衰减器来实现；因此，每层均是一个可任意重构的矩阵^[94]。另外，针对两层之间的非线性单元，可利用常见的光学非线性来实现，比如饱和吸收、双稳态等。

在实验中，为准备训练和测试数据集，有360个数据点被使用，每个数据点由一个音素的4个对数面积比系数组成。对数面积比系数或特征向量表示在不同对数间隔的频带中包含的功率，可通过计算傅里叶语音信号乘以汉明窗函数的变换来表示。这360个数据点来自90个人的采样(每个人说4种不同的元音)，其中一半的数据点用于训练和学习，另一半用于测试该训练过的全光神经网络，可在传统的计算机上使用随机梯度下降法和标准反向传播算法训练全光神经网络中的矩阵参数。片上神经网络在计算速度和功耗上均具备优势，可满足大数据处理的高速和低功耗需求。

近年来，越来越多的研究集中在寻找新的“神经形态计算”架构来模拟大脑同时处理和信息存储的能力。因为在真实的大脑中，神经元突触比神经元在数量上多出很多数量级，实现模拟突触功能的硬件设备是第一步也是必不可少的一步。使用纯光学手段有很多好处，包括超快的运行速



▲图7 硅基光子集成芯片用于深度学习^[93]

度、几乎无限的带宽以及很小的功率损失。基于相变材料和集成器件的光子神经形态计算也是一个非常有前景的方法^[95]。很多报道已经证明这些材料和器件具有内在的能力，能够在硬件上提供神经元的基本集成和激发功能以及突触的塑性加权操作。2019年业界报道了第一个可用于构建尖峰神经网络的全光集成和可扩展神经形态框架，并证明该系统能够完成典型的人工智能模式识别任务^[96]。此外，该系统的训练和学习包括有监督和无监督两种方式，这两种方式具有不同的学习规则，都有广泛的应用场景。基于波分复用技术，该片上集成系统包含4个神经元和60个突出（共计140

个光学元件）。在实验中，该神经网络结构被成功应用于字母识别。

除了硅基片上神经网络结构的实现，自由空间中的衍射深度神经网络结构同样被用于深度学习中，包括3D打印的衍射深度神经网络和傅里叶空间衍射深度神经网络^[97]。其中，傅里叶空间衍射深度神经网络是通过在傅里叶平面放置简单的衍射调制层来实现的，另外光学非线性是通过铁电薄膜引入的，上述方案的优势在于方案简单和光速的处理速度^[98]。

6 总结和展望

通过对近年来智能硅基多维复用与处理芯片研究进展的简要回顾，可

以看到，从光子的多维度资源出发，硅基芯片上的复用从单一维度逐步发展为多个维度，芯片的处理功能也从单一波长维度逐渐发展为多个维度。以光子多个维度资源为基础，硅基光子集成平台和技术提供了强有力的支撑，在多维复用和处理上取得了很多成果。此外，随着大数据和人工智能时代的到来，智能算法也为硅基芯片的设计提供了新的思路，如新型超紧凑的模式复用器、波分器件、偏振器件等。硅基光子集成芯片实现人工智能是近年来的热点，一方面硅基光子集成工艺和技术日渐成熟，另一方面光子的传输和处理比电子更具优势。目前，已有多种结构被用于实现片上

的深度神经网络或模拟真实大脑神经网络结构,均取得不错的效果。

为进一步满足全维度光通信系统对多维复用和处理的需求,硅光子集成芯片需要进一步融合多维度资源,实现片上全维度的复用和处理。与此同时,紧密结合锗、Ⅲ-V族有源材料、相变材料、铌酸锂(薄膜)等,将进一步助于实现更丰富的光信号处理;紧密结合各种先进算法,实现对现有集成功能器件的进一步改进和优化;紧密结合人工智能等,实现全光片上神经网络结构的制备,探索全光计算,以在部分计算领域替代传统电子计算。

参考文献

- [1] SOREF R, LARENZO J. All-Silicon Active and Passive Guided-Wave Components for $\lambda = 1.3$ and $1.6 \mu\text{m}$ [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(6): 873-879. DOI:10.1109/jqe.1986.1073057
- [2] SOREF R, BENNETT B. Electrooptical Effects in Silicon[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(1): 123-129. DOI:10.1109/jqe.1987.1073206
- [3] SOREF R. The Past, Present, and Future of Silicon Photonics[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(6): 1678-1687. DOI:10.1109/jstqe.2006.883151
- [4] JALALI B, FATHPOUR S. Silicon Photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4600-4615. DOI:10.1109/jlt.2006.885782
- [5] LIU A S, JONES R, LIAO L, et al. A High-Speed Silicon Optical Modulator Based on a Metal-Oxide-Semiconductor Capacitor[J]. Nature, 2004, 427(6975): 615-618. DOI:10.1038/nature02310
- [6] XU Q F, SCHMIDT B, PRADHAN S, et al. Micrometre-Scale Silicon Electro-Optic Modulator[J]. Nature, 2005, 435(7040): 325-327. DOI:10.1038/nature03569
- [7] ZHU Y X, ZHANG F, YANG F, et al. Toward Single Lane 200G Optical Interconnects with Silicon Photonic Modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 38(1): 67-74. DOI:10.1109/jlt.2019.2944762
- [8] COLACE L, MASINI G, ASSANTO G, et al. Efficient High-Speed Near-Infrared Ge Photodetectors Integrated on Si Substrates[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(10): 1231-1233. DOI:10.1063/1.125993
- [9] MICHEL J, LIU J F, KIMERLING L C. High-Performance Ge-on-Si Photodetectors[J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 527-534. DOI:10.1038/nphoton.2010.157
- [10] SCHALL D, PALLECCHI E, DUCOURNAU G, et al. Record High Bandwidth Integrated Graphene Photodetectors for Communication beyond 180 Gb/s[C]//Optical Fiber Communication Conference, San Diego, California, Washington, D.C.: OSA, 2018. DOI:10.1364/ofc.2018.m2i.4
- [11] QIAN D Y, HUANG M F, IP E, et al. High Capacity/Spectral Efficiency 101.7-Tb/s WDM Transmission Using PDM-128QAM-OFDM over 165-km SSMF within C- And L-Bands[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(10): 1540-1548. DOI:10.1109/jlt.2012.2189096
- [12] Winzer P J. Modulation and Multiplexing in Optical Communication Systems [J]. IEEE LEOS Newsletter, 2009, 23: 4-10. DOI: 10.1364/CLEO.2009.CTuL3
- [13] ZHOU X, YU J J. Multi-Level, Multi-Dimensional Coding for High-Speed and High-Spectral-Efficiency Optical Transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(16): 3641-3653. DOI:10.1109/jlt.2009.2022765
- [14] RICHTER T, PALUSHANI E, SCHMIDT-LANGHORST C, et al. Transmission of Single-Channel 16-QAM Data Signals at Terabaud Symbol Rates[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 30(4): 504-511. DOI:10.1109/jlt.2011.2174029
- [15] WINZER P J, GNAUCK A H, DOERR C R, et al. Spectrally Efficient Long-Haul Optical Networking Using 112-Gb/s Polarization-Multiplexed 16-QAM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 547-556. DOI:10.1109/jlt.2009.2031922
- [16] OLSSON S L I, CHO J, CHANDRASEKHAR S, et al. Probabilistically Shaped PDM 4096-QAM Transmission over up to 200 km of Fiber Using Standard Intraday Detection[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 4522-4530. DOI:10.1364/oe.26.004522
- [17] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-Division Multiplexing in Optical Fibres[J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362. DOI:10.1038/nphoton.2013.94
- [18] LI G F, BAI N, ZHAO N B, et al. Space-Division Multiplexing: The next Frontier in Optical Communication[J]. Advances in Optics and Photonics, 2014, 6(4): 414-487. DOI:10.1364/aop.6.000413
- [19] WINZER P J. Making Spatial Multiplexing a Reality[J]. Nature Photonics, 2014, 8(5): 345-348. DOI:10.1038/nphoton.2014.58
- [20] WANG J. Advances in Communications Using Optical Vortices[J]. Photonics Research, 2016, 4(5): B14. DOI:10.1364/prj.4.000b14
- [21] WANG J, YANG J Y, FAZAL I M, et al. Terabit Free-Space Data Transmission Employing Orbital Angular Momentum Multiplexing[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 488-496. DOI:10.1038/nphoton.2012.138
- [22] ZHU L, ZHU G X, WANG A D, et al. 18 km Low-Crosstalk OAM+WDM Transmission with 224 Individual Channels Enabled by a Ring-core Fiber with Large High-order Mode Group Separation[J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1890-1893. DOI:10.1364/ol.43.001890
- [23] WANG J, LONG Y. On-Chip Silicon Photonic Signaling and Processing: a Review[J]. Science Bulletin, 2018, 63(19): 1267-1310. DOI:10.1016/j.scib.2018.05.038
- [24] WANG J, LONG Y. Silicon-Based Nonlinear Optical Signal Processing[M]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2018. DOI:10.1117/3.2502179
- [25] FERREIRA DE LIMA T, SHASTRI B J, TAIT A N, et al. Progress in Neuromorphic Photonics[J]. Nanophotonics, 2017, 6(3): 577-599. DOI:10.1515/nanoph-2016-0139
- [26] PENG H T, NAHMIAS M A, DE LIMA T F, et al. Neuromorphic Photonic Integrated Circuits[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(6): 1-15. DOI:10.1109/jstqe.2018.2840448
- [27] YAO K, UNNI R, ZHENG Y B. Intelligent Nanophotonics: Merging Photonics and Artificial Intelligence at the Nanoscale[J]. Nanophotonics, 2019, 8(3): 339-366. DOI:10.1515/nanoph-2018-0183
- [28] WANG J. Chip-Scale Optical Interconnects and Optical Data Processing Using Silicon Photonic Devices[J]. Photonic Network Communications, 2016, 31(2): 353-372. DOI: 10.1007/s11107-015-0525-z
- [29] DAI D X, BAUTERS J, BOWERS J E. Passive Technologies for Future Large-Scale Photonic Integrated Circuits on Silicon: Polarization Handling, Light Non-Reciprocity and Loss Reduction[J]. Light: Science & Applications, 2012, 1(3): e1. DOI:10.1038/lsa.2012.1
- [30] DONG P, CHEN Y K, DUAN G H, et al. Silicon Photonic Devices and Integrated Circuits[J]. Nanophotonics, 2014, 3(4/5): 215-228. DOI:10.1515/nanoph-2013-0023
- [31] HORST F, GREEN W M J, ASSEFA S, et al. Cascaded Mach-Zehnder Wavelength Filters in Silicon Photonics for Low Loss and Flat Pass-Band WDM (de)Multiplexing[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 11652-11658. DOI:10.1364/oe.21.011652
- [32] DONG P. Silicon Photonic Integrated Circuits for Wavelength-Division Multiplexing Applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(6): 370-378. DOI:10.1109/jstqe.2016.2575358
- [33] CHEN S T, FU X, WANG J, et al. Compact Dense Wavelength-Division (De)Multiplexer Utilizing a Bidirectional Arrayed-Waveguide Grating Integrated with a Mach-Zehnder Interferometer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(11): 2279-2285. DOI:10.1109/jlt.2015.2405510
- [34] DAI D X, FU X, SHI Y C, et al. Experimental Demonstration of an Ultracompact Si-Nanowire-Based Reflective Arrayed-Waveguide Grating (de)Multiplexer with Photonic Crystal Reflectors[J]. Optics Letters, 2010, 35(15): 2594-2596. DOI:10.1364/ol.35.002594
- [35] DING Y H, XU J, DA ROS F, et al. On-Chip Two-Mode Division Multiplexing Using Tapered Directional Coupler-based Mode Multiplexer and Demultiplexer[J]. Optics Express, 2013, 21(8): 10376-10382. DOI:10.1364/oe.21.010376
- [36] XU L H, WANG Y, MAO D, et al. Ultra-Broadband and Compact Two-Mode Multiplexer

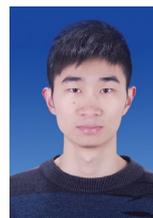
- Based on Subwavelength-Grating-Slot-Assisted Adiabatic Coupler for the Silicon-on-Insulator Platform[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(23): 5790–5800. DOI:10.1109/jlt.2019.2939260
- [37] HE Y, ZHANG Y, ZHU Q M, et al. Silicon High-Order Mode (De)Multiplexer on Single Polarization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(24): 5746–5753. DOI:10.1109/jlt.2018.2878529
- [38] DAI D X, LI C L, WANG S P, et al. 10-Channel Mode (de)Multiplexer with Dual Polarizations[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(1): 1700109. DOI:10.1002/lpor.201700109
- [39] CAI X, WANG J, STRAIN M J, et al. Integrated Compact Optical Vortex Beam Emitters[J]. *Science*, 2012, 338(6105): 363–366. DOI:10.1126/science.1226528
- [40] XIE Z W, LEI T, LI F, et al. Ultra-Broadband On-Chip Twisted Light Emitter for Optical Communications[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(4): 18001. DOI:10.1038/lsa.2018.1
- [41] ZHOU N, ZHENG S, CAO X P, et al. Generating and Synthesizing Ultrabroadband Twisted Light Using a Compact Silicon Chip[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(13): 3140–3143. DOI:10.1364/ol.43.003140
- [42] ZHENG S, WANG J. On-Chip Orbital Angular Momentum Modes Generator and (de)Multiplexer Based on Trench Silicon Waveguides[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 18492–18501. DOI:10.1364/oe.25.018492
- [43] CHEN S T, WU H, DAI D X. High Extinction-Ratio Compact Polarisation Beam Splitter on Silicon[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(12): 1043–1045. DOI:10.1049/el.2016.0683
- [44] KIM Y, LEE M H, KIM Y, et al. High-Extinction-Ratio Directional-Coupler-Type Polarization Beam Splitter with a Bridged Silicon Wire Waveguide[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3241–3244. DOI:10.1364/ol.43.003241
- [45] TIAN Y, QIU J F, LIU C, et al. Compact Polarization Beam Splitter with a High Extinction Ratio over S+C+L Band[J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 999–1009. DOI:10.1364/oe.27.000999
- [46] XU H N, DAI D X, SHI Y C. Metamaterial Polarization Beam Splitter: Ultra-Broadband and Ultra-Compact On-Chip Silicon Polarization Beam Splitter by Using Hetero-Anisotropic Metamaterials[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(4): 1970021. DOI:10.1002/lpor.201970021
- [47] LI M F, WANG L, LI X, et al. Silicon Intensity Mach-Zehnder Modulator for Single Lane 100 Gb/s Applications[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(2): 109–116. DOI:10.1364/prj.6.000109
- [48] SAMANI A, PATEL D, CHAGNON M, et al. Experimental Parametric Study of 128 Gb/s PAM-4 Transmission System Using a Multi-Electrode Silicon Photonic Mach Zehnder Modulator[J]. *Optics express*, 2017, 25(12): 13252–13262. DOI: 10.1364/OE.25.013252
- [49] SUN J, SAKIB M, DRISCOLL J, et al. A 128 Gb/s PAM4 Silicon Microring Modulator[C]//Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers. San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2018: 1–3. DOI:10.1364/ofc.2018.th4a.7
- [50] NISHI H, TSUCHIZAWA T, WATANABE T, et al. Monolithic Integration of a Silica-Based Arrayed Waveguide Grating Filter and Silicon Variable Optical Attenuators Based on P-i-n Carrier-Injection Structure[J]. *Applied Physics Express*, 2010, 3(10): 102203. DOI:10.1143/apex.3.102203
- [51] ZHENG S, RUAN Z S, GAO S Q, et al. Compact Tunable Electromagnetically Induced Transparency and Fano Resonance on Silicon Platform[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25655–25662. DOI:10.1364/oe.25.025655
- [52] DING Y H, PU M H, LIU, et al. Bandwidth and Wavelength-Tunable Optical Bandpass Filter Based on Silicon Microring-MZI Structure[J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6462–6470. DOI:10.1364/oe.19.006462
- [53] ZHOU N, ZHENG S, LONG Y, et al. Reconfigurable and Tunable Compact Comb Filter and (de)interleaver on Silicon Platform[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4358–4369. DOI:10.1364/oe.26.004358
- [54] HU X, LONG Y, JI M X, et al. Graphene-Silicon Microring Resonator Enhanced All-Optical up and down Wavelength Conversion of QPSK Signal[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7168–7177. DOI:10.1364/oe.24.007168
- [55] LONG Y, LIU J, HU X, et al. All-Optical Multi-Channel Wavelength Conversion of Nyquist 16 QAM Signal Using a Silicon Waveguide[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5475–5478. DOI:10.1364/ol.40.005475
- [56] ZHANG L, TAN X F, YANG M, et al. On-Chip Wavelength-Routed Photonic Networks with Comb Switches[C]//The 9th International Conference on Group IV Photonics (GFP). San Diego, USA: IEEE, 2012: 279–281. DOI:10.1109/group4.2012.6324159
- [57] CHENG Q X, DAI L Y, ABRAMS N C, et al. Ultralow-Crosstalk, Strictly Non-Blocking Microring-Based Optical Switch[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(2): 155–161. DOI:10.1364/prj.7.000155
- [58] CHENG Z, WANG J, YANG Z Y, et al. Sub-Wavelength Grating Assisted Mode Order Converter on the SOI Substrate[J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 34434–34441. DOI:10.1364/oe.27.034434
- [59] ZHENG S, CAO X P, KE Z W, et al. Experimental Demonstration of High-Order Modes Synthesis, Switch and Multicasting by Using Cascaded Y-Splitters on a Silicon Platform[C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC). Rome. IEEE, 2018: 1–3. DOI:10.1109/ecoc.2018.8535572
- [60] GUAN X W, DING Y H, FRANSEN L H. Ultra-Compact Broadband Higher Order-Mode Pass Filter Fabricated in a Silicon Waveguide for Multimode Photonics[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(16): 3893–3896. DOI:10.1364/ol.40.003893
- [61] YANG L, ZHOU T, JIA H, et al. General Architectures for On-Chip Optical Space and Mode Switching[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 180–187. DOI:10.1364/optica.5.000180
- [62] GUAN X W, CHEN P X, CHEN S T, et al. Low-loss Ultracompact Transverse-Magnetic-Pass Polarizer with a Silicon Subwavelength Grating Waveguide[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4514–4517. DOI:10.1364/ol.39.004514
- [63] XU H N, DAI D X, SHI Y C. Anisotropic Metamaterial-Assisted All-Silicon Polarizer with 415-nm Bandwidth[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(12): 1432–1439. DOI:10.1364/prj.7.001432
- [64] XIE A B, ZHOU L J, CHEN J P, et al. Efficient Silicon Polarization Rotator Based on Mode-Hybridization in a Double-Stair Waveguide[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 3960–3970. DOI:10.1364/oe.23.003960
- [65] SACHER W D, BARWICZ T, TAYLOR B J F, et al. Polarization Rotator-splitters in Standard Active Silicon Photonics Platforms[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 3777–3786. DOI:10.1364/oe.22.003777
- [66] DAI D X, WANG J, CHEN S T, et al. Monolithically Integrated 64-Channel Silicon Hybrid Demultiplexer Enabling Simultaneous Wavelength- And Mode-Division-Multiplexing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(3): 339–344. DOI:10.1002/lpor.201400446
- [67] TAN Y, WU H, WANG S P, et al. Silicon-Based Hybrid Demultiplexer for Wavelength- And Mode-Division Multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 1962–1965. DOI:10.1364/ol.43.001962
- [68] LUO L W, OPHIR N, CHEN C P, et al. WDM-Compatible Mode-Division Multiplexing on a Silicon Chip[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3069. DOI:10.1038/ncomms4069
- [69] DAI D X, WANG J, SHI Y C. Silicon Mode (de) Multiplexer Enabling High Capacity Photonic Networks-on-Chip with a Single-Wavelength-Carrier Light[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1422–1424. DOI:10.1364/ol.38.001422
- [70] CHEN H S, VAN UDEN R, OKONKWO C, et al. Compact Spatial Multiplexers for Mode Division Multiplexing[J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 31582–31594. DOI:10.1364/oe.22.031582
- [71] ZHOU N, ZHENG S, CAO X P, et al. Ultra-Compact Broadband Polarization Diversity Orbital Angular Momentum Generator with $3.6 \times 3.6 \mu\text{m}^2$ Footprint[J]. *Science Advances*, 2019, 5(5): eaau9593. DOI:10.1126/sciadv.aau9593
- [72] CHEN S T, SHI Y C, HE S L, et al. Compact Monolithically-Integrated Hybrid (de) multiplexer Based on Silicon-on-Insulator Nanowires for PDM-WDM Systems[J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 12840–12849. DOI:10.1364/oe.23.012840
- [73] GUI C C, GAO Y, ZHANG Z L, et al. On-Chip Silicon Two-Mode (De)Multiplexer for OFDM/OQAM Data Transmission Based on Grating-Assisted Coupler[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 1–7. DOI:10.1109/jphot.2015.2506339
- [74] ZHENG S, LONG Y, GAO D S, et al. Chip-Scale Reconfigurable Optical Full-Field Manipulation: Enabling a Compact Grooming Photonic Signal Processor[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(5): 1235–1245. DOI: 10.1021/acsp Photonics.0c00103
- [75] ZHANG Y, ZHU Q M, HE Y, et al. Silicon 1×2 Mode- And Polarization-Selective Switch[C]//Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2017. DOI:10.1364/ofc.2017.w4e.2
- [76] ZHANG Y, HE Y, ZHU Q M, et al. On-Chip Silicon Photonic 2×2 Mode- And Polarization-Selective Switch with Low Inter-Modal Crosstalk[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(5): 521–526. DOI:10.1364/prj.5.000521
- [77] WANG S P, FENG X L, GAO S M, et al. On-

- Chip Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer for Hybrid Wavelength/Mode-Division-Multiplexing Systems[J]. Optics Letters, 2017, 42(14): 2802-2805. DOI:10.1364/ol.42.002802
- [78] CAO X, ZHENG S, WANG J. Demonstration of on-Chip 1×4 Selective Switch with Simultaneous Mode-and Wavelength-Division-Multiplexing. 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), 99.
- [79] ZHUANG L M, ROELOFFZEN C G H, HOEKMAN M, et al. Programmable Photonic Signal Processor Chip for Radiofrequency Applications[J]. Optica, 2015, 2(10): 854-859. DOI:10.1364/optica.2.000854
- [80] PÉREZ D, GASULLA I, CRUDGINGTON L, et al. Multipurpose Silicon Photonics Signal Processor Core[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 636. DOI:10.1038/s41467-017-00714-1
- [81] CLEMENTS W R, HUMPHREYS P C, METCALF B J, et al. Optimal Design for Universal Multiport Interferometers[J]. Optica, 2016, 3(12): 1460-1465. DOI:10.1364/optica.3.001460
- [82] CAO X P, ZHENG S, LONG Y, et al. Mesh-Structure-Enabled Programmable Multi-Task Photonic Signal Processor on a Silicon Chip[J]. ACS Photonics, 2020, Just Accepted Manuscript. DOI: 10.1021/acsp Photonics.9b01230
- [83] PÉREZ D, GASULLA I, CAPMANY J. Field-Programmable Photonic Arrays[J]. Optics Express, 2018, 26(21): 27265-27278. DOI:10.1364/oe.26.027265
- [84] SHEN B, WANG P, POLSON R, et al. An Integrated-Nanophotonics Polarization Beam-splitter with $2.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$ Footprint[J]. Nature Photonics, 2015, 9(6): 378-382. DOI:10.1038/nphoton.2015.80
- [85] CHANG W J, LU L, REN X S, et al. Ultra-Compact Mode (de) Multiplexer Based on Subwavelength Asymmetric Y-Junction[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 8162-8170. DOI:10.1364/oe.26.008162
- [86] MA Y J, ZHANG Y, YANG S Y, et al. Ultralow Loss Single Layer Submicron Silicon Waveguide Crossing for SOI Optical Interconnect[J]. Optics Express, 2013, 21(24): 29374-29382. DOI:10.1364/oe.21.029374
- [87] TAHERSIMA M H, KOJIMA K, KOIKE-AKINO T, et al. Deep Neural Network Inverse Design of Integrated Photonic Power Splitters[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1368. DOI:10.1038/s41598-018-37952-2
- [88] PEURIFOY J, SHEN Y C, JING L, et al. Nano-Photonic Particle Simulation and Inverse Design Using Artificial Neural Networks[J]. Science Advances, 2018, 4(6): eaar4206. DOI:10.1126/sciadv.aar4206
- [89] GAO L, LI X Z, LIU D J, et al. A Bidirectional Deep Neural Network for Accurate Silicon Color Design[J]. Advanced Materials, 2019, 31(51): 1905467. DOI:10.1002/adma.201905467
- [90] LIU D J, TAN Y X, KHORAM E, et al. Training Deep Neural Networks for the Inverse Design of Nanophotonic Structures[J]. ACS Photonics, 2018, 5(4): 1365-1369. DOI:10.1021/acsp Photonics.7b01377
- [91] MA W, CHENG F, LIU Y M. Deep-Learning-Enabled On-Demand Design of Chiral Metamaterials[J]. ACS Nano, 2018, 12(6): 6326-6334. DOI:10.1021/acsnano.8b03569
- [92] ASANO T, NODA S. Iterative Optimization of Photonic Crystal Nanocavity Designs by Using Deep Neural Networks[J]. Nanophotonics, 2019, 8(12): 2243-2256. DOI:10.1515/nanoph-2019-0308
- [93] SHEN Y, HARRIS N C, SKIRLO S, et al. Deep Learning with Coherent Nanophotonic Circuits[J]. Nature Photonics, 2017, 11(7): 441. DOI:10.1038/nphoton.2017.93
- [94] ANNONI A, GUGLIELMI E, CARMINATI M, et al. Unscrambling Light—Automatically Undoing Strong Mixing between Modes[J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(12): e17110. DOI:10.1038/lsa.2017.110
- [95] CHENG Z G, RÍOS C, PERNICE W H P, et al. On-Chip Photonic Synapse[J]. Science Advances, 2017, 3(9): e1700160. DOI:10.1126/sciadv.1700160
- [96] FELDMANN J, YOUNGBLOOD N, WRIGHT C D, et al. All-Optical Spiking Neurosynaptic Networks with Self-Learning Capabilities[J]. Nature, 2019, 569(7755): 208-214. DOI:10.1038/s41586-019-1157-8
- [97] LIN X, RIVENSON Y, YARDIMCI N T, et al. All-Optical Machine Learning Using Diffractive Deep Neural Networks[J]. Science, 2018, 361(6406): 1004-1008. DOI:10.1126/science.aat8084
- [98] YAN T, WU J M, ZHOU T K, et al. Fourier-Space Diffractive Deep Neural Network[J]. Physical Review Letters, 2019, 123(2): 023901. DOI:10.1103/physrevlett.123.023901
- [99] TAIT A N, DE LIMA T F, ZHOU E, et al. Neuronomorphic Photonic Networks Using Silicon Photonic Weight Banks[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 7430. DOI:10.1038/s41598-017-07754-z

作者简介



王健, 华中科技大学教授、博导, 武汉光电国家研究中心光电子器件与集成研究部主任; 主要从事高速大容量光通信和光信号处理核心器件和关键技术应用基础研究, 包括光电子器件与集成、硅基光子学、光场调控、涡旋光、矢量光、结构光等; 主持国家重点研发计划项目、“973”计划课题、国家自然科学基金等 10 余个项目; 以第一完成人于 2015 和 2019 年两次获得教育部自然科学奖一等奖, 入选国家优秀青年科学基金、长江学者奖励计划青年学者、国家万人计划青年拔尖人才、英国皇家学会牛顿高级学者、教育部新世纪优秀人才、楚天学者特聘教授; 发表 SCI 论文 210 余篇 (多篇入选 ESI 高被引和热点论文, 引用 6 200 余次, 《Nature》《Science》及子刊引用 90 余次, 特邀综述 19 篇), 作特邀报告 90 余次, 获授权发明专利 16 项。



郑爽, 华中科技大学武汉光电国家研究中心在读博士研究生; 主要从事基于光子集成器件的光场维度调控和关键技术应用基础研究等; 参与国家重点研发计划项目、“973”计划课题、国家自然科学基金等多个项目; 发表 SCI 论文 11 余篇, 发表会议论文 10 余篇。



曹晓平, 华中科技大学武汉光电国家研究中心在读博士研究生; 主要从事用于多维光场调控的光子集成器件和关键技术应用基础研究; 作为核心人员参与国家重点研发计划项目、“973”计划课题、国家自然科学基金等多个项目; 目前已发表多篇 SCI 论文。