

片上集成多维光互连和光处理

王健^{*}, 曹晓平, 张新亮^{**}

华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074

摘要 随着云计算和数据中心的高速发展,片上集成光互连和光处理凭借在集成度、速度、带宽及功耗等方面的独特优势,成为突破传统电子瓶颈的关键技术。同时,光子具有频率、偏振、时间、复振幅及空间结构等多个物理维度,可发展为多维混合复用技术,进一步提升光互连和光处理的带宽。结合光场多个物理维度资源,分别对片上集成多维光互连和光处理的关键技术进行了回顾,并对其未来发展趋势进行总结和展望。

关键词 光电子学; 光子集成; 物理维度; 多维复用; 光互连; 光处理

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1206001

1 引言

在过去的半个多世纪里,以互补金属氧化物半导体(CMOS)技术为支撑的集成电路(IC)发展迅速,推动着现代信息技术的不断进步。随着晶体管特征尺寸的不断减小,半导体制造水平逐渐接近物理工艺水平的极限,导致集成度的提高变得缓慢甚至停滞,而且系统性能也开始受到严重的制约,主要体现在电互连网络不可逾越的电子瓶颈^[1-3]。互连电信号传输时受到电阻、寄生电容及感生电感等的干扰,不仅会引起时间延迟,更严重影响高频信号的传输性能,限制了电互连带宽的提升;同时传输的电信号也容易受到相邻电磁线或者外部电磁场的电磁干扰,造成传输信号质量劣化。除此之外,随着微处理器数目的增加和计算速度的提升,寄生效应引起的功耗及热耗散也逐渐成为不可忽视的限制因素^[4]。为突破后摩尔时代传统 IC 技术的瓶颈,推动现代通信网络的发展,适应现代日益增长的运算需求,光互连以独特的性能优势走入人们的视野,成为取代传统电互连的重要技术手段^[5-6]。相对于电信号,以光作为载波进行信号传输具有无可比拟的优势,主要体现在传输带宽大、传输损耗小、抗干扰能力强、可高速无串扰并行传输等方面,因此利用光进行互连通信无疑将成为未来高速通

信的主流发展方向^[7]。光互连广义上指的是利用光载波连接信源和信宿,尽管光纤通信技术在过去几十年内获得了飞速的发展,已成为现代长距离高速大容量通信网络的重要支柱,然而在数据中心及片上等短距离数据互连方面,光互连技术仍然存在诸多技术难点,如何发展片上光互连以突破传统电互连的瓶颈也是目前的研究热点之一。同时,在目前光通信网络的交换节点处,光-电-光的信号处理仍然面临着电子瓶颈的限制,因此片上光互连和光处理技术对于现代高速大容量通信网络的发展具有重要意义。

实现片上光互连和光处理的核心是光电子集成芯片,其由集成在同一块衬底上的多种不同功能的有源和无源器件构成,通过光波导进行互连通信,进而实现具有特定功能的片上光学互连处理系统。光子集成技术近年来获得了快速的发展,目前主流的材料平台有 III-V 族化合物和硅基材料等^[8]。其中,磷化铟(InP)等 III-V 族材料的主要优势是其为直接带隙材料,可用于制作半导体激光器、调制器及探测器等关键有源器件,但非标准化的复杂制备工艺既导致制作成本较高,又限制了其真正走向商业化。相比之下,硅材料的优势则是自然界储量大、成本低廉、在近红外波段乃至中红外波段都几乎透明、材料损耗极低,硅绝缘体(SOI)波导较大的相对折

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-03-02; 录用日期: 2021-04-13

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2203604)

*E-mail: jwang@hust.edu.cn; **E-mail: xlzhang@hust.edu.cn

射率差也更利于器件的高密度集成,更为重要的是,硅材料与现有成熟的电学 CMOS 工艺相兼容,这无疑为硅基光电子技术的发展起到重要的支撑作用^[9-11]。鉴于硅材料是一种间接带隙材料,无法制作高效率的光源,因此单一材料体系上的单片集成仍面临较大的挑战,目前主流的发展方向仍是混合集成技术,即通过键合等方式将独立制作的分立有源器件(如激光器、探测器等)集成到硅基无源芯片上,从而实现低成本、高性能的混合光子集成芯片^[12-13]。

尽管片上光互连和光处理已经成为未来高速通信的重要发展趋势,面对大数据时代日益增长的容量需求,如何提升系统通信容量仍然是一个亟需解决的问题。值得注意的是,光子具有频率/波长、偏振、时间、复振幅、空间结构等多个物理资源维度,可以发展为多种复用技术,这为超大容量的光通信和光互连的实现提供了可能^[14-15]。传统的光通信与光互连主要聚焦在波长维度,利用多个波长进行复用实现并行传输,波分复用(WDM)技术在过去几十年间发展迅速,极大地提升了通信系统的传输容量。随着通信容量需求的持续增大,波长维度资源的开发利用已经接近极限,传统波分复用技术也面临越来越大的挑

战。光子其他多维度的开发利用也日趋成熟,如时分复用(TDM)技术、偏振复用(PDM)技术及先进高级调制格式技术等,成为光通信发展变革中的里程碑式技术^[16-20]。因此,片上光互连与光处理的发展离不开多维复用技术,特别地,结合多种复用方式可以实现多维混合复用技术,从而进一步提高信号通道数目,增大片上光互连和光处理系统的容量。

图 1 展示了片上集成多维光互连和光处理的特点及主要内容。高集成度、小型尺寸、高可靠性、高速率、低损耗是片上集成多维光互连和光处理的主要特征,同时其涉及光子频率、偏振、时间、复振幅和空间等物理维度及多维度融合。光互连的主要内容包括多维光信号的片上数据传输、光信号的片上多维复用互连、光互连的核心集成器件、光互连的异构波导耦合、光互连的光子集成芯片/光模块等;光处理的主要内容包片上波长处理(波长转换、光学频率梳)、片上模式处理、片上偏振处理、片上光逻辑和光计算、片上可重构光处理、片上智能光处理等。

本文将重点回顾片上集成多维光互连和光处理的关键技术和主要研究进展,同时展望其未来的发展趋势和方向。

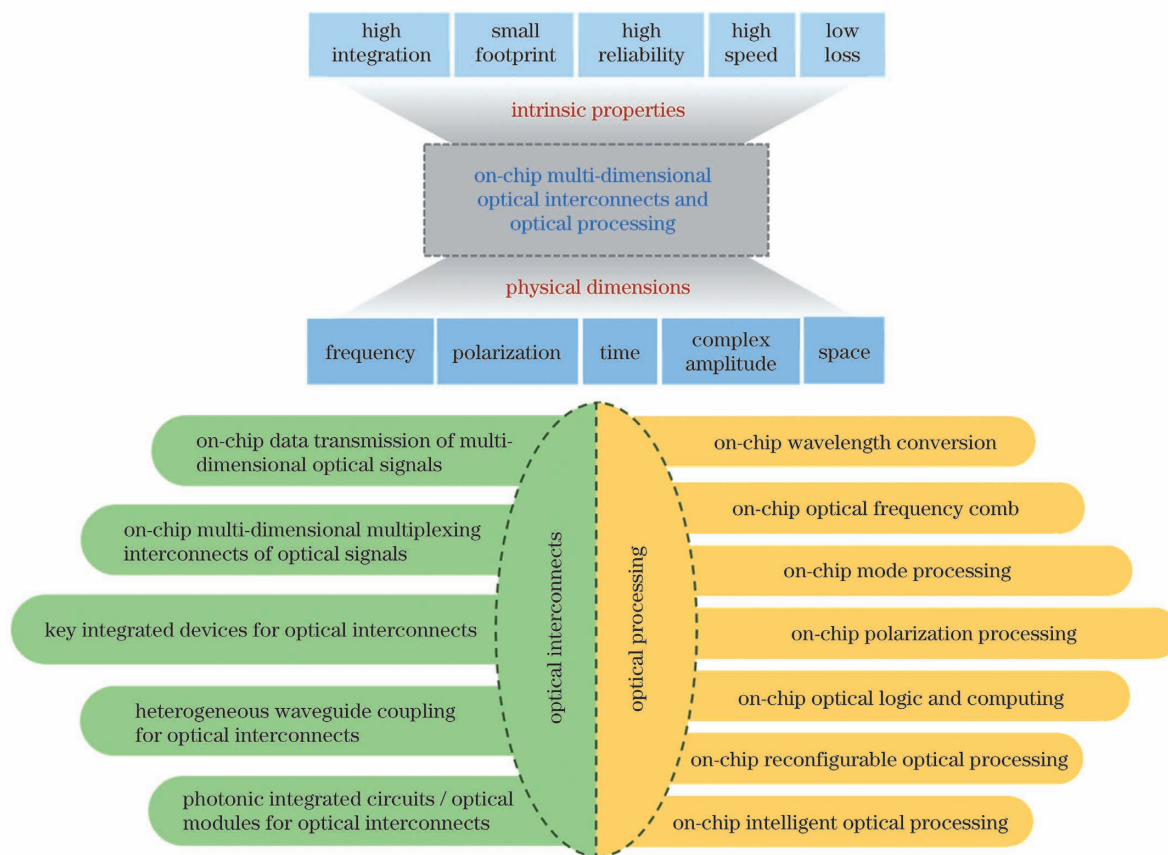


图 1 片上集成多维光互连和光处理的特点及主要内容

Fig. 1 Characteristics and main contents of on-chip integrated multi-dimensional optical interconnects and optical processing

2 片上集成多维光互连

2.1 多维光信号的片上数据传输

众所周知,先进的高级调制格式和多维复用技术等已广泛用于传统光纤通信系统中,有效提升了通信系统的传输容量和频谱效率^[16,20]。基于光子集成芯片的光信号传输互连同样具有大带宽、低延迟、低损耗、低功耗和抗电磁干扰等固有优势,携带

先进高级调制格式信息的多维光信号的高速片上数据传输具有重要研究价值,可以满足未来芯片级光互连的高速大容量的需求。如图 2 所示,通过几种不同种类的集成光波导,研究其结合先进高级调制格式进行高速数据传输的能力,充分展示片上集成多维光互连的潜力。

图 2(a)研究了硅基条形波导构成的微环谐振器中基于偏移正交幅度调制(OQAM)的正交频分

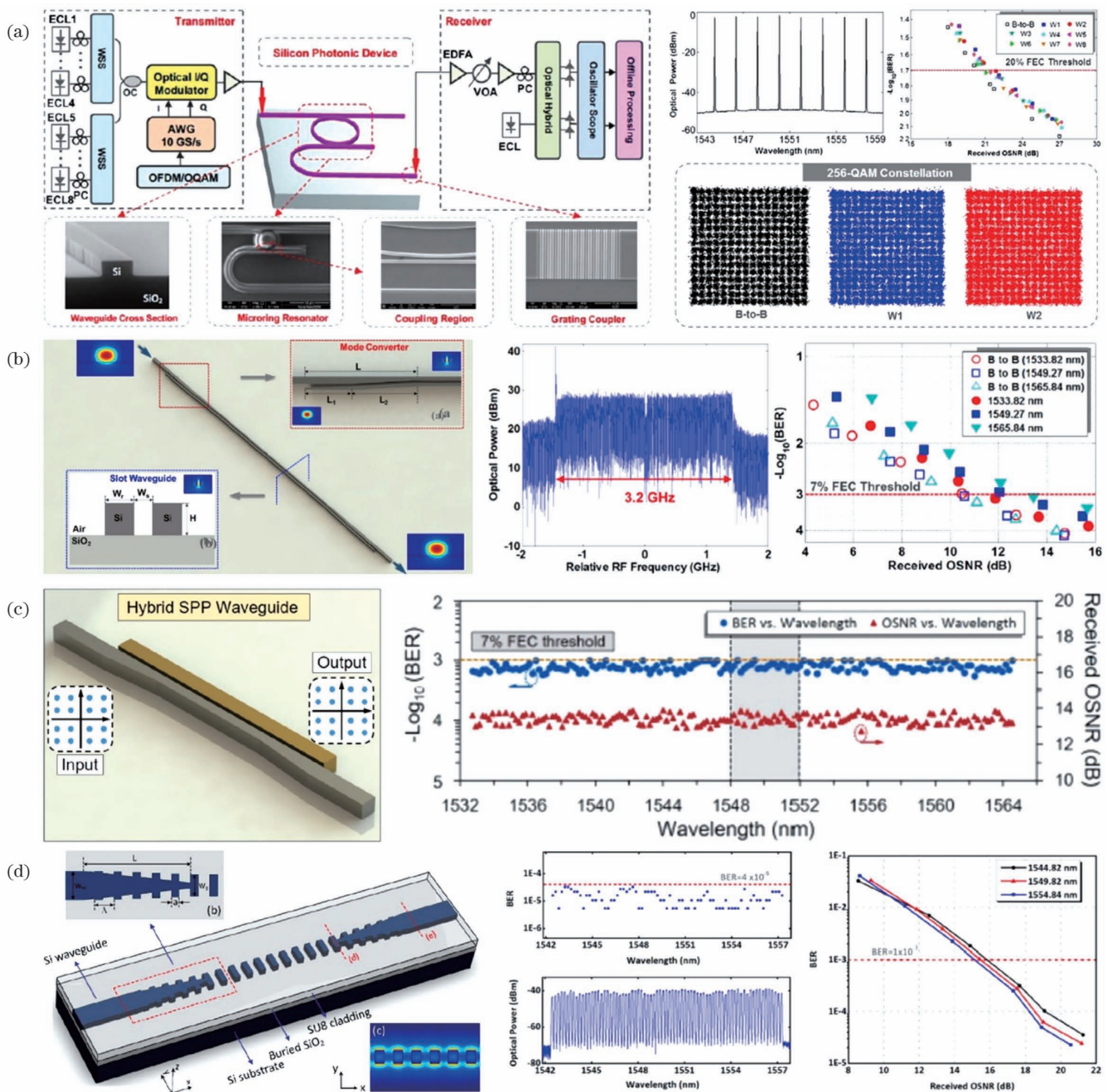


图 2 不同类型的集成光波导实现多维光信号的片上数据传输。(a)条形波导微环谐振器^[21]; (b)狭缝光波导^[22]; (c)混合表面等离子体狭缝光波导^[23]; (d)亚波长光栅波导^[24]

Fig. 2 On-chip data transmission of multi-dimensional optical signals based on different types of integrated optical waveguides. (a) Strip waveguide microring resonator^[21]; (b) slot waveguide^[22]; (c) hybrid surface plasmon polariton (SPP) slot waveguide^[23]; (d) sub-wavelength grating (SWG) waveguide^[24]

复用(OFDM)信号的传输性能^[21]。在发射端,8 个外腔激光器(ECL)分别与 8 个偏振控制器(PC)相连,然后通过波长选择开关(WSS)耦合在一起,送入光调制器用于调制 8 个载波产生 OFDM/OQAM 光信号;光信号经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后耦合进硅基微环谐振器,实现片上数据传输,经过传输后耦合输出光被另一个 EDFA 放大,由相干接收器检测。在实验中,研究了不同高级调制格式信号经过硅基微环传输后的传输性能,对于 512-QAM 信号,在 20%前向纠错编码(FEC)门限处,即比特误码率(BER)为 2×10^{-2} 时,光信噪比(OSNR)代价是 3.3 dB。此外,同时传输 8 个波长信道时,BER 为 2×10^{-2} 处的 OSNR 代价小于 2 dB,这验证了片上多波长信道结合先进高级调制格式信号进行多维传输的可行性。图 2(b)研究了结合 WDM 的 OFDM 16-QAM 信号在硅基垂直狭缝光波导中传输的性能^[22]。对于硅基垂直狭缝光波导结构,光场被很好地限制在中间尺寸很小的空气狭缝区域,因此相比硅基条形波导结构,其呈现出相对较小的非线性,因而适合于高性能片上数据传输。在实验中,基于 2 mm 长的硅基垂直狭缝光波导,利用 161 个 WDM 信道,每个信道携带 11.2 Gbit/s OFDM 16-QAM 信号,从而实现了 1.8 Tbit/s 多维光信号的片上数据传输。实验测得所有 161 个 WDM 通道的 BER 都小于 1×10^{-3} (7% FEC 门限),所需的 OSNR 低于 15 dB。通过选择三个典型波长,测得在 BER 为 1×10^{-3} 时,其 OSNR 代价小于 2 dB。图 2(c)给出了另一种狭缝光波导的片上数据传输结果^[23],即垂直混合表面等离子(SPP)狭缝光波导,与纯介质狭缝光波导相比,其提供了更强的光场约束,非线性也更小,因此同样有利于片上高速大容量数据传输。在实验中,通过对 161 个波长信道加载 11.2 Gbit/s OFDM 16-QAM 信号,演示了总容量为 1.8 Tbit/s 的数据传输,所有波长信道的 BER 都小于 1×10^{-3} ,所需的 OSNR 也都低于 15 dB。对于单个波长信道,在 BER 为 1×10^{-3} 时,10 μm 和 20 μm 长度的混合 SPP 狭缝光波导的 OSNR 代价分别为 0.9 dB 和 3.4 dB。图 2(d)所示的亚波长光栅(SWG)波导也适合于片上数据传输,其波导传输损耗可以与传统硅基条形波导相当,同时其硅波导区域光限制减少(对应 SWG 周期结构空气区域光限制增加),这有利于降低非线性^[24]。在实验中,利用 75 个 WDM 信道组成 2.86 Tbit/s 多维光信号,其中每个信道携带 38.12 Gbit/s OFDM 16-

QAM 信号,验证了 SWG 波导高速大容量的片上数据传输能力。实验测得 BER 为 1×10^{-3} 时所需的 OSNR 约为 15.5 dB,同时与硅基条形光波导相比,SWG 波导的最佳发射功率增加了 8 dB,具有更高的非线性损伤容忍度。

2.2 光信号的片上多维复用互连

对于片上多维光互连而言,集成复用解复用器是实现多信道并行复用传输的关键器件。针对光信号的频率/波长、偏振、模式等物理维度,可分别发展片上 WDM、PDM 及模分复用(MDM)技术,以提高片上光互连的传输容量。目前,针对单一物理维度光信号的复用解复用器件已经较为成熟^[25-36]。值得注意的是,多种复用方式的综合运用可以实现多维混合复用。通过多波长、双偏振、多模式的多维复用,可以进一步提高片上光互连系统的通道数目和传输容量,这也是片上光互连的必然发展趋势^[37-44]。

图 3 给出了几种片上多维混合复用解复用器件。图 3(a)是一种偏振-模式的混合复用器件^[40,32],利用偏振旋转器(PR)可以实现 TE 偏振到 TM 偏振的转换,得到不同偏振的基模后,通过级联的非对称定向耦合器(ADC)结构可以实现双偏振高阶模式的复用。图 3(b)是一种由 PR、偏振分束器(PBS)、阵列波导光栅(AWG)构成的偏振-波长混合复用器^[41]。AWG 利用多光束干涉原理,可以实现多个波长的复用解复用,且具有波长通道间隔小、通道均匀性好等优点,在多通道密集波分复用中发挥着重要的作用。值得注意的是,AWG 通常具有偏振相关性,不过可以利用 PBS 以及 PR 等偏振调控器件将不同偏振转换成相同偏振,然后分别输入到双向型 AWG 的两个输入波导进行多波长复用,从而使其兼容不同偏振进行多维混合复用。同时,AWG 的偏振相关性可以通过刻蚀应力释放槽或者利用掺杂方式提高二氧化硅包层热膨胀系数的方式,消除或减小波导的双折射,进而有效减低 AWG 的偏振相关损耗^[42-43]。同理,片上模式-波长混合复用器同样可以利用模式复用器与 AWG 的级联来实现,图 3(c)介绍了另一种实现模式-波长混合复用的方案^[44],其中波长复用利用微环谐振器(MRR)的波长选择性来实现,在 MRR 的弯曲波导与直波导的耦合位置处同时采用 ADC 结构来实现基模到高阶模的转换,通过级联来实现多波长和多模式的混合复用。图 3(d)(e)给出了同时兼容波长、偏振、模式多个维度的片上多维选择性光交换^[45-46],首先通过模式解复用器和偏振调控器实现

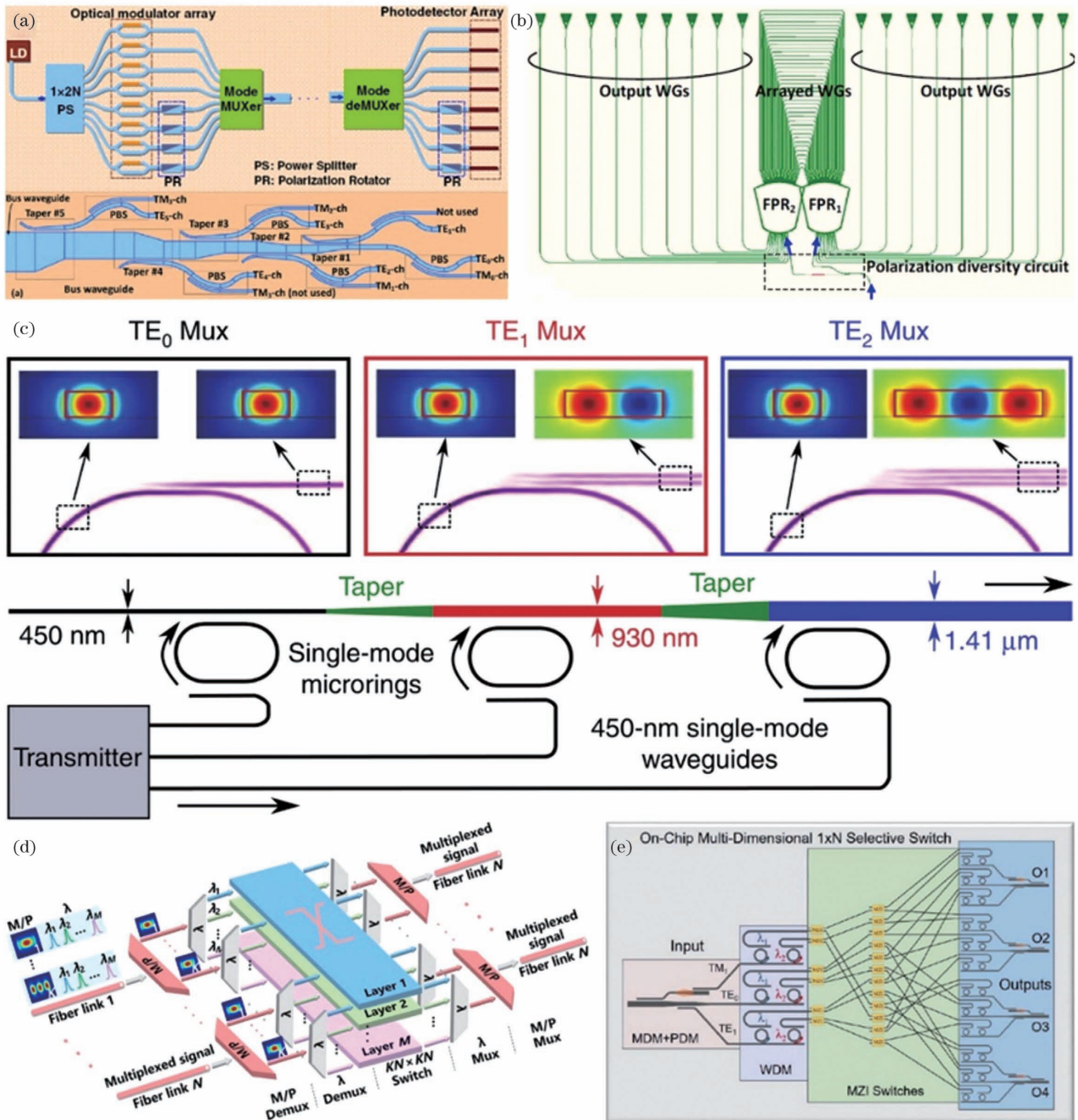


图 3 光信号的片上多维复用互连。(a)偏振-模式混合复用^[40,32]；(b)偏振-波长混合复用^[41]；(c)模式-波长混合复用^[44]；(d)(e)波长-偏振-模式混合复用^[45-46]

Fig. 3 On-chip multi-dimensional multiplexing interconnects of optical signals. (a) Polarization-mode hybrid multiplexing^[40,32]；(b) polarization-wavelength hybrid multiplexing^[41]；(c) mode-wavelength hybrid multiplexing^[44]；(d)(e) wavelength-polarization-mode hybrid multiplexing^[45-46]

片上多维信号模式和偏振的解复用，然后通过波长解复用器实现波长的解复用，之后对多维解复用后的多个信道进行选择性地光交换，最后再依次经过波长、偏振和模式复用器完成多维复用输出。

2.3 光互连的核心集成器件

激光器、调制器和探测器是光通信和光互连系统的核心集成器件，可以为集成光收发模块提供重

要支撑。图 4 对目前光通信和光互连系统中的一些新型激光器、调制器和探测器进行了简要介绍。

硅基光源的单片集成一直是一个很大的挑战，由于 III-V 族半导体的直接带隙结构，基于 III-V 族材料的激光器至今仍占据主流地位，具有结构紧凑、性能稳定、封装方便等优点，是实现低成本、高性能光互连系统的有效可行的方案。面发射激光器是实

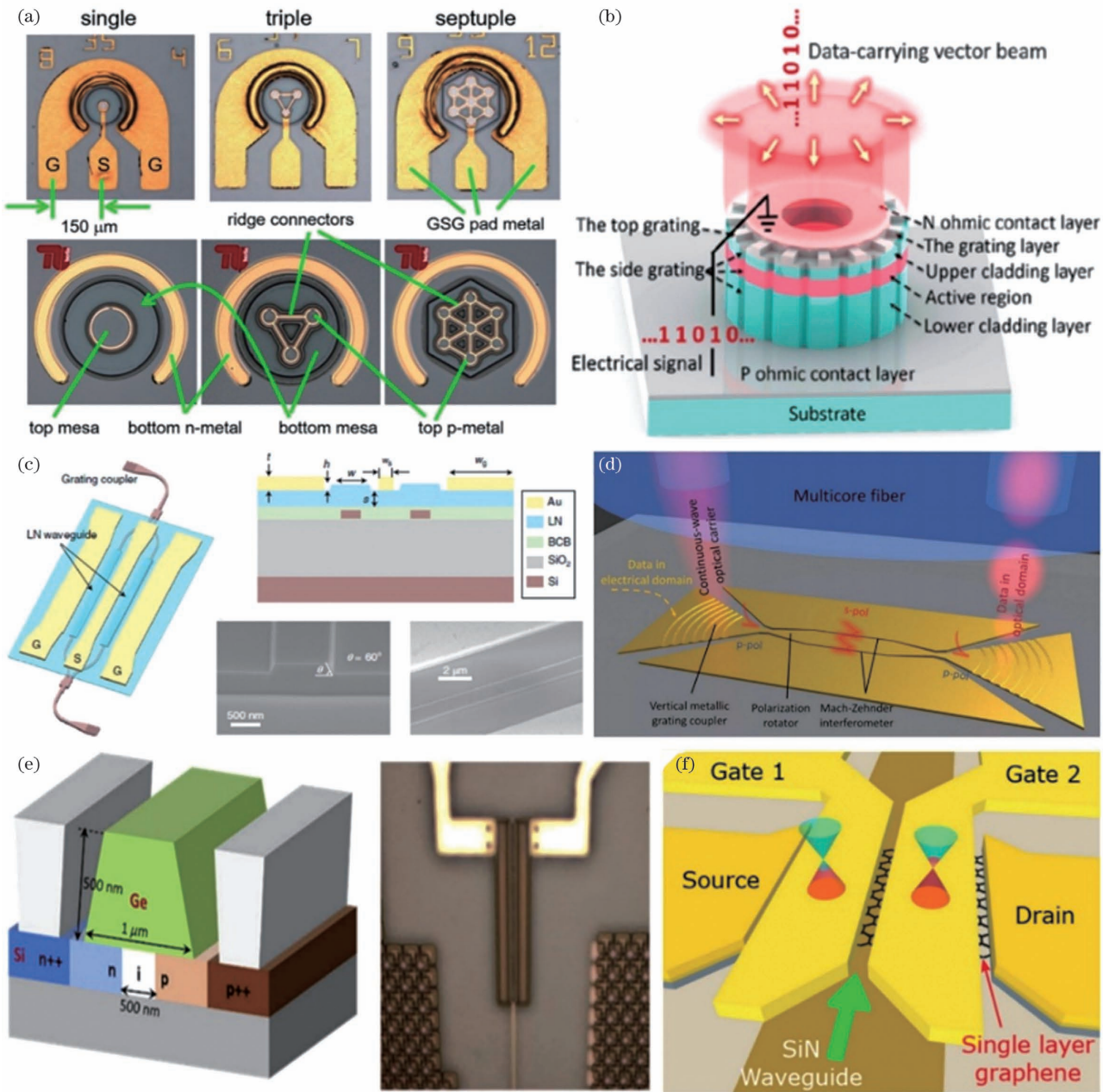


图 4 光互连的核心集成器件。(a)垂直腔面发射激光器阵列^[47]；(b)高速直调集成矢量激光器^[48]；(c)薄膜铌酸锂调制器^[49]；(d)等离子体调制器^[50]；(e)硅锗雪崩光电探测器^[51]；(f)石墨烯光电探测器^[52]

Fig. 4 Key integrated devices of optical interconnects. (a) VCSEL array^[47] ; (b) high-speed direct modulation integrated vector laser^[48] ; (c) thin-film lithium niobate modulator^[49] ; (d) plasmonic modulator^[50] ; (e) Si-Ge avalanche photodetector (APD)^[51] ; (f) graphene photodetector^[52]

现光互连系统的理想光源,其出光光斑发散角小,可利用硅基波导光栅将激光耦合到硅光子芯片中,且更容易实现阵列以提高光发射功率,有利于片上集成。图 4(a)给出了一种单个垂直腔面发射激光器(VCSEL)及其构成的三路和七路激光器阵列^[47],与发射面积相当的单个 VCSEL 相比,通过高达 40 Gbit/s 的无误码数据传输,证明 VCSEL 阵列可以在较低的偏置电流密度下实现较高速率的无误码

数据传输,同时具有较高的光输出功率,充分显示了其在未来光互连系统方面的应用潜力。图 4(b)给出了一种基于 III-V 族半导体平台的电泵浦高速直调集成矢量激光器^[48],其通过使用侧面和顶部两套光栅结构结合离子注入实现了单纵模高效矢量模式激光,具有高差分增益的多量子阱结构和小有源区,利于实现高速直调。面发射有利于二维阵列集成,所研制的集成矢量激光器输出光功率大于 1 mW,

边模抑制比(SMSR)约 50 dB。值得注意的是,矢量模式利用了光子空间偏振维度,也为光通信和光互连系统容量的提升提供了新物理维度选择,在实验中,实现了 8~20 Gbit/s 的高速直调矢量模式激励,同时利用 10 Gbit/s 高速直调集成矢量激光器激发光纤矢量本征模,从而实现了 2 km 长的光纤本征模数据传输。图 4(c)基于硅和薄膜铌酸锂混集成平台,实现了一种具有大电光带宽、高调制效率、低片内插入损耗和高线性度的光调制器^[49],调制速率高达 112 Gbit/s。基于硅材料的光调制主要依赖自由载流子的等离子体色散效应,本质上是吸收的和非线性的,这降低了光调制幅度,并且在使用高级调制格式时可能会导致信号失真。相比之下,薄膜铌酸锂调制器具有低驱动电压和超宽电光带宽,在产生高波特率多电平信号、长距离光通信方面显示出优越性。图 4(d)给出了一种利用 Pockels 效应实现的 116 Gbit/s 调制速率的全金属等离子体激元电光调制器^[50],其在玻璃层上的紧凑金属结构中完成垂直光栅耦合、偏振旋转和分束调制干涉,具有结构紧凑、制造简单及调制速率高的优点,为突破电子速率瓶颈和光子临界尺寸限制提供了一条可能的途径。图 4(e)给出了一种集成的锗硅雪崩光电探测器(APD)^[51],在 16 倍雪崩增益和 33 GHz 带宽下,最大响应度为 15.2 A/W。与传统锗硅光电探测器相比,APD 中光载流子引发的碰撞电离会产生内部增益,可以提供更高的响应度和受热噪声限制的灵敏度,从而允许光芯片具有更低的光功率,降低甚至抑制了跨阻增益。除此之外,石墨烯等二维材料也以优越的光电特性,成为集成光子学有潜力的候选材料,可用于高效率光调制和光探测。图 4(f)给出了一种微米级片上集成的等离子体增强石墨烯光电探测器(GPD)^[52],其利用间隙中的光场增强和等离子体约束,增强了 PN 结区中光与石墨烯的相互作用和光吸收,具有高响应度、高速率、无偏置及可直接输出光电压等优点。

2.4 光互连的异构波导耦合

光学耦合技术,特别是异构波导耦合技术,也是构成光互连系统的一个重要技术,其主要目的是提供一个光学连接的接口,可以通过与光纤耦合连接而兼容外部光纤通信网络,充分发挥光互连芯片的应用潜力;同时片上光学耦合技术同样可以用于光子芯片与光子芯片之间的互连,从而构建异构集成的片上光互连系统。光子芯片与光纤的耦合连接是光学耦合最主要的一个方面,主要的挑战在于光纤

和光子波导模式分布之间存在的大尺寸失配,而常见的光纤-光子芯片接口可以分为垂直耦合和端面耦合两类。图 5 给出了几种典型的基于垂直耦合方案的光学耦合接口。最流行的方案是图 5(a)所示的垂直耦合衍射光栅结构^[53],其通过沿一个或多个维度定义的周期性图案来改变波导折射率,从而允许从光纤以接近垂直方向入射到光栅结构上的光学模式与水平面内片上集成波导的光学模式之间的相位匹配。这种垂直耦合光栅通常可以大批量制造,与封装工艺更加兼容,可以放置在晶片上的任意位置,且具有相对宽松的公差,然而这种结构本质上是偏振和波长敏感的,需要通过进一步设计和优化来减小这些限制。另一方面,基于光栅的垂直耦合技术通常依赖于 10°左右角度的定向光纤或光纤块,这种非平面的耦合设计会导致芯片表面堵塞,增大芯片封装的整体尺寸。为保持耦合的平面轮廓,可以使用平面封装的标准圆柱形光纤^[54],如图 5(b)所示,以一定角度对光纤端面进行抛光,从而将光从光纤纤芯反射到光栅耦合器中,而光经过光纤端面反射出去的角度即为耦合所需要的最佳输入角度。另一种相似的方案如图 5(c)所示,利用微球透镜、微棱镜等光学元件,对从水平方向入射的光进行折叠和聚焦,完成与片上光栅耦合器的自对准^[55]。

另一种基于端面耦合方案的光学耦合接口如图 6 所示,其中光束从侧面耦合进/出波导,能够提供大带宽、偏振无关的光耦合。为实现光纤到芯片波导的模式尺寸匹配,一种典型的端面耦合器^[56],包括横向倒锥形波导、覆盖在波导上方的较低折射率材料构成的二维光斑尺寸转换器(SSC),如图 6(a)所示。其中随着倒锥形波导尺寸沿光传播方向逐渐减小,导模受到的限制越来越少,有效截面增大,有效折射率减小;SSC 的折射率介于标准单模光纤与集成波导之间,可以提供更佳的折射率匹配条件,通过将波导模式的有效模场尺寸增加到接近 SSC 的 $3\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$,可以与单模透镜光纤形成良好的模式重叠,实现低损耗的耦合。集成波导上 SSC 的引入通常需要额外的制造工艺,另一种类似的方案^[57]是在标准光纤和集成光波导之间建立一个柔性聚合物接口,如图 6(b)所示。其中,标准光纤对接耦合到模式匹配的聚合物波导,而聚合物波导的横截面先从光纤耦合器绝热地转变为用于布线的具有更高限制的波导,然后绝热地耦合到光子芯片上的集成光波导,从而在低成本制造和组装的约束下实现高光学耦合性能。另一方面,对于在不同

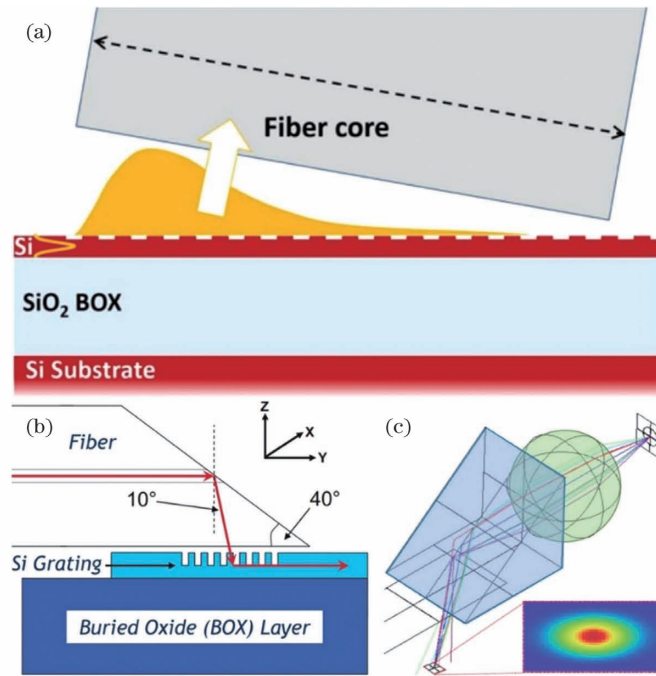


图 5 基于垂直耦合的光学耦合接口。(a)垂直耦合衍射光栅结构^[53]；(b)基于角度抛光光纤的垂直耦合^[54]；(c)基于微纳光学元件的垂直耦合^[55]

Fig. 5 Optical coupling interfaces based on vertical coupling. (a) Vertically coupled diffractive grating structure^[53] ; (b) vertical coupling based on angle polished fiber^[54] ; (c) vertical coupling based on micro-nano optical components^[55]

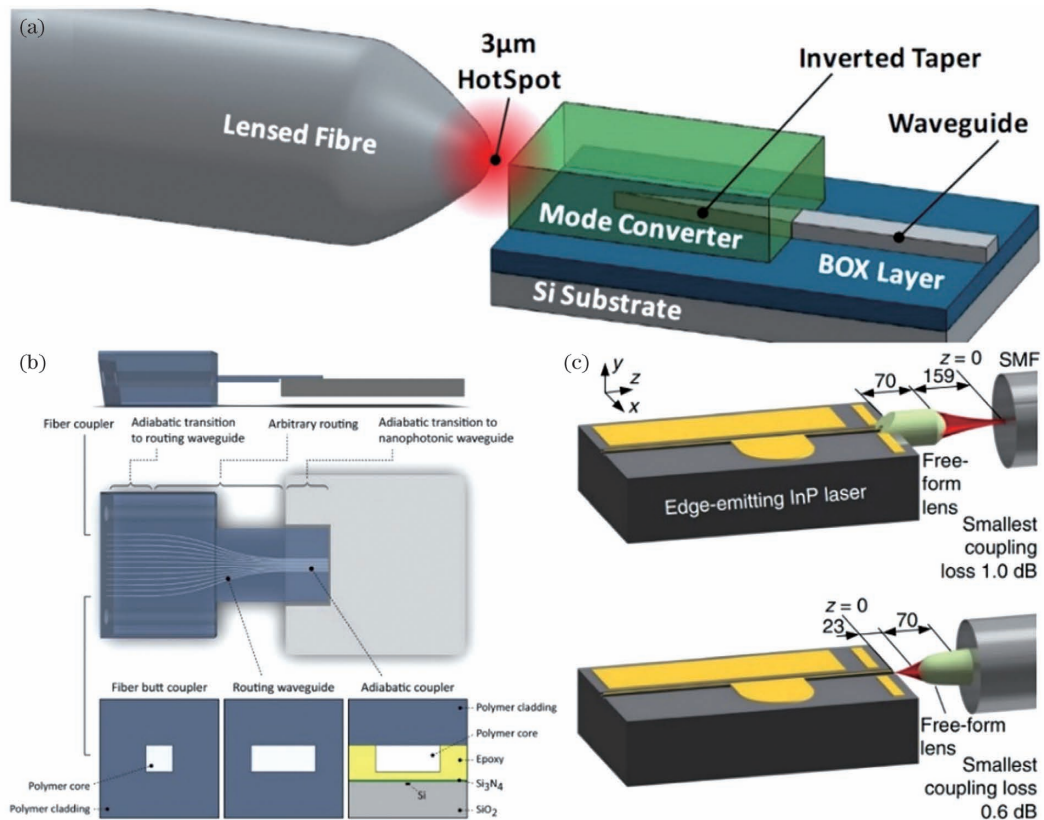


图 6 基于端面耦合的光学耦合接口。(a)端面耦合结构^[56]；(b)基于集成聚合物波导的端面耦合^[57]；(c)基于原位 3D 打印光学元件的端面耦合^[58]

Fig. 6 Optical coupling interfaces based on end coupling. (a) End coupling structure^[56] ; (b) end coupling based on integrated polymer waveguide^[57] ; (c) end coupling based on *in situ* 3D nano-printed optical elements^[58]

材料平台上实现的光纤到芯片和芯片到芯片的接口,耦合时通常需要应对不同的模式分布和发射方向,因此需要精细调整以实现高效耦合。图 6(c)利用直写双光子激光光刻技术,在光纤和芯片的接口处制造具有任意三维几何形状的波束成形元件,该元件不仅可以允许具有不同模式分布的耦合匹配,而且还可以放松对准公差实现简单低成本的封装^[58]。

图 7 介绍了另外一种利用直写双光子激光光刻实现的光子引线键合(PWB)技术,该技术利用具有

三维自由几何形状的聚合物波导来桥接位于不同芯片上的集成光子电路之间的间隙。如图 7(a)所示,在大数值孔径脉冲激光束的聚焦下,通过负性光致抗蚀剂的双光子聚合(TPP)原位制造引线键合,实现直接连接到片上光子电路的独立单模聚合物波导^[59]。值得注意的是,如图 7(b)所示,光子引线键合技术可以同时允许垂直和边缘耦合,从而提供一种在光互连集成芯片中使用不同波导技术及耦合接口进行耦合连接的灵活方法^[60]。

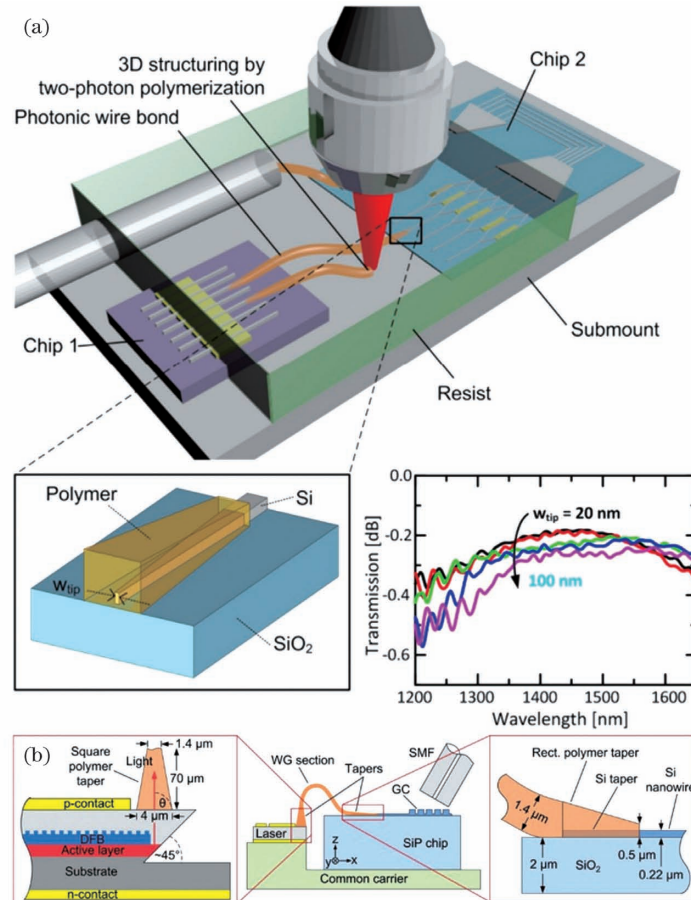


图 7 光子引线键合(PWB)技术。(a)基于 PWB 技术的光子多芯片系统^[59]; (b)基于 PWB 技术实现的垂直发射激光器与端面耦合波导的连接^[60]

Fig. 7 Photonic wire bonding (PWB) technology. (a) Photonic multi-chip system based on PWB technology^[59]; (b) connection between vertical emitting laser and end-coupling waveguide based on PWB technology^[60]

2.5 光互连的光子集成芯片/光模块

基于前面介绍的满足片上集成多维光互连要求的各种光学技术以及激光器、调制器、探测器、多维复用解复用器等核心器件,光互连光子集成芯片和光模块已经逐步走向实际应用。片上集成的光收发芯片和光模块不仅在短距离数据中心光互连中扮演着重要的角色,在长距离相干通信系统中也发挥着重要的作用^[61-67]。

图 8 给出了几种用于光互连的光收发芯片和光

模块。图 8(a)为混合集成硅光子发射模块,包括由 8 个激光器组成的阵列,将该阵列连接到由 8 个马赫-曾德尔调制器(MZM)组成的阵列,最后耦合到 8 通道平行单模光纤(SMF)阵列^[65]。为解决光源等集成器件的集成封装问题,采用多芯片模块(MCM),利用 PWB 方法将 InP 激光器阵列、硅光调制器阵列、单模光纤阵列连接组合在单个芯片级封装中。在实验中,利用四电平脉冲幅度调制格式(PAM-4),每个通道携带 56 Gbit/s 信号,实现了高

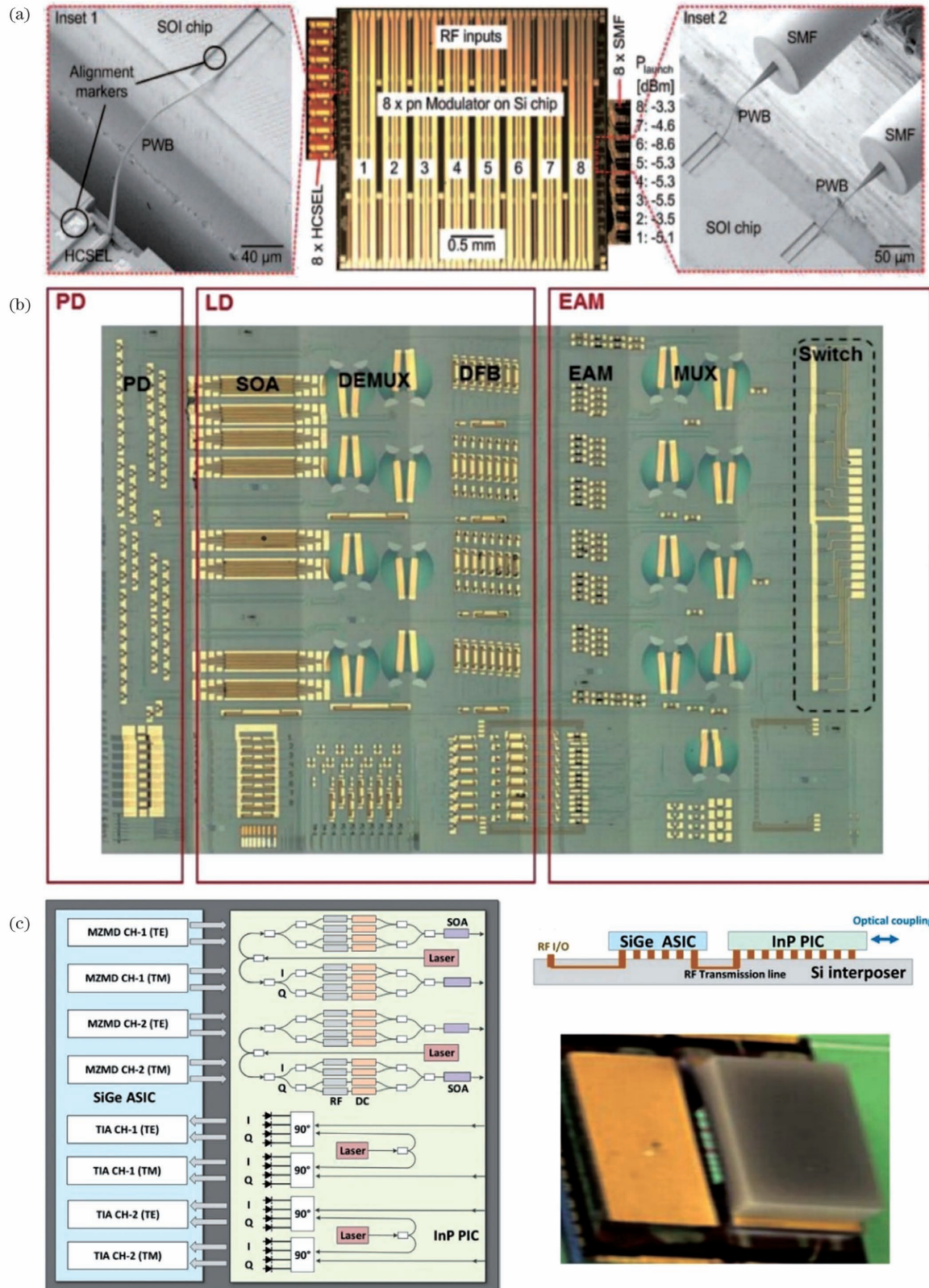


图 8 用于光互连的片上光子集成芯片/光模块。(a)混合集成硅光子发射模块^[65]；(b)全集成光收发网络^[66]；(c)双通道相干光收发器^[67]

Fig. 8 On-chip photonic integrated circuits and optical modules for optical interconnects. (a) Hybrid integrated silicon photonic transmitter^[65]；(b) fully-integrated optical transceiver network^[66]；(c) coherent two-channel transceiver^[67]

达 448 Gbit/s 的总体线路速率和长达 10 km 的传输距离。图 8(b)则采用异质集成的方式,在硅衬底上构建了一个完全集成的光收发网络^[66],其中具有 8 个波长通道的波分复用解复用器单片集成在硅片上,而片上激光器、调制器和光电探测器则是通过晶片键合技术将 III-V 族材料预先转移到硅衬底上实现的,从而在大硅片上形成一个个小的 III-V 族芯片,进而构建一个异质集成的光网络,总传输容量高达 $8 \times 8 \times 40$ Gbit/s,带宽密度超过 $2 \text{ Tbit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$,同时保证了片上高速光互连系统较高的设计灵活性和可扩展性。图 8(c)是一种 InP 基双通道相干光收发器,将其两个完整发射机和接收机通道的所有必要功能集成到一个光子集成芯片上,包括高性能输入/输出调制器、相干接收器、片内窄线宽可调谐激光器、半导体光放大器等^[67]。此外,一种匹配的单片硅锗高性能双通道专用集成电路也和光子集成芯片一起通过倒装芯片键合的方式集成在公共硅内插器上,其集成了两个通道的 MZM 驱动器

和能够提供 50 GHz 以上带宽的跨阻放大器 (TIA),能够在 95 GHz 宽通道中实现 800 Gbit/s 的数据传输。

3 片上集成多维光处理

3.1 片上波长转换

基于波长维度的片上波长调控技术通常包括波长转换、光学频率梳、波长滤波、波分复用等,其中全光波长转换是 WDM 光传输网络的关键技术之一,也是其他各种复杂光信号处理应用的基本功能之一,对于增强未来光网络的可重构性和无阻塞能力非常重要。全光波长转换可以通过高非线性光纤 (HNLF)、半导体光放大器 (SOA) 和周期极化反转铌酸锂 (PPLN) 光波导中的非线性效应来实现^[68-70]。值得注意的是,硅波导中的高折射率差可以实现强局域的光场限制,可以大大增强非线性,因此硅波导也可以作为非线性全光信号处理的理想平台。图 9(a)示意了基于硅波导的多通道奈奎斯特

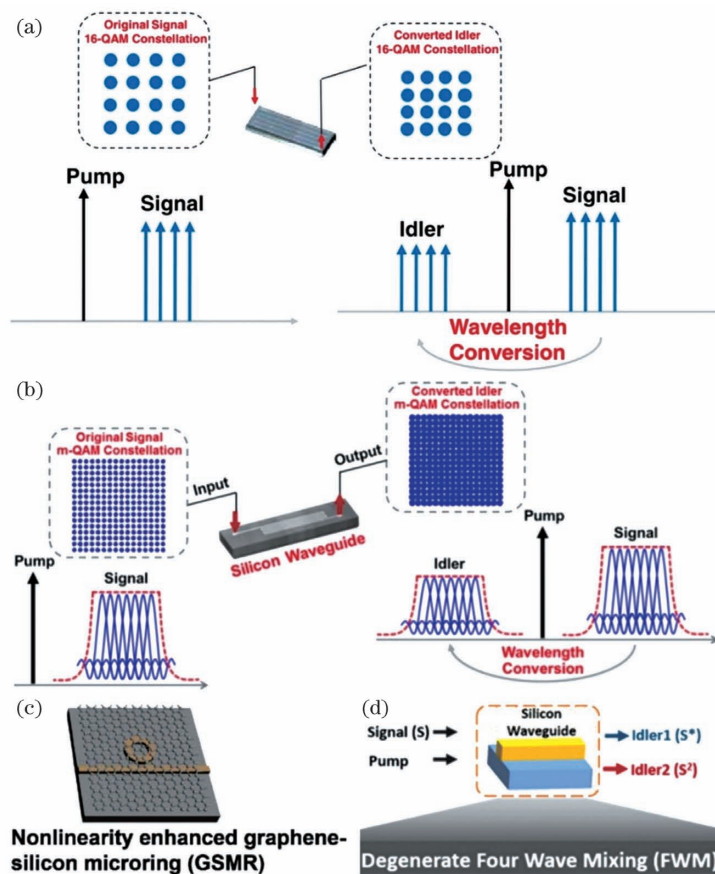


图 9 片上波长转换。(a)(b)基于硅波导的波长转换^[71-72]; (c)基于石墨烯-硅微环谐振器的波长转换^[73]; (d)基于硅波导的波长转换和信号再生^[75]

Fig. 9 On-chip wavelength conversion. (a)(b) Wavelength conversion using a silicon waveguide^[71-72]; (c) wavelength conversion using a graphene-silicon microring resonator^[73]; (d) wavelength conversion and signal regeneration using a silicon waveguide^[75]

16 QAM 信号的波长转换,并对相位共轭波长转换的简并四波混频(DFWM)和透明波长转换的非简并四波混频(NFWM)进行了实验研究^[71]。对于基于 DFWM 的多通道波长转换,接收 OSNR 代价为 ~2 dB,对于基于 DFWM 的单通道相位共轭波长转换和基于 NFWM 的单通道透明波长转换,接收 OSNR 代价为 ~1 dB。图 9(b)中进一步研究了基于硅波导的多载波多电平调制信号波长转换的潜力,克服了高阶调制格式信号(16/32/64/128-QAM)由于星座图固有的较小相位噪声容限造成的困难,实验中实现了低失真的高阶调制格式信号的波长转换^[72]。此外,如图 9(c)所示,为了增强硅波导器件中的非线性相互作用,引入谐振器结构,同时通过引入石墨烯材料可以进一步增强非线性,从而实现增强的基于四波混频(FWM)效应的波长转换^[73];同时,非线性增强石墨烯-硅微环谐振器(GSMR)的固有共振特性提供了波长选择的非线性相互作用,因而可以实现具有灵活波长通道选择功能的波长转换。另一方面,除了波长转换以外,利用

硅波导中的 FWM 效应,还可以实现调制格式转换和全光信号再生等光处理功能^[74-75]。图 9(d)示意了基于硅波导 FWM 效应的波长转换和信号再生两种光信号处理情况,在实验中,利用 10 Gbit/s PAM-4 信号,实验验证了波长转换和信号再生功能^[75]。

3.2 片上光学频率梳

光学频率梳指的是在频谱上由一系列间隔均匀且具有稳定的相干相位关系的频率分量所组成的光谱。自问世以来,光学频率梳在光学频率精密测量、宽带激光气体传感及远程信号时钟同步等应用领域取得了长足的进步。近年来随着光通信技术的发展,光学频梳技术在密集波分复用、多波长超短脉冲产生、光学任意波形产生等领域也获得广泛的应用^[76-78]。光频梳的产生可以通过外调制的电光调制器、循环频移器、锁模激光器以及光纤中的非线性效应等方式来实现^[79-82]。对于片上光频梳的产生而言,采用微谐振器结构是一种比较高效的方案。图 10(a)中利用超高品质的悬浮二氧化硅微环谐振

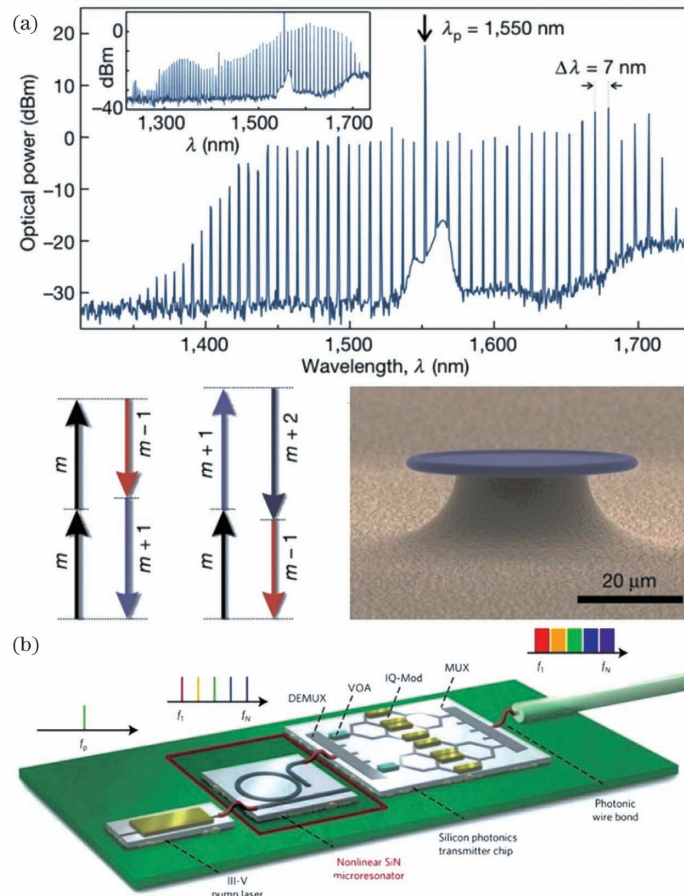


图 10 片上光学频率梳。(a)基于微谐振器的光频梳产生^[83]; (b)基于光频梳的相干光通信^[86]

Fig. 10 On-chip optical frequency comb. (a) Optical frequency comb generation based on a microresonator^[83]; (b) coherent optical communications with optical frequency combs^[86]

器,同输入的已知频率的连续泵浦源进行克尔非线性相互作用,从而产生等间隔的频率梳齿^[83]。其中,微环谐振器的微腔结构同非线性光纤相似,能够在长存储时间和长作用长度上实现高非线性。通过DFWM和NFWM等非线性效应,将共振耦合的单频率泵浦源转换成光频梳,具有噪声小、间隔大及相干性好等优点,利用这种原理,可以基于各种不同技术平台的高品质微谐振器产生克尔频率梳,包括硅、氮化硅及氟化钙等^[83-86]。除此之外,光频梳固有的恒定频率间隔可以作为WDM光源,每一条频率线单独调制,用来传输具有紧密间隔的子载波。如图10(b)所示,利用低损耗氮化硅(SiN)波导制造高品质微环谐振器,通过混合集成的III-V族半导体激光器泵浦产生克尔频率梳,然后对各波长光载波

进行解复用后分别单独调制,从而构建了Tbit/s量级的光发射机^[86]。在实验中,通过产生具有低相位噪声的高度稳定的克尔频率梳,并在20条相邻的梳状频率线上进行正交相移键控(QPSK)和16-QAM调制编码,从而实现了总容量高达1.44Tbit/s的200km长传输,验证了片上光频梳在未来高速大容量光通信和光互连系统中的巨大应用潜力。

3.3 片上模式处理

近年来,片上模式处理在模式复用解复用、多模波导弯曲、多模波导交叉等多模光子学器件的研究推动下发展迅速,用于灵活模式操控的高性能模式调控器件也引起了越来越多的关注,主要包括模式转换、模式滤波及模式光开关等^[87-91]。图11列举了几种片上集成模式处理器件。图11(a)给出了一种

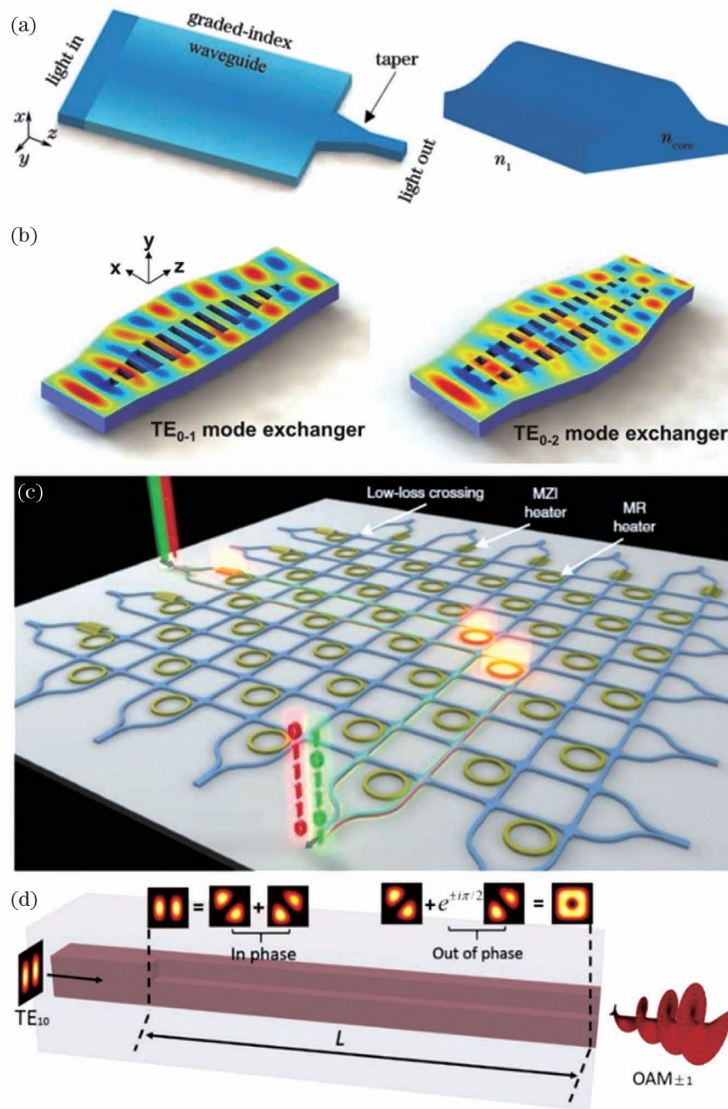


图 11 片上模式处理。(a)模斑变换器^[92]; (b)模式交换器^[93]; (c)多模光开关^[94]; (d) OAM 模式产生芯片^[95]

Fig. 11 On-chip mode processing. (a) Mode spot converter^[92]; (b) mode exchanger^[93]; (c) multimode switch^[94]; (d) OAM mode generation chip^[95]

用于连接具有不同横截面的波导器件的模式变换器,其基于渐变折射率波导的自聚焦效应,其中波导的渐变折射率分布可以利用边界非线性的波导来实现,通过调节渐变折射率波导特定的折射率分布,可以改变各个模式的场分布和传播常数,从而对聚焦点的位置和聚焦程度进行调节^[92]。图 11(b)给出了一种超紧凑的模式交换器,其由多模输入、多模激励、移相、模式合成等部分构成^[93]。通过引入硅超材料结构,灵活调控多模波导中超模的场分布和传播常数,从而获得最佳耦合系数和相移量,实现对应的模式交换。图 11(c)将交换路由功能引入到片上多模光子系统,提出了一种紧凑、低损耗的片上 2×2 多模开关,其由一对 1×1 马赫-曾德尔干涉仪(MZI)多模开关和一对 2×2 微环单模开关组成,可以用于实现完全灵活的模式间和路径间路由^[94]。与传统的多模光开关相比,其最大的优势是可以同时处理输入的多路复用信号,而无需复杂的解复用-处理-复用的过程。实验中基于所提出的开关元件,制作了两种具有交叉直通波导和环形总线结构的开关结构,验证了其大规模集成的可行性,并采用 32 Gbit/s 高速调制信号进行系统验证,总吞吐量达 256 Gbit/s。此外,除了波导内部准横电(TE)和准横磁(TM)模式之外,片上模式调控也包括产生和操纵波导非本征模式,进而扩展片上集成系统的应用范围,作者提出了一种利用单沟槽硅波导在绝缘体上硅(SOI)芯片上产生轨道角动量(OAM)模式的方案,如图 11(d)所示^[95]。OAM 模式是另一种可以用来表示空间模式的模式基,其产生对于光学操控、光镊、传感测量、成像、光通信、量子信息等各种应用来说非常重要,然而目前片上波导内产生 OAM 模式仍然具有很大的挑战。由于沟槽波导可以支持两个正交的类线性相位模式,其光轴相对于水平和垂直方向旋转约 45° ,可以通过组合具有不同相位差的两个本征模,在单沟槽波导的输出端选择性地输入的模式转换成一阶 OAM 模式,从而为基于 OAM 模式的光通信和光互连等应用提供芯片级解决方案。

3.4 片上偏振处理

对于硅波导而言,由于硅和包层空气或二氧化硅存在巨大折射率差,双折射效应极为显著,因此大多数硅波导器件具有非常严重的偏振敏感特性,因此片上的偏振调控和处理也尤为重要。偏振起偏器、偏振分束器及偏振旋转器等都属于基本的片上偏振处理器件^[96-99],除此之外,如图 12 所示,片上偏

振处理还包括片上偏振分析检测和片上手性光子器件等更复杂的偏振相关功能。图 12(a)示意了一种紧凑、全集成的偏振分析仪,其由用于偏振处理的亚波长结构和用于光-电转换的 4 个片上光电探测器构成,通过计算 4 个光电探测器输出,可以恢复输入光的偏振态^[100]。端面耦合方式输入的外部光首先经偏振分束旋转器(PSR)分成两路 TE 光,分别对应来自输入光的正交偏振分量;再经逆设计的偏振混合单元(PHU)传输后,两路 TE 光被混合并分成 4 个部分,最后由 4 个高速锗硅探测器检测。其中,输出端口 O1(O4)仅接收来自输入端口 IN1(IN2)的信号,显示输入偏振光的强度信息,而输出端口 O2 和 O3 都接收来自 IN1 和 IN2 的混合信号,显示输入偏振光的相位信息,因此可以从 4 个光电探测器输出信号中检索恢复庞加莱球上的任意偏振态。图 12(b)示意了一个基于片上线性光网络的偏振处理器,可以通过调整芯片上的移相器阵列来配置多种偏振处理功能,包括多输入多输出偏振解扰器、偏振控制器和偏振分析仪^[101]。光子偏振处理器由 1 个二维光栅和 4 个 MZI 组成,其中二维光栅将输入光的两个正交偏振分量分开,MZI1 和 MZI4 都可以执行任意 2×2 酉矩阵变换,MZI2 和 MZI3 的组合可以执行任意 2×2 对角矩阵变换,因此构成了一个完整的线性网络,可以实现基于奇异值分解的任意变换矩阵,并利用梯度下降算法调谐移相器,完成任意线性变换。图 12(c)示意了新型手性硅光子芯片^[102],其基于低阶模到高阶模转换和模式干涉新原理,因而具有超高定向性(~ 1)和高效率($>70\%$),解决了传统硅光子芯片受限于线偏振的问题,同时相比于传统低定向和低效率的手性纳米光子器件,性能得到了大幅提升。另外,所提出并研制的手性硅光子芯片还可以针对任意取向的线偏振光实现完美的 3 dB 分束功能。

3.5 片上光逻辑和光计算

片上全光逻辑门是光通信和光互连系统中的关键器件,对于光分组交换、光信号再生以及光计算等高速全光信号处理功能的实现具有重要意义。片上光逻辑和光计算主要利用光器件内部的非线性效应来实现,包括 HNLFF、SOA、PPLN、硅波导、二维光子晶体等^[103-107]。图 13 是一种基于 SOA 的全光可编程逻辑阵列^[108],结构包括输入电路、标准逻辑单元(CLU)阵列、开关阵列,工作原理如图 13(b)所示,输入电路由延迟干涉仪组成,通过解调输入差分相移键控(DPSK)信号对输入信号进行预编码。标

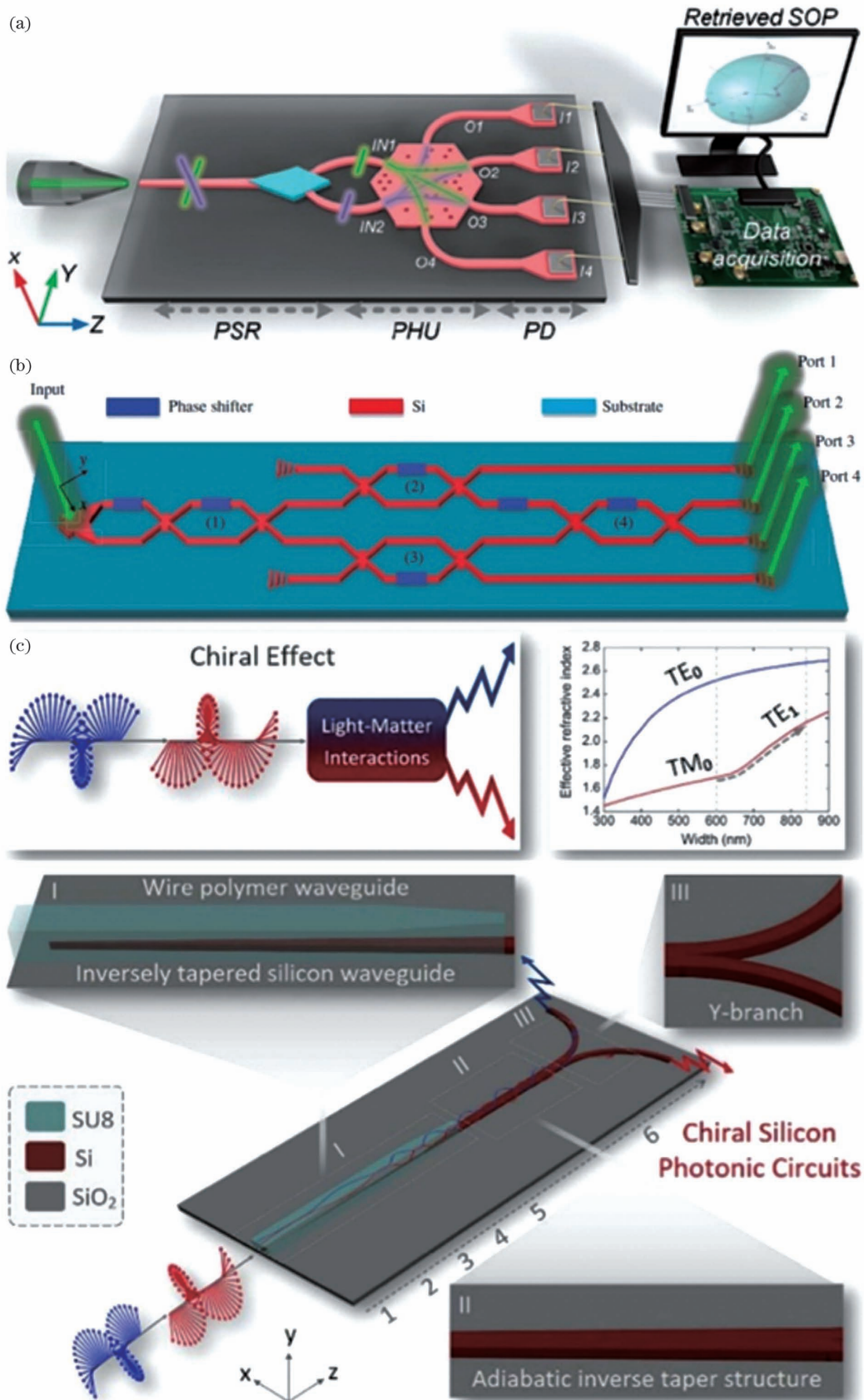


图 12 片上偏振处理。(a)片上偏振分析仪^[100]；(b)片上偏振处理器^[101]；(c)手性硅光子芯片^[102]

Fig. 12 On-chip polarization processing. (a) On-chip polarization analyzer^[100] ; (b) on-chip polarization processor^[101] ; (c) chiral silicon photonic circuits^[102]

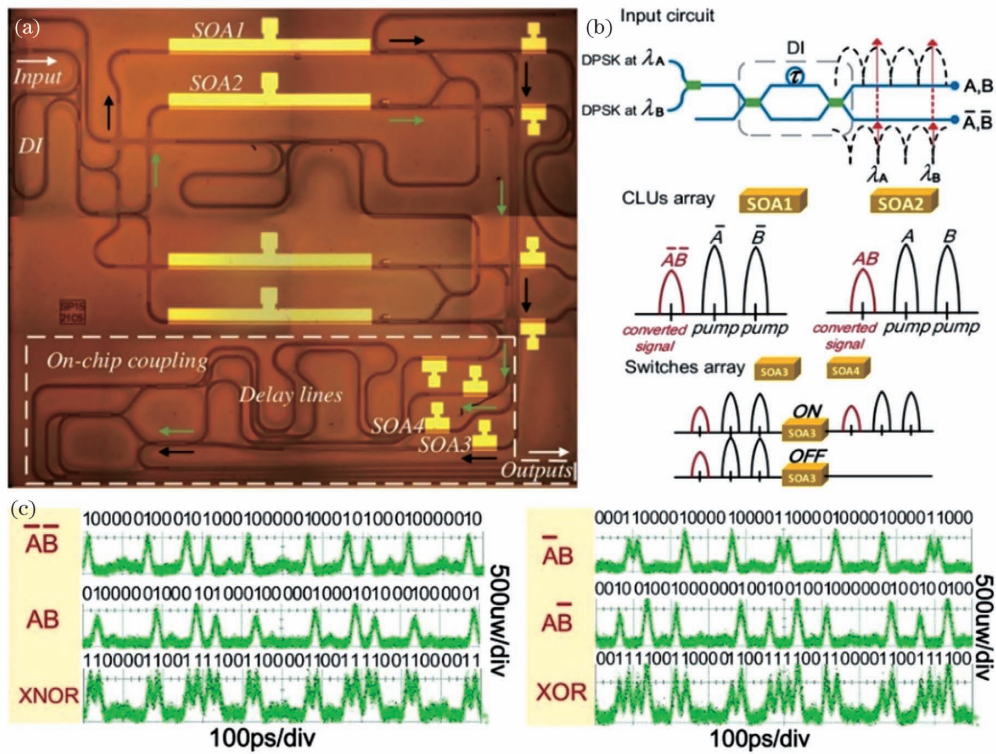


图 13 基于 SOA 的全光可编程逻辑阵列^[108]。(a) 芯片显微图片；(b) 工作原理；(c) 测量时域波形图

Fig. 13 All-optical programmable logic array based on SOA^[108]. (a) Microscope image of the chip; (b) operation principle; (c) measured temporal waveforms

准逻辑单元阵列包括 SOA1 和 SOA2, 作为非线性介质, 利用 FWM 效应构建不同的逻辑单元; 交换阵列则由 SOA3 和 SOA4 组成, 作用是选择合适的逻辑单元。此外, 开关阵列可以用来调节耦合腔的光

功率以优化耦合结果。图 13(c) 给出了时域波形结果, 验证了全光可编程逻辑阵列具有异或 (XOR) 和同或 (XNOR) 逻辑功能。

图 14 是一种基于 PPLN 二阶非线性效应的全

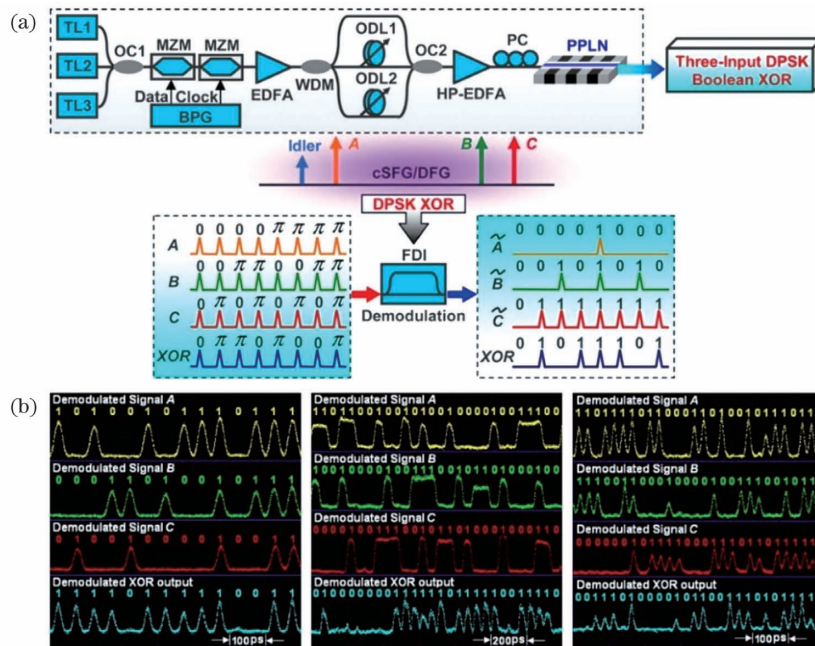


图 14 基于 PPLN 的全光逻辑门^[109]。(a) 实验装置和工作原理图；(b) 测量时域波形图

Fig. 14 All-optical logic gates based on PPLN^[109]. (a) Experimental setup and operation principle; (b) measured temporal waveforms

光逻辑门,该逻辑门实现了全光三输入布尔异或逻辑运算^[109],实验装置和工作原理如图 14(a)所示,信号光 A 和 B 相互作用,通过和频(SFG)过程产生和频光,与此同时,信号光 C 与产生的和频光经差频(DFG)过程产生闲频光。该级联和频与差频(cSFG/DFG)非线性过程产生的闲频光的相位与输入信号光的相位满足线性叠加关系,在三输入 DPSK 信号的情况下,闲频光对应输出布尔异或逻辑运算结果。图 14(b)为实验测量的时域波形结果,验证了针对 20 Gbit/s NRZ-DPSK 和 RZ-DPSK 信号以及 40 Gbit/s RZ-DPSK 信号的三输入布尔异或逻辑的运算功能。

此外,除了与、或、非、异或等基本逻辑门,各种复杂逻辑功能也可以利用 CLU 的组合来实现。

图 15 为一种基于 HNLf 实现全光 2×2 位乘法器的方案^[110]。全光 2×2 位乘法器是复杂逻辑器件的典型代表,由传统结构的加法器和移位寄存器组成,而受光存储难度的限制,移位寄存器很难实现。这里利用双向多信道 FWM 来产生不同类型的 CLU,然后通过相应 CLU 的简单功率耦合得到乘法器的结果。如图 15(a)所示,输入电路产生具有互补码的光信号,CLU 阵列用于执行“与”运算,根据互补码生成一组完整的 CLUs,而耦合阵列则用于根据需要直接组合 CLUs 的某些结果,从而实现 2×2 位乘法器。全光 2×2 位乘法器输出结果的时间波形图和眼图如图 15(b)所示,在 40 Gbit/s 速率下性能良好,消光比大于 9.4 dB。

前面介绍的光逻辑运算主要都是针对开关键控

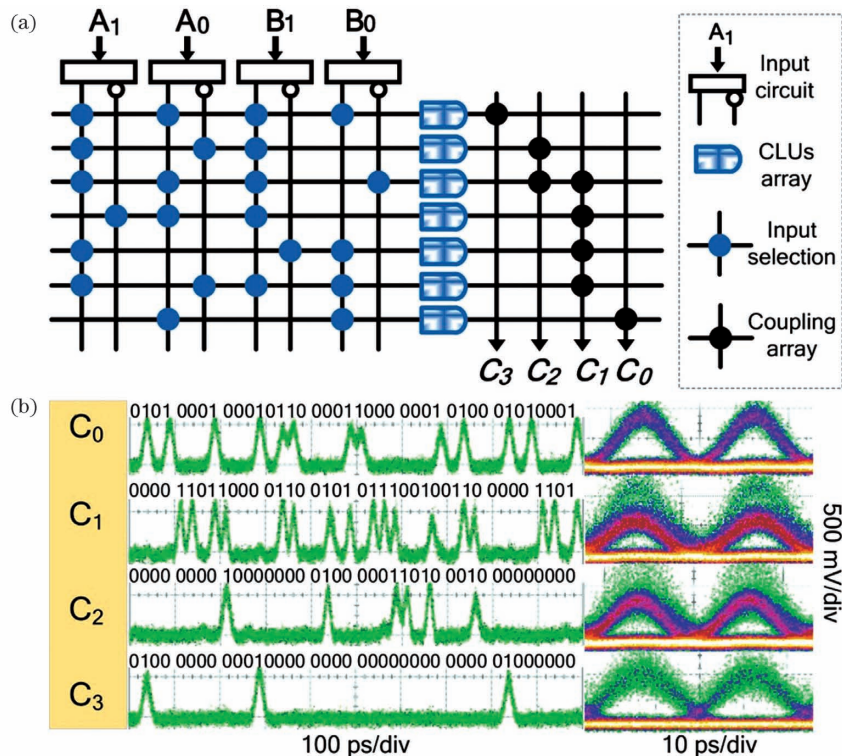


图 15 基于 HNLf 的全光 2×2 位乘法器^[110]。(a)工作原理;(b)测量时域波形图和眼图

Fig. 15 All-optical 2×2 -bit multiplier based on HNLf^[110]. (a) Operation principle; (b) measured temporal waveforms and eye diagrams

(OOK)和相移键控(PSK)等二进制调制格式信号。相比于二进制调制格式信号一个码元携带一个比特信息,高级调制格式信号一个码元可以携带多个比特信息。近年来,随着先进高级调制格式信号在高速大容量光通信和光互连系统中发挥着越来越重要的作用,从传统二进制信号布尔光逻辑运算发展到高级调制格式信号多进制光计算成为一个重要趋势。图 16 示意了基于硅波导中 FWM 效应的三输

入四进制光计算。如图 16(a)所示,作者利用正交相移键控(QPSK)信号来表示四进制数(0、1、2、3),通过硅波导中多个 FWM 过程,实现了三输入四进制光混合加法/减法计算($A+B-C$ 、 $A+C-B$ 、 $B+C-A$)^[111]。图 16(b)示意了基于硅-有机物混合缝隙光波导的三输入十六进制光计算。硅-有机物混合缝隙光波导将光限制在填充有高非线性有机材料的纳米尺度低折射率狭缝区域,不仅可以有效减小

模场面积和增强非线性作用,还可以显著降低双光子吸收(TPA)和自由载流子吸收(FCA)影响^[112]。实验中利用多个 FWM 过程和 16 相移键控

(16-PSK)信号,研究了三输入 40 Gbaud 十六进制光混合加法/减法计算($A+B-C$ 、 $A+B+C$ 、 $A+C-B$ 、 $A-B-C$ 、 $B+C-A$ 、 $B-A-C$)。

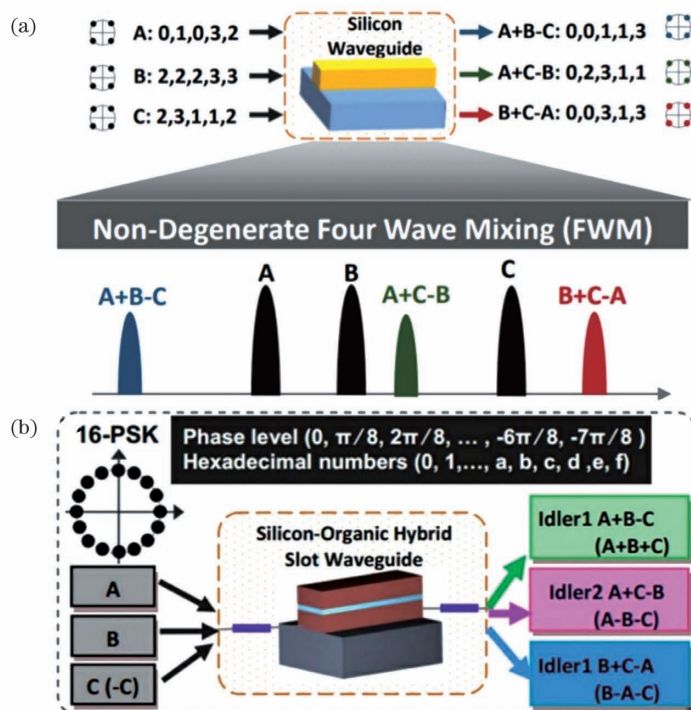


图 16 基于硅波导的多进制光计算。(a) 四进制光计算^[111]; (b) 十六进制光计算^[112]

Fig. 16 M-ary optical computing based on silicon waveguides. (a) Quaternary optical computing^[111]; (b) hexadecimal optical computing^[112]

3.6 片上可重构光处理

尽管片上光信号处理近年来获得了广泛的关注,基于光子各个物理维度的光处理功能器件也发展迅速,不过对于大多数集成功能器件而言应用灵活性仍然存在一定局限,即特定的器件结构大多完成特定的单一光处理功能。为适应未来各种新兴光信号处理应用的需求,通常要求片上光处理器件具有一定的调谐和重构功能,特别是片上可重构和可编程的多任务光信号处理。

图 17 给出了几种具有可重构和可编程功能的片上集成光处理器件。图 17(a)为基于 SOI 平台制作的一种完全可重构的布拉格光栅,布拉格光栅可以利用电信号进行快速重构,作为可编程信号处理器执行多种信号处理功能^[113]。该光栅由多个串联的均匀布拉格光栅和光栅中心的法布里-珀罗腔组成,每个均匀布拉格光栅部分包含一个独立的横向 PN 结,通过向 PN 结施加偏置电压,可以基于自由载流子等离子体色散效应来局部调整特定部分中的光栅的折射率。因此,光栅的整个折射率可以通过对所有偏置电压进行场编程来重新配置,使其面向

不同的应用时具有不同的光谱特性。在实验中,通过场编程将制作的光栅重新配置为均匀光栅、相移光栅和啁啾光栅,并将其引入光信号处理中,可以实现包括微分、延时和微波频率识别在内的多种光处理功能。图 17(b)为一种波形整形器,其由两个 AWG 及中间连接的 MZI 阵列构成^[114]。经过特殊设计,这两个 AWG 允许在相邻通道之间有适当的重叠区域,其将宽带光谱分割成多个通道,并在各个通道上利用热调 MZI 实现幅度调制和相位调制,再将调制后的各个通道重新组合在一起,从而实现可编程的光学滤波以及可重构光分插复用(ROADM)等多种光信号处理功能。图 17(c)为一个基于网状结构的可编程多任务光信号处理器^[115],其依赖于一个可扩展 2D 结构网络。该网络具有许多由可调谐 MZI 构成的六边形单元,因此网络中的光传播路径可以通过在 MZI 中的编程热调相移器进行配置,同时,各部分路径还具有强度和相位调控的能力。在实验中,通过制作一个具有 4 个六边形单元的硅光子集成芯片,通过适当调节 MZI 的热调相移器,实现了可编程的单微环谐振器、级联微环谐振

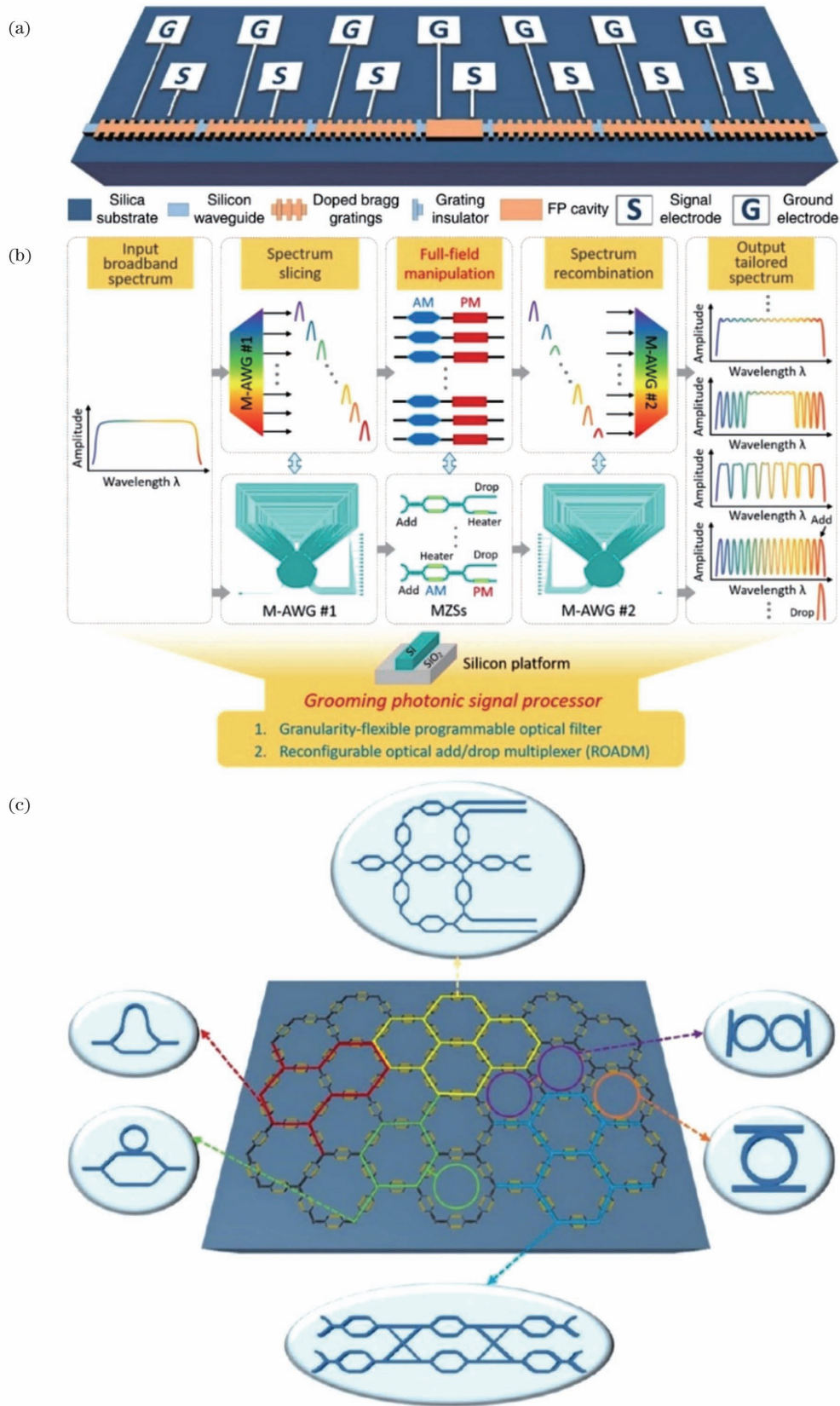


图 17 片上可重构可编程光信号处理。(a)可重构波导布拉格光栅^[113]；(b)可重构波形整形器^[114]；(c)可编程多任务光信号处理器^[115]

Fig. 17 On-chip reconfigurable and programmable optical signal processing. (a) Reconfigurable waveguide Bragg grating^[113] ; (b) reconfigurable wavershaper^[114] ; (c) programmable multi-task photonic signal processor^[115]

器、非对称 MZI、微环辅助 MZI、光延时线、多端口路由器、 $N \times N$ 光开关等多功能光信号处理,进一步研究了智能自配置的多端口路由和光开关及其在光纤通信系统中的应用。

3.7 片上智能光处理

近年来,随着人工智能领域的兴起,研究人员对神经网络的研究也不断深入。神经网络通过模仿神经网络系统结构,建立神经网络中各层神经元之间的连接,并依赖大量处理单元互连执行线性运算和非线性操作,从而构建自适应的信息处理系统。神经网络在计算机视觉、自动驾驶、生物医学等众多领域有着广泛的应用,表现出良好的智能特性。对于片上光处理,其未来趋势也将从可重构可编程的片上光处理发展为片上智能光处理。如图 18(a)所示,在多模波导中任意混合的模式利用基于 MZI 自重干涉网络的硅光子芯片实现模式间的解扰^[116],利用硅光可调分束器网络,将由传输矩阵描述的任意 $N \times N$ 酉变换分解为简单的 2×2 酉变换序列,通过渐进自配置算法训练以实现任意酉变换,从而对原始信号进行相干干涉重建,而不需要预先知道混合对象的细节。在实验中,通过内置透明非接触式集成光探针 (CLIPP) 进行功率检测,利用渐进调谐算法,实现了 4 个强混合干扰 MDM 通道中各个模式的自动分离。图 18(b)示意了一种自配置和可重构的硅光信号处理器^[117],其同样利用线性光网络,主要由 4 个部分组成。第一部分用于切换输入通道,第二部分和第四部分均可以执行任意酉矩阵变换,第三部分则执行任意对角矩阵变换,因此第二、三、四部分作为一个整体,可以用于实现基于奇异值分解的任意矩阵变换。在实验中,通过使用由深度学习修正的数值梯度下降算法对其进行训练,可以自配置执行各种功能,包括多通道光交换、光多输入多输出解扰器和可调滤光器。

片上智能光处理的一个重要突破是光子神经网络的实现,其利用光子集成芯片作为神经网络模型训练和测试的硬件载体,从而将光电子技术与传统神经网络模型相结合,充分发挥光子技术特有的优势,构建出高速低功耗的网络结构,突破传统电子神经网络的瓶颈^[118]。图 18(c)给出了一种全光神经网络 (ONN) 的新架构^[119],该神经网络的组成包括一组输入人工神经元以及与之相连接的至少一个隐藏层和输出层。ONN 的每一层由实现光

学矩阵乘法的光学干涉单元 (OIU) 和实现非线性激活的光学非线性单元 (ONU) 组成。因此,在每一层中,信息通过线性组合传播,随后对其应用非线性激活函数。人工神经网络的训练是将训练数据输入输入层,然后利用前向传播计算输出,而权重则是通过使用反向传播进行优化,从而在光学域中实现任意深度和尺寸的人工神经网络。其中,线性矩阵运算是通过构建三角形 MZI 阵列,利用奇异值分解方法来获得任意酉矩阵变换;而非线性操作则使用饱和和吸收、双稳态等常见的光学非线性来实现,主要目的是引入非线性因素,增强神经网络的表达能力,从而充分发挥神经网络在处理各种复杂问题时的优势。通过对该片上光学神经网络进行语音识别问题上的基准测试,实验证明,其精度可以与使用全连接神经网络算法的传统 64 位计算机相当。图 18(d)给出了一种可扩展和 CMOS 兼容的计算专用光子硬件加速器^[120],又称为光子张量核,其将内存计算与最先进的光子集成微内核相结合,在同一物理设备中并行执行卷积运算,实现速度可以达到每秒数万亿次乘法累加运算。该光子张量核可以被认为是专用集成电路的光学模拟,使用相变材料 (PCM) 存储阵列和基于光子芯片的光频梳实现具有 WDM 能力的并行光子内存计算,克服了现有光学计算方法缺乏集成的非易失性光子存储器和复用计算能力的限制。计算过程可以简化为测量可重构和非谐振无源元件的光传输,从而可以在超过 14 GHz 的带宽下工作,仅受调制器和光电探测器速度的限制。该光子张量核能够以光信号数据速率进行许多并行的矩阵向量乘法 (MVM) 操作。在实验中,通过使用卷积滤波器进行图像处理,显示了该片上光子张量核进行图像处理的速度与光纤网络进行图像处理的速度相当的同步数据传输和计算。首先将图像数据编码到片上光频梳的每个梳齿上,然后以集成 PCM 单元的非易失性配置编码固定的卷积核,该集成 PCM 单元耦合到互连的光波导矩阵。通过使用非易失性内存的光子乘法累加运算操作,最大限度地减少了延时和数据移动,同时通过在同一光子核中的多路复用计算,大大减小了光学尺寸。这些充分显示了集成光子学在并行、快速和高效计算硬件方面的潜力,非常适合于数据密集型人工智能应用,包括自动驾驶、实时视频处理及下一代云计算服务等。

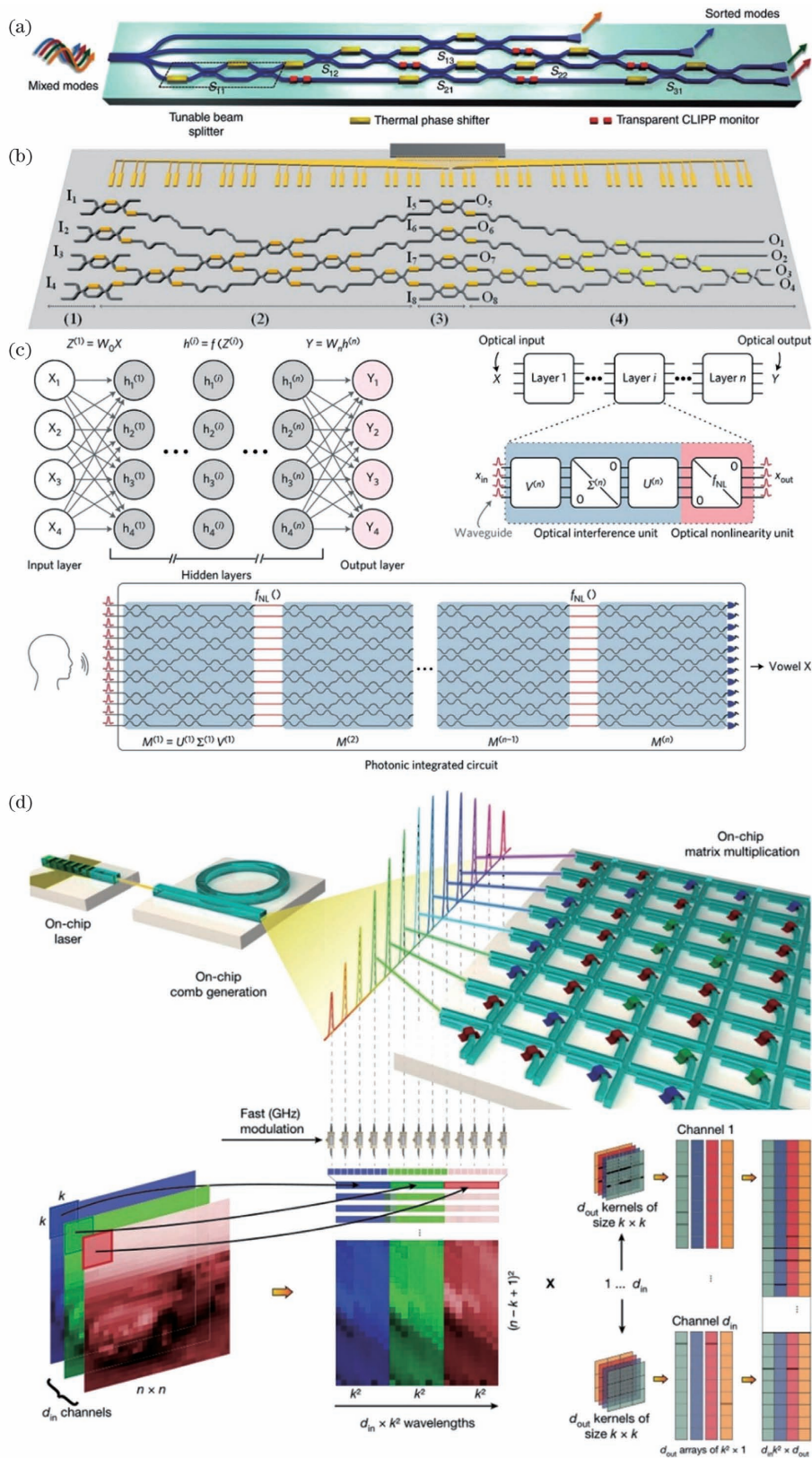


图 18 片上智能光信号处理。(a)多模波导中任意混合模式的自动解扰^[116]；(b)自配置的可重构硅光信号处理器^[117]；
(c)全光神经网络芯片架构^[119]；(d)基于集成光子张量核的并行卷积处理^[120]

Fig. 18 On-chip intelligent optical signal processing. (a) Automatic unscrambling of arbitrarily mixed modes in a multimode waveguide^[116]；(b) self-configured reconfigurable silicon photonic signal processor^[117]；(c) all-optical neural network chip architecture^[119]；(d) parallel convolutional processing using an integrated photonic tensor core^[120]

4 总结和展望

为满足大数据时代海量数据高速传输与处理的应用需求,现代通信网络的发展离不开片上集成的光互连与光处理技术。相比于传统电信号,光信号以高速、大带宽、低损耗及强抗干扰能力等固有属性,在互连传输及信号处理方面具有独特的优势。同时,光子具有频率/波长、偏振、时间、复振幅及空间结构等多个物理维度,可以各自复用和混合复用以提升并行传输通道的数目,从而有效推动光通信和光互连网络数据吞吐量的持续增长。本文对片上集成多维光互连和光处理中的关键技术和核心器件进行了回顾与介绍。对于片上多维光互连,随着片上混合多维复用解复用器的研究深入和激光器、调制器、探测器等核心器件及异构波导耦合支撑技术等快速发展,光子集成芯片、相干光接收机及光收发模块等已经逐渐走向产业化,在长距离相干光

通信和短距离数据中心系统中发挥着重要作用。对于片上多维光处理,随着片上波长转换、片上光频梳、片上模式处理、片上偏振处理、片上光逻辑和光计算等功能的实现,片上光处理也开始朝着可重构、可编程和智能化的方向发展。这些对于光通信网络节点处高速灵活的数据信息管理具有重要意义。

图 19 给出了片上集成多维光互连和光处理的未来发展趋势,主要表现在如下几个方面。

1) 多材料体系:可以基于 III-V 族化合物、硅、氮化硅、二氧化硅、聚合物、铌酸锂及二维材料等多个平台。同时,多平台融合也是一个重要趋势,如硅+薄膜铌酸锂等。

2) 多集成方式:可以混合集成,也可以单片集成。光电融合集成也是重要方向,其可以充分实现光电子与微电子的融合和取长补短,实现性能更优的光电集成芯片。

3) 多物理维度:充分利用频率/波长、偏振、复振

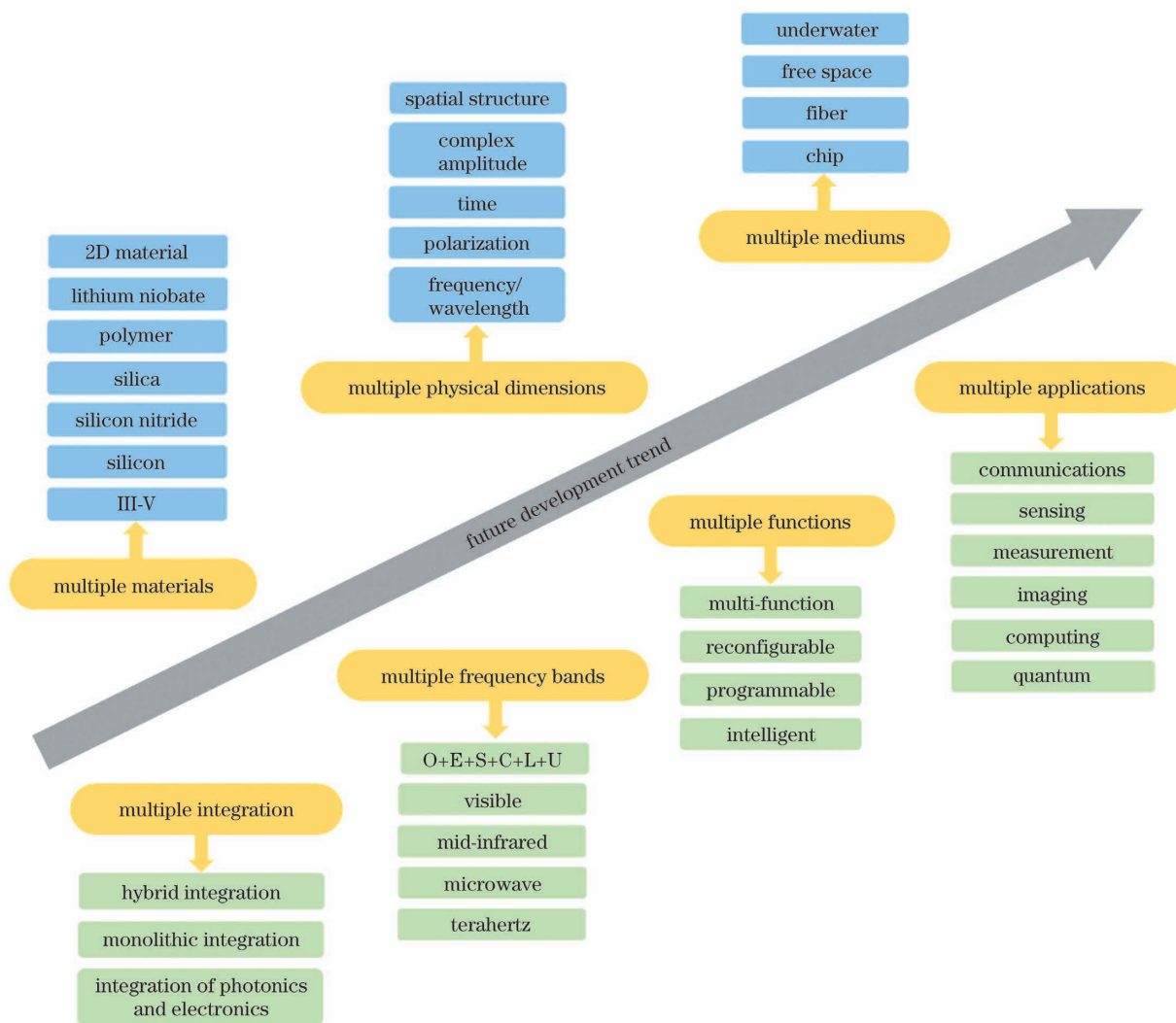


图 19 光互连和光处理的未来发展趋势

Fig. 19 Future development trend of optical interconnection and optical processing

幅、时间、空间等光子各个物理维度资源。同时,通过多物理维度融合以大幅提升光互连和光处理容量也是必然趋势。

4)多频段:C波段(1530~1565 nm)和O波段(1260~1360 nm)以外,E波段(1360~1460 nm)、S波段(1460~1530 nm)、L波段(1565~1625 nm)、U波段(1625~1675 nm)也值得关注,O+E+S+C+L+U(1260~1675 nm)全波段超带宽是重要趋势,也充满了挑战。同时,可见光、中红外、微波、太赫兹等频段也是重要趋势。

5)多媒介:不仅局限于芯片内,芯片间、光纤、自由空间、水下等多媒介也是重要趋势,芯片-光纤-自由空间-水下等异构多媒介融合是重要挑战。

6)多功能:深入和拓展片上多维光互连和光处理功能,从单一功能到多功能,从固定功能到可重构、可编程和智能化功能是重要发展方向。

7)多应用场景:除了通信之外,片上集成多维光互连和光处理的核心芯片和关键技术也可以拓展应用于传感、测量、成像、计算、量子等多应用场景,特别是结合人工智能技术和神经网络芯片,智能应用是未来重要发展趋势。

硅光子技术的 CMOS 兼容性可以享受摩尔定律带来的好处,硅光子芯片可望在性能、体积、功耗、成本上取得突破。面向未来超大容量光通信和光互连应用系统,需要发展硅基片上多维复用与处理作

为核心的光电子芯片支撑技术。

图 20 为一种典型的超大容量硅基片上多维复用与处理基本架构,包括集成发射机、硅基多维复用与处理芯片、集成接收机。集成发射机由激光器阵列、调制器阵列和多维复用器构成;硅基多维复用与处理芯片由单片集成的多维解复用器、片上光处理网络、多维复用器构成;集成接收机由多维解复用器和探测器阵列构成。其中,多维复用器和多维解复用器包括波长复用解复用器、偏振复用解复用器、模式复用解复用器;片上光处理网络包括片上光开关阵列、片上可重构光分插复用器阵列、片上可调光衰减器阵列、片上光功率监测器阵列等。片上光处理网络还可以包含神经网络芯片。集成发射机和片上光处理网络之间、片上光处理网络和集成接收机之间通过多模波导(芯片间光互连)或多模光纤(数据中心光互连、长距离光纤通信)连接。同时,可以对集成发射机、硅基多维复用与处理芯片、集成接收机和驱动电路、控制电路、放大电路等进行光电子与微电子的光电融合集成,从而进一步提升带宽、降低功耗、提高集成度和减小尺寸。硅基片上多维复用与处理通过融合光子多波长、双偏振、多模式(WDM+PDM+MDM),可以实现超多通道数目和超大吞吐量的片上集成多维光互连和光处理,这也是未来光互连和光处理发展的重要趋势。

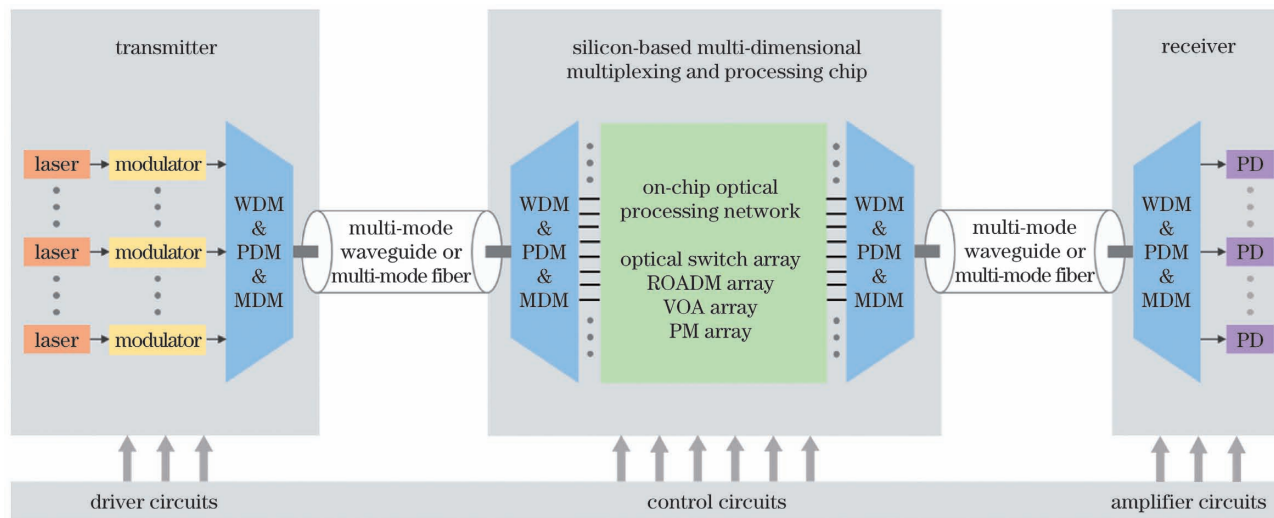


图 20 超大容量硅基片上多维复用与处理基本架构

Fig. 20 Basic architecture of ultra-large capacity silicon-based on-chip multi-dimensional multiplexing and processing

参 考 文 献

- [1] Meindl J D. Beyond Moore's law: the interconnect era[J]. Computing in Science & Engineering, 2003, 5(1): 20-24.
- [2] Miller D A B. Device requirements for optical interconnects to silicon chips[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(7): 1166-1185.
- [3] Track E, Forbes N, Strawn G. The end of Moore's

- law[J]. *Computing in Science & Engineering*, 2017, 19(2): 4-6.
- [4] Magen N, Kolodny A, Weiser U, et al. Interconnect-power dissipation in a microprocessor [C]//*Proceedings of the 2004 International Workshop on System Level Interconnect Prediction*, February 14-15, 2004, Paris, France. New York: ACM Press, 2004: 7-13.
- [5] Huang D W, Sze T, Landin A, et al. Optical interconnects: out of the box forever? [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, 9(2): 614-623.
- [6] Caulfield H J, Dolev S. Why future supercomputing requires optics[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(5): 261-263.
- [7] DeCusatis C. Optical interconnect networks for data communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(4): 544-552.
- [8] Liang D, Bowers J E. Photonic integration: Si or InP substrates?[J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(12): 578-581.
- [9] Jalali B, Fathpour S. Silicon photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4600-4615.
- [10] Gunn C. CMOS photonics for high-speed interconnects[J]. *IEEE Micro*, 2006, 26(2): 58-66.
- [11] Vlasov Y A. Silicon CMOS-integrated nanophotonics for computer and data communications beyond 100 G[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(2): s67-s72.
- [12] Roelkens G, van Campenhout J, Brouckaert J, et al. III-V/Si photonics by die-to-wafer bonding [J]. *Materials Today*, 2007, 10(7/8): 36-43.
- [13] Liang D, Roelkens G, Baets R, et al. Hybrid integrated platforms for silicon photonics [J]. *Materials*, 2010, 3(3): 1782-1802.
- [14] Brackett C A. Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications [J]. *IEEE Journal on Selected areas in Communications*, 1990, 8(6): 948-964.
- [15] Winzer P J. Making spatial multiplexing a reality[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(5): 345-348.
- [16] Winzer P J. Modulation and multiplexing in optical communications[C]//*2009 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2009 Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference*, June 2-4, 2009, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2009: 1-2.
- [17] Weber H G, Ludwig R, Ferber S, et al. Ultrahigh-speed OTDM-transmission technology[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4616-4627.
- [18] Jansen S L, Morita I, Schenk T C, et al. Long-haul transmission of 16×52.5 Gbits/s polarization-division-multiplexed OFDM enabled by MIMO processing[J]. *Journal of Optical Networking*, 2008, 7(2): 173-182.
- [19] 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.
- [20] Winzer P J. High-spectral-efficiency optical modulation formats [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(24): 3824-3835.
- [21] Gui C C, Wang J. Experimental performance evaluation of quadrature amplitude modulation signal transmission in a silicon microring [J]. *Photonics Research*, 2016, 4(5): 168-172.
- [22] Gui C C, Li C, Yang Q, et al. Demonstration of terabit-scale data transmission in silicon vertical slot waveguides[J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 9736-9745.
- [23] Du J, Wang J. Design and fabrication of hybrid SPP waveguides for ultrahigh-bandwidth low-penalty terabit-scale data transmission[J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30124-30134.
- [24] Gao G, Luo M, Li X, et al. Transmission of 2.86 Tb/s data stream in silicon subwavelength grating waveguides [J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2918-2927.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Dai D, Fu X, Shi Y, 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Chen S T, Wu H, Dai D X. High extinction-ratio compact polarization beam splitter on silicon [J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(12): 1043-1045.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Chen K, Yu K, He S. High performance polarization beam splitter based on cascaded directional couplers assisted by effectively anisotropic structures [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 1-9.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Dai D, Wang J, Shi Y. 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.
- [41] 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.
- [42] Wildermuth E, Nadler C, Lanker M, et al. Penalty-free polarisation compensation of SiO₂/Si arrayed waveguide grating wavelength multiplexers using stress release grooves [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(17): 1661-1663.
- [43] Sun J, Wu Y D, Wu W F, et al. Optimization of polarization-dependent loss of arrayed waveguide grating demultiplexer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0106003.
孙健, 吴远大, 吴卫锋, 等. 阵列波导光栅解复用器的偏振相关损耗的优化 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0106003.
- [44] 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.
- [45] Cao X P, Zheng S, Zhou N, et al. On-chip multi-dimensional 1 × 4 selective switch with simultaneous mode-/polarization-/wavelength-division multiplexing [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, 56(5): 1-8.
- [46] Zhang Y, Zhang R H, Zhu Q M, et al. Architecture and devices for silicon photonic switching in wavelength, polarization and mode [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 38(2): 215-225.
- [47] Haghghi N, Moser P, Lott J A. 40 Gbps with electrically parallel triple and septuple 980 nm VCSEL arrays [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 38(13): 3387-3394.
- [48] Ma X, Zheng S, Chen Q, et al. High-speed directly modulated cylindrical vector beam lasers [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(12): 3261-3270.
- [49] He M, Xu M, Ren Y, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit/s and beyond [EB/OL]. (2018-07-07) [2021-02-25]. <https://arxiv.org/abs/1807.10362v2>.
- [50] Ayata M, Fedoryshyn Y, Heni W, et al. High-speed plasmonic modulator in a single metal layer [J]. *Science*, 2017, 358(6363): 630-632.
- [51] Zhang J, Kuo B P P, Radic S. 64 Gb/s PAM4 and 160 Gb/s 16QAM modulation reception using a low-voltage Si-Ge waveguide-integrated APD [J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23266-23273.
- [52] Muench J E, Ruocco A, Giambra M A, et al. Waveguide-integrated, plasmonic enhanced graphene photodetectors [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(11): 7632-7644.
- [53] Marchetti R, Lacava C, Carroll L, et al. Coupling strategies for silicon photonics integrated chips [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(2): 201-239.
- [54] Snyder B, O'Brien P. Packaging process for grating-coupled silicon photonic waveguides using angle-polished fibers [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2013, 3(6): 954-959.

- [55] Snyder B, Corbett B, O'Brien P. Hybrid integration of the wavelength-tunable laser with a silicon photonic integrated circuit[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(24): 3934-3942.
- [56] Carroll L, Lee J S, Scarcella C, et al. Photonic packaging: transforming silicon photonic integrated circuits into photonic devices[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(12): 426.
- [57] Barwicz T, Taira Y. Low-cost interfacing of fibers to nanophotonic waveguides: design for fabrication and assembly tolerances[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(4): 1-18.
- [58] Dietrich P I, Blaicher M, Reuter I, et al. *In situ* 3D nanoprinting of free-form coupling elements for hybrid photonic integration[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(4): 241-247.
- [59] Lindenmann N, Balthasar G, Hillerkuss D, et al. Photonic wire bonding: a novel concept for chip-scale interconnects[J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 17667-17677.
- [60] Billah M R, Blaicher M, Hoose T, et al. Hybrid integration of silicon photonics circuits and InP lasers by photonic wire bonding[J]. *Optica*, 2018, 5(7): 876-883.
- [61] Xu Y, Lin J, Dubé-Demers R, et al. Integrated flexible-grid WDM transmitter using an optical frequency comb in microring modulators[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1554-1557.
- [62] El-Fiky E, Samani A, Patel D, et al. 400 Gb/s O-band silicon photonic transmitter for intra-datacenter optical interconnects[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 10258-10268.
- [63] Morsy-Osman M, Sowailem M, El-Fiky E, et al. DSP-free 'coherent-lite' transceiver for next generation single wavelength optical intra-datacenter interconnects[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8890-8903.
- [64] Nagarajan R, Filer M, Fu Y, et al. Silicon photonics-based 100 Gbit/s, PAM4, DWDM data center interconnects[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(7): 25-36.
- [65] Billah M R, Blaicher M, Kemal J N, et al. 8-channel 448 Gbit/s silicon photonic transmitter enabled by photonic wire bonding [C] // *Optical Fiber Communication Conference 2017*, March 19-23, 2017, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2017: Th5D.6.
- [66] Zhang C, Bowers J E. Silicon photonic terabit/s network-on-chip for datacenter interconnection[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 44: 2-12.
- [67] Lal V, Studenkov P, Frost T, et al. 1.6 Tbps coherent 2-channel transceiver using a monolithic Tx/Rx InP PIC and single SiGe ASIC[C] // *2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 1-3.
- [68] Fillion B, Ng W C, Nguyen A T, et al. Wideband wavelength conversion of 16 Gbaud 16-QAM and 5 Gbaud 64-QAM signals in a semiconductor optical amplifier[J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 19825-19833.
- [69] Lu G W, Sakamoto T, Kawanishi T. Wavelength conversion of optical 64 QAM through FWM in HNLF and its performance optimization by constellation monitoring[J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 15-22.
- [70] Furukawa H, Nirmalathas A, Wada N Y, et al. Tunable all-optical wavelength conversion of 160-Gb/s RZ optical signals by cascaded SFG-DFG generation in PPLN waveguide[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(6): 384-386.
- [71] 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.
- [72] Li C, Gui C, Xiao X, et al. On-chip all-optical wavelength conversion of multicarrier, multilevel modulation (OFDM m-QAM) signals using a silicon waveguide[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4583-4586.
- [73] Long Y, Wang Y, Hu X, et al. Channel-selective wavelength conversion of quadrature amplitude modulation signal using a graphene-assisted silicon microring resonator[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 799-802.
- [74] Chen G Y, Yu Y, Sun C L, et al. Phase erasure and wavelength conversion using silicon nonlinear waveguide with reverse biased PIN junctions[C] // *Asia Communications and Photonics Conference 2015*, November 19-23, 2015, Hong Kong, China. Washington, D.C.: OSA, 2015: AS3J.4.
- [75] Long Y, Wang A D, Zhou L J, et al. All-optical wavelength conversion and signal regeneration of PAM-4 signal using a silicon waveguide[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7158-7167.
- [76] Schliesser A, Picqué N, Hänsch T W. Mid-infrared frequency combs[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 440-449.
- [77] Torres-Company V, Weiner A M. Optical frequency comb technology for ultra-broadband radio-frequency photonics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(3): 368-393.

- [78] Fortier T, Baumann E. 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications [J]. *Communications Physics*, 2019, 2(1): 1-16.
- [79] Sakamoto T, Kawanishi T, Izutsu M. Asymptotic formalism for ultraflat optical frequency comb generation using a Mach-Zehnder modulator [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(11): 1515-1517.
- [80] Li W, Wang W T, Sun W H, et al. Generation of flat optical frequency comb using a single polarization modulator and a Brillouin-assisted power equalizer [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(2): 1-8.
- [81] Yang T, Dong J J, Liao S S, et al. Comparison analysis of optical frequency comb generation with nonlinear effects in highly nonlinear fibers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8508-8520.
- [82] Washburn B R, Diddams S A, Newbury N R, et al. Phase-locked, erbium-fiber-laser-based frequency comb in the near infrared [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(3): 250-252.
- [83] Del'Haye P, Schliesser A, Arcizet O, et al. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator [J]. *Nature*, 2007, 450(7173): 1214-1217.
- [84] Griffith A G, Lau R K W, Cardenas J, et al. Silicon-chip mid-infrared frequency comb generation [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1-5.
- [85] Savchenkov A A, Matsko A B, Ilchenko V S, et al. Tunable optical frequency comb with a crystalline whispering gallery mode resonator [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(9): 093902.
- [86] Pfeifle J, Brasch V, Lauermaun M, et al. Coherent terabit communications with microresonator Kerr frequency combs [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(5): 375-380.
- [87] Li S Y, Zhou Y Y, Dong J J, et al. Universal multimode waveguide crossing based on transformation optics [J]. *Optica*, 2018, 5(12): 1549-1556.
- [88] Li S Y, Cai L F, Gao D S, et al. Compact and broadband multimode waveguide bend by shape-optimizing with transformation optics [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1843-1849.
- [89] Sun C, Yu Y, Chen G, et al. Integrated switchable mode exchange for reconfigurable mode-multiplexing optical networks [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(14): 3257-3260.
- [90] Sun C, Wu W, Yu Y, et al. Integrated tunable mode filter for a mode-division multiplexing system [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3658-3661.
- [91] 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.
- [92] Li M H, Sun C L, Zhao J. Novel spot-size converter based on self-focusing effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0413001.
李梦华, 孙崇磊, 赵佳. 基于自聚焦效应的新型模斑变换器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0413001.
- [93] Guo J S, Ye C C, Liu C Y, et al. Ultra-compact and ultra-broadband guided-mode exchangers on silicon [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(7): 2000058.
- [94] Sun C L, Wu W H, Yu Y, et al. De-multiplexing free on-chip low-loss multimode switch enabling reconfigurable inter-mode and inter-path routing [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(9): 1571-1580.
- [95] 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.
- [96] 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.
- [97] 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.
- [98] Meng F, Wang Y X, Mao Q, et al. Design and analysis of controllable polarization beam splitter based on multimode interference structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 051301.
孟方, 王亚新, 毛强, 等. 基于多模干涉结构的可调控偏振分束器设计与分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 051301.
- [99] Guan H, Novack A, Streshinsky M, et al. CMOS-compatible highly efficient polarization splitter and rotator based on a double-etched directional coupler [J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 2489-2496.
- [100] Wu W H, Yu Y, Liu W, et al. Fully integrated CMOS-compatible polarization analyzer [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(3): 467-474.
- [101] Zhou H L, Zhao Y H, Wei Y X, et al. All-in-one silicon photonic polarization processor [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(12): 2257-2267.
- [102] Fang L, Luo H Z, Cao X P, et al. Ultra-directional high-efficiency chiral silicon photonic circuits [J]. *Optica*, 2019, 6(1): 61-66.
- [103] Wang J, Sun J Q, Sun Q Z, et al. PPLN-based flexible optical logic and gate [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(3): 211-213.
- [104] Qiu J F, Sun K, Rochette M, et al. Reconfigurable all-optical multilogic gate (XOR, AND, and OR)

- based on cross-phase modulation in a highly nonlinear fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(16): 1199-1201.
- [105] Dong J, Zhang X, Wang Y, et al. 40 Gbit/s reconfigurable photonic logic gates based on various nonlinearities in single SOA [J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(16): 884-886.
- [106] Hou J, Chen L, Dong W C, et al. 40 Gb/s reconfigurable optical logic gates based on FWM in silicon waveguide [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2701-2711.
- [107] Xu G Y, Chen Y, Li P L. Three-input all-optical AND gate based on two-dimensional photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1013002. 徐光跃, 陈莹, 李培丽. 基于二维光子晶体的三输入全光逻辑与门 [J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1013002.
- [108] Dong W C, Huang Z Y, Hou J, et al. Integrated all-optical programmable logic array based on semiconductor optical amplifiers [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 2150-2153.
- [109] Wang J, Sun J Q, Zhang X L, et al. Ultrafast all-optical three-input Boolean XOR operation for differential phase-shift keying signals using periodically poled lithium niobate [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(13): 1419-1421.
- [110] Dong W C, Lei L, Chen L, et al. All-optical 2×2 -bit multiplier at 40 Gb/s based on canonical logic units-based programmable logic array (CLUS-PLA) [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(20): 5586-5594.
- [111] Long Y, Gui C C, Wang A D, et al. All-optical three-input simultaneous multicasted quaternary addition/subtraction using non-degenerate FWM in a silicon waveguide and 20 Gbit/s QPSK signal [C]// *Optical Fiber Communication Conference*, March 20-22, 2016, Washington, D. C.: OSA, 2016: Th2A.6.
- [112] Gui C, Wang J. Silicon-organic hybrid slot waveguide based three-input multicasted optical hexadecimal addition/subtraction [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7491.
- [113] Yao J P, Zhang W F. Fully reconfigurable waveguide Bragg gratings for programmable photonic signal processing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(2): 202-214.
- [114] 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.
- [115] Cao X P, Zheng S, Long Y, et al. Mesh-structure-enabled programmable multitask photonic signal processor on a silicon chip [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(10): 2658-2675.
- [116] Annoni A, Guglielmi E, Carminati M, et al. Unscrambling light-automatically undoing strong mixing between modes [J]. *Light, Science & Applications*, 2017, 6(12): e17110.
- [117] Zhou H L, Zhao Y H, Wang X, et al. Self-configuring and reconfigurable silicon photonic signal processor [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(3): 792-799.
- [118] Chen H W, Yu Z M, Zhang T, et al. Advances and challenges of optical neural networks [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500004. 陈宏伟, 于振明, 张天, 等. 光子神经网络发展与挑战 [J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500004.
- [119] Shen Y C, Harris N C, Skirlo S, et al. Deep learning with coherent nanophotonic circuits [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(7): 441-446.
- [120] Feldmann J, Youngblood N, Karpov M, et al. Parallel convolutional processing using an integrated photonic tensor core [J]. *Nature*, 2021, 589(7840): 52-58.

On-Chip Integrated Multi-Dimensional Optical Interconnects and Optical Processing

Wang Jian^{*}, Cao Xiaoping, Zhang Xinliang^{**}

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

Abstract

Significance In the past half century, integrated circuits (ICs) supported by complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) technology have developed rapidly, which promotes the continuous progress of modern

information technology. As the feature size of transistors continues to decrease, the semiconductor-manufacturing process is gradually approaching its limit, resulting in slow or even stagnant improvement of integration. Meanwhile, the system performance is seriously restricted, mainly due to the electronic bottleneck. In addition, with the increase in the number of microprocessors and computing speed, power consumption and heat dissipation due to parasitic effects are becoming the main limiting factors. To break through the bottleneck of conventional IC technology in the post-Moore era, optical interconnects are considered to gradually replace conventional electrical interconnects. Compared with electrical signals, using light as the carrier for signal transmission has its unique advantages, such as large bandwidth, low loss, strong anti-electromagnetic interference capability, and high-speed parallel transmission without crosstalk. Therefore, optical interconnects will undoubtedly become the enabling technology for high-speed data transfer. Concurrently, at the network nodes, conventional optical-electrical-optical signal processing is still limited by the electronic bottleneck. Processing signals in the optical domain offer an effective strategy to increase speed. Consequently, on-chip optical interconnects and processing are paramount to the development of modern high-speed and large-capacity communication networks.

The photonic integrated circuit (PIC) is paramount to realize on-chip optical interconnects and processing, which achieves rapid development in recent years. Silicon and III-V are both promising materials for the PIC platform. The main advantage of InP and other III-V materials is that they are direct bandgap materials, which can be used to fabricate semiconductor lasers, amplifiers, modulators, detectors, and other active devices. However, the cost is relatively high and size is relatively large, which limit their large-scale commercialization. By contrast, silicon materials have distinct advantages of large reserves in nature, low cost, almost transparent in the near-infrared and even mid-infrared bands, low loss, and large refractive index contrast of silicon on insulator (SOI), making them suitable for large-scale and high-density integration. Importantly, silicon materials are fully compatible with the existing mature CMOS process, which is essential for developing silicon-based PICs. Since silicon material is an indirect bandgap material, it is impossible to produce high-efficiency light sources. Monolithic integration of all active and passive devices on a single material platform is still challenging. The hybrid integration technology provides a possible solution, which enables the integration of discrete active devices, such as lasers and amplifiers, onto silicon-based passive devices through co-packaging, epitaxial bonding, and monolithic growth to realize low-cost and high-performance hybrid PICs.

Although on-chip optical interconnects and processing are the development trends of high-speed communication networks, the sustainable increase of communication capacity is still crucial in the big data era with increasing capacity demand. Notably, photons have multiple physical dimensions, such as frequency/wavelength, polarization, time, complex amplitude, and spatial structure, which can be developed into multiple multiplexing and advanced modulation technologies, making it possible to realize ultra-high-capacity optical communications and interconnects. Wavelength-division multiplexing (WDM), time-division multiplexing (OTDM), polarization-division multiplexing (PDM), space-division multiplexing, and advanced modulation formats have rapidly developed in the past few decades, significantly increasing the transmission capacity of optical communication systems. Therefore, on-chip optical interconnects and processing should also exploit multiple physical dimensions of photons. Particularly, multiple multiplexing technologies and advanced modulation formats can be combined to effectively increase the number of signal channels and aggregate capacity of on-chip optical interconnects and processing systems.

Progress Here, we give a comprehensive review of on-chip integrated multidimensional optical interconnects and processing (Fig. 1). The main characteristics of on-chip integrated multidimensional optical interconnects and processing are high integration, small footprint, high reliability, high speed, and low loss. The main contents of optical interconnects include on-chip data transmission of multidimensional optical signals (Fig. 2), on-chip multidimensional multiplexing interconnects of optical signals (Fig. 3), key integrated devices for optical interconnects (Fig. 4), heterogeneous waveguide coupling for optical interconnects (Figs. 5–7), and PICs/optical modules for optical interconnects (Fig. 8). The main contents of optical processing include on-chip wavelength conversion (Fig. 9), on-chip optical frequency comb (Fig. 10), on-chip mode processing (Fig. 11), on-chip polarization processing (Fig. 12), on-chip optical logic and computing (Figs. 13–16), on-chip reconfigurable optical processing (Fig. 17), and on-chip intelligent optical processing (Fig. 18).

Conclusions and Prospects With the rapid development of cloud computing and data centers, on-chip integrated optical interconnects and processing have become the key technologies to break through the conventional electronic bottleneck with their unique advantages in integration, speed, bandwidth, power consumption, and multiple physical

dimensions. In this article, we review the key technologies and recent progress of on-chip integrated multidimensional optical interconnects and processing. Looking to the future, one would expect the development trend toward multiple materials (III-V, silicon, silicon nitride, silica, polymer, lithium niobate, and 2D material), integrations (hybrid integration, monolithic integration, and integration of photonics and electronics), physical dimensions (frequency/wavelength, polarization, time, complex amplitude, and spatial structure), frequency bands (O + E + S + C + L + U, visible, mid-infrared, microwave, and terahertz), mediums (chip, fiber, free space, and underwater), functions (multifunction, reconfigurable, programmable, and intelligent), and applications (communications, sensing, measurement, imaging, computing, and quantum) (Fig. 19). One typical example would be ultrahigh capacity silicon-based on-chip multidimensional multiplexing and processing system, which consists of an integrated transmitter, integrated receiver, silicon-based multidimensional multiplexing and processing chip incorporating hybrid wavelength/polarization/mode (de) multiplexer, optical switch array, reconfigurable optical add-drop multiplexer array, variable optical attenuator array, and optical power monitor array (Fig. 20).

Key words optoelectronics; photonic integration; physical dimension; multi-dimensional multiplexing; optical interconnect; optical processing

OCIS codes 250.4390; 060.4230; 200.4650; 200.4740