

doi:10.13756/j.gtxyj.2023.01.001

特邀稿件

欧祥鹏,杨在利,唐波,等. 2.5D/3D硅基光电子集成技术及应用[J]. 光通信研究,2023(1):1-16

OU X P, YANG Z L, TANG B, et al. Silicon Photonic 2.5D/3D Integration Technology and Its Applications[J]. Study on Optical Communications,2023(1):1-16

2.5D/3D 硅基光电子集成技术及应用

欧祥鹏,杨在利,唐波,李志华,罗军,王文武,杨妍

(中国科学院微电子研究所 集成电路先导工艺研发中心,北京 100029)

摘要:全球网络流量急速增长,数据传输所需带宽和能源消耗也随之快速增加,传统电子信息互联架构已无法满足日益增长的带宽和节能降耗的需求。硅基光电子技术具有带宽高、能耗低并且可以利用成熟的互补金属氧化物半导体(CMOS)技术将光子集成电路和电子集成电路大规模集成在硅衬底上等优势,能满足下一代数据传输系统的迫切需求。2.5D/3D硅基光电子集成技术可以有效缩短光芯片和电芯片之间电学互连长度、减小芯片尺寸,从而减小寄生效应、提高集成密度和降低功耗。文章介绍了硅基光电子集成技术的不同方案和最新进展,并展望了硅基光电子芯片结合2.5D/3D集成技术在数据通信、激光雷达、生化传感以及光计算等领域的应用前景。

关键词:光通信;硅光;光电集成;2.5D/3D集成;硅通孔;转接板

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8788(2023)01-0001-16

Silicon Photonic 2.5D/3D Integration Technology and Its Applications

OU Xiang-peng, YANG Zai-li, TANG Bo, LI Zhi-hua, LUO Jun, WANG Wen-wu, YANG Yan

(Integrated Circuit Advanced Process R&D Center, Institute of Microelectronics
of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: With the explosive growth of global network traffic and the consequent increase in bandwidth and energy consumption required for data transmission, traditional electronic interconnection architectures are no longer able to meet the requirement of the growing bandwidth and energy conservation. Silicon-based photonics featured as high bandwidth, low energy consumption, and more importantly, compatibility with Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) technologies enables the large-scale Photonic Integrated Circuits (PIC) and Electronic Integrated Circuits (EIC) to be integrated in a single substrate, hence it is regarded as one of the most promising solutions to address these challenges. However, with the increasing frequency of signals and the increasing number of integrated photonics and electronic devices, parasitic effects are becoming more prominent, leading to a significant degradation in the integration density, bandwidth density, and energy efficiency of the chip. 2.5D/3D integration technologies can effectively reduce the electrical interconnect length and chip size, thus reducing parasitic effects and power consumption, as well as increasing integration density. This paper presents different schemes of silicon based optoelectronic integration and its recent advances, and looks forward to the application prospects of 2.5D/3D integration technologies in data communication, Light Detection and Ranging (LiDAR), biochemical sensing, and optical computing, et al.

Key words: optical communication; silicon photonics; electronic-photonics integration; 2.5D/3D integration; through-silicon-via; interposer

0 引言

从2017到2022年,全球互联网流量以31%的年复合增长率增长了4倍^[1]。随着流量的激增,数据中心的规模不断扩大,相应的能源消耗不断增加。到2030年,全球数据中心的用电量预计将达到3 PWh,最高甚至可能达到8 PWh^[2],相当于80个三峡水电站1年的发电量总和。急剧增长的数据传输流量和能源消耗对传输系统的带宽和功耗提出了严峻的挑战。传统的电子交换技术是基于电子在铜

介质中传导实现的,通常可通过增加输入/输出(Input/Output,I/O)接口的数量和提高数据传输频率来提高整体的带宽密度^[3]。但是由于阻容时间常数(Resistive Capacitive (RC) Time Constant)和电学损耗的存在,信道内的衰减和串扰随着频率的提高而越发明显,导致传输效率下降,基于电子的数据传输系统已无法满足日益增长的带宽以及节能降耗的需求^[4]。

以光子作为信息的载体,实现集成光电子芯片(Electronic-Photonic Integrated Circuit, EPIC)是

收稿日期:2022-10-21

基金项目:国家自然科学基金青年资助项目(61904196);国家自然科学基金面上资助项目(62274179);国家重点研发计划资助项目(2022YFB2802400);国家自然科学基金重点资助项目(62235001)

作者简介:欧祥鹏(1996-),男,广西北海人。博士,主要研究方向为硅基光电子学。

通信作者:杨妍,研究员。E-mail: yyang10@ime.ac.cn

突破目前电子数据交换系统瓶颈的最有潜力的方案。硅基光电子芯片具有带宽宽、体积小和功耗低等优点,并且可以利用现有成熟的互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-oxide-semiconductor, CMOS)工艺平台进行大规模、低成本生产^[5-8]。除此之外,硅基平台还可以与其他多种材料异质集成,例如氮化硅(Si_3N_4)、锗(Ge)和磷化铟(InP)^[9-12]。经过数十年的发展,硅基光电子器件已经取得了许多突破性的进展,矩形硅波导损耗低于 1 dB/cm ^[13],氮化硅波导低于 0.1 dB/m ^[14-15],硅基电光调制器的带宽超过了 110 GHz ^[16],锗硅(Ge-Si)光电探测器的带宽达到了 265 GHz ^[17]。2006年,美国Intel和UCSB的John Bowers课题组联合研发了硅基异质集成的激光器,三五族材料通过直接键合方式集成在硅衬底上,再对其进行工艺加工,实现硅基片上激光器,解决了硅基光电子集成芯片(简称硅光芯片, SiPho chip)上的光源难题^[18];基于这一重大突破,Intel在2016年推出了首个基于硅基光电子技术(简称硅光技术)的 100 Gbit/s 光模块产品,现每年出货超过百万只^[19]。美国Inphi公司于2017年推出了 100 Gbit/s 密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)数据中心光模块^[20]。此外,Cisco、Broadcom和惠普等国际光通信巨头也通过收购、自主研发等手段对硅光投入重金进行研发。近年来,国内多家高校、科研院所和企业也纷纷对硅光技术加大研发力度。2021年,国内首款 1.6 Tbit/s 硅光互连芯片在国家信息光电子创新中心(National Optoelectronics Innovation Center, NOEIC)完成研制^[21]。硅光模块成功应用于数据中心光互连架构中和巨头公司的不断涌入,充分证明了硅基光电子集成芯片在光通信市场中的应用价值^[22-23]。同时,随着硅基光电子技术的不断成熟,其在激光雷达和光计算等领域的应用也越来越受到关注。

本文首先介绍了硅基光电子集成的发展现状,然后介绍了目前主流的光电集成技术方案,并且回顾了每种技术方案的代表性工作和最新进展,最后展望了2.5D/3D硅基光电集成芯片的潜在应用,包括数据通信、激光雷达、光计算以及生化传感等。

1 硅基光电子集成发展现状

随着近年越来越多研发机构和行业巨头的加入,硅基光电子芯片以一种爆发式的速度向前发展:集成器件数目和集成速度不断提高,功耗不断降低,

应用范围从光通信领域向激光雷达^[24-25]、生化传感器^[26]、高性能计算^[27]和人工智能^[28-29]等领域拓展^[30-31],如图1所示。图2展示了包括磷化铟(InP)、硅(Si)、异质集成磷化铟/硅(InP/Si)或异质集成砷化镓/硅(GaAs/Si)3种平台上集成的光子器件数量的演变^[32]。基于硅基平台设计和制备光子集成芯片(Photonic Integrated Circuits, PIC)起源于21世纪初,由于硅和二氧化硅的折射率差大,所以硅光器件尺寸非常紧凑。硅基光电子芯片可以利用先进的CMOS工艺进行加工,因此其集成度快速增长,目前硅基平台单个PIC上的光子器件的数目已经远远超过了从80年代就开始发展的InP平台。InP/Si(或GaAs/Si)异质集成平台因其可以在硅上集成片上激光器和光放大器在近些年备受关注,集

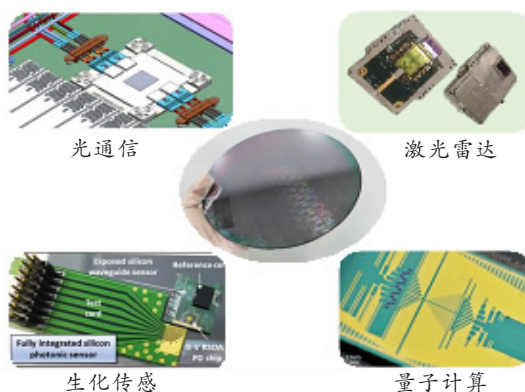


图1 硅基光电子的应用

Figure 1 Application of silicon-based photonics

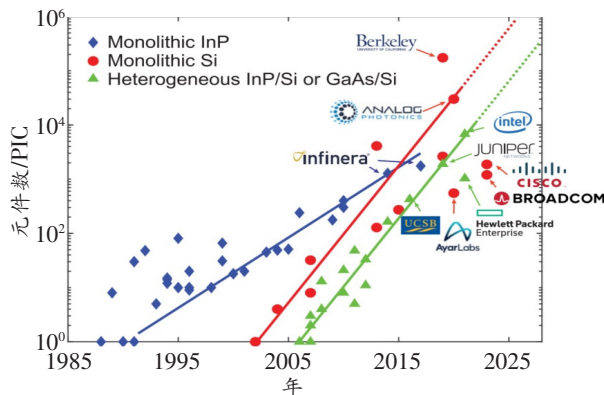


图2 单片PIC在3种不同平台上集成的光子元件数量随时间变化的演变^[22]

Figure 2 The number of photonic components integrated in a single PIC on three different platforms over time^[22]

成器件数量也在急剧增加^[33]。随着集成光电子器件数量的不断增加,光电集成芯片性能在不断提高,新的挑战也随之而来^[34-35]。传统的光电集成芯片的集成方式是PIC和集成电路芯片(Electronic Inte-

grated Circuit, EIC) 在同一个二维(2D)平面通过引线键合(Wire-bonding)的方式实现光信号和电信号的互连和控制^[36]。但是 Wire-bonding 方式的引线较长,会占用比较大的面积,同时当信号频率越来越高时,寄生效应越来越明显,导致芯片的集成密度、带宽密度和能效明显下降。2.5D/3D 集成(目前也被归为光电共封装(Co-packaged Optics, CPO)技术)是缩短互连长度、减小芯片尺寸从而减小寄生效应、提高集成密度和减小功耗的最具潜力的方案之一^[37-39]。2.5D 集成是将 PIC 和 EIC 都通过倒装键合(Flip-chip)的方式集成在转接板(Interposer)上,并通过 Interposer 上的金属布线实现 PIC 和 EIC 之间的电学互连,Interposer 或硅通孔转接板(Through-Silicon-Via (TSV) Interposer, TSI)再与下方的封装基板或印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)相连。3D 集成是将 PIC 直接作为 Interposer 或 TSI,实现和 EIC 的垂直互连。2.5D/3D 集成芯片的尺寸、重量和成本都将下降,功耗也随之降低^[40-41]。图 3 展示了硅基光电子集成技术的发展趋势。

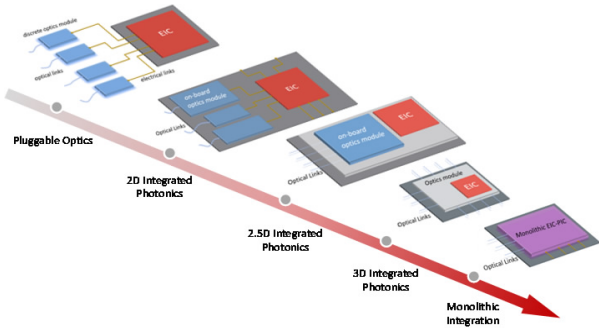


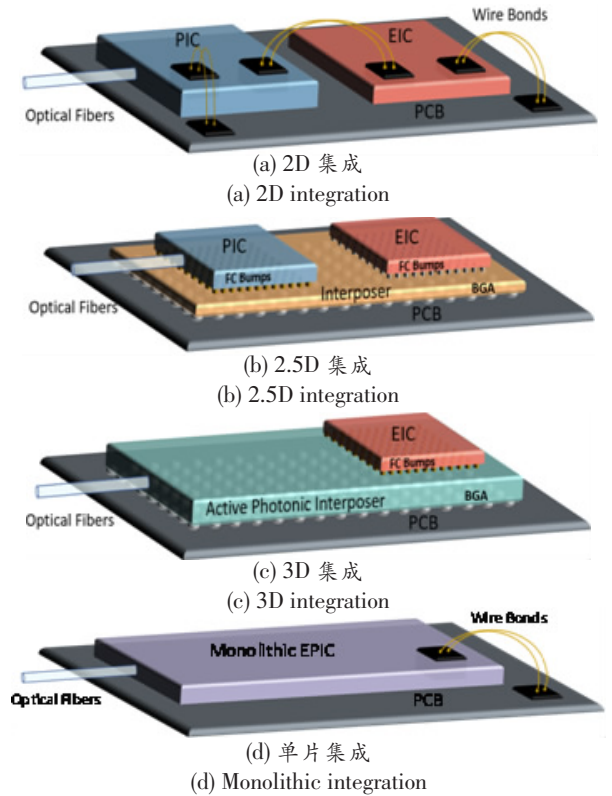
图 3 硅基光电子集成技术的发展趋势
Figure 3 Development trend of silicon-based photonic integration technology

2 硅基光电子集成技术

硅基光电子芯片的集成结构主要分为以下 4 种:2D 平面光电集成、2.5D 光电集成、3D 光电集成和单片光电集成,如图 4 所示^[42]。

2.1 2D 集成

2D 平面光电集成结构如图 4(a)所示,EIC 和 PIC 水平排列封装在 PCB 上,采用 Wire-bonding 的方式实现 PIC 和 EIC 的互连互通,最后通过板上芯片封装(Chips on Board, COB)技术实现 2D 集成。2D 集成的优势在于可以单独设计制备 EIC 和 PIC,具有很高的灵活性。同时,2D 集成封装工艺比较简单,目前已得到广泛商用。但是,EIC 和 PIC 之间的



注:Optical Fibers 为光纤; Wire Bonds 为引线键合; Flip-chip Bumps 为倒装键合; BGA 为球栅阵列封装。

图 4 硅基光电集成结构

Figure 4 Silicon-based photonic integration structure

电学互连较长,当传输高频信号时,信号在传输过程中会发生明显的衰减,导致 2D 集成的光模块性能下降。此外,由于 Wire-bonding 所占的面积比较大,导致光模块整体尺寸和功耗较大。图 5 所示为 2D 集成的硅基光电子芯片。

2009 年,Intel 实现了具有波分复用(Wavelength division multiplexing, WDM)功能的 2D 集成硅光发射器(Transmitter)芯片,如图 5(a)所示^[43]。该芯片的结构由 8 个高速马赫曾德尔电光调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)阵列、复用器(Mux)和解复用器(DeMux)组成,并且单片集成在同一绝缘体上硅(Silicon-on-Insulator, SOI)衬底上。其中,为了实现高速性能,每一个 MZM 的行波电极终端阻抗都经过了优化,以减少射频(Radio Frequency, RF)反射,从而最大程度地保持信号完整性。该发射器采用 2D 光电集成,光芯片位于整个模块的中间,两边分别是 RF 信号输入和热调控模块。光芯片和电芯片通过 Wire-bonding 的方式实现电学互连,整个模块尺寸为 $\sim 8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。每个信道实现了 25 Gbit/s 的数据传输速率,整个光模块的数据传输能力超过 200 Gbit/s,证

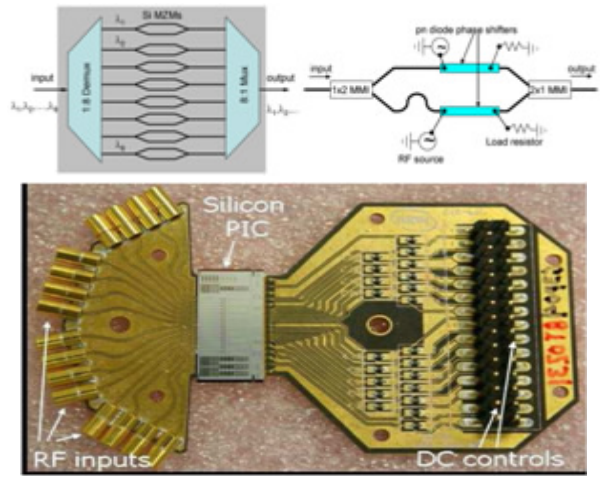
明了硅光技术将来可以应用于 Tbit/s 速率级的数据传输系统。但是基于马赫曾德尔干涉仪 (Mach-Zender Interferometer, MZI) 的光传输模块的体积较大, 功耗较高, 包括射频和热调谐在内的总功率消耗约为 2 W。如何减小尺寸, 提高集成密度, 降低功耗成为硅光芯片未来的重点研究方向。

基于微环谐振器 (Microring Resonator, MRR) 的调制器因其结构紧凑, 驱动电压低, 并且带宽和 MZM 相接近, 成为了下一代更高带宽密度、更高集成密度和更低功耗的光互连系统最有前景的解决方案之一^[46-49]。但由于微环受温度的干扰较大, 基于微环调制器 (Microring Modulator, MRM) 受环境的影响很大。Li Hao 等人利用 MRM 首次实现了在温度波动的环境下, 传输速率能稳定在 5×25 Gbit/s 的硅光发射器^[44], 其结构如图 5(b) 所示。2019 年, 他们在原先的工作基础上进一步利用 MRM 实现了 112 Gbit/s 的四电平脉冲幅度调制 (4 Pulse Amplitude Modulation, PAM4) 硅光发射机, 并且实现了调制器、片上激光器和 CMOS 电芯片的共封装^[45]。如图 5(c) 所示, 光芯片和电芯片在同一个平面上以 Wire-bonding 实现电学互连, 功耗仅为 6 pJ/bit。相比基于 MZM 的硅光发射器功耗得到了明显的下降。

近年来, 硅基光电子芯片也得到国内许多科研院所和企业的高度重视, 图 6 所示为高速集成硅光收发芯片。2014 年北京大学验证了 100 Gbit/s 硅基光收发芯片, 集成了偏振分束器、光栅耦合器、光混频器、调制器和探测器等核心光电器件, 如图 6(a) 所示^[50]。2018 年, NOEIC 及合作单位联合研制的首款具有自主知识产权的 100 Gbit/s 硅基相干光收发芯片, 并实现量产^[51]。2021 年, NOEIC 团队研制出了我国首款 1.6 Tbit/s 硅基光收发芯片, 实现了硅光芯片技术向 Tbit/s 级的跨越。如图 6(b) 所示, 单颗硅基光发射芯片和硅基光接收芯片上分别集成了 8 通道电光调制器和光电探测器, 实现了单通道 200 Gbit/s PAM4 信号传输^[21]。

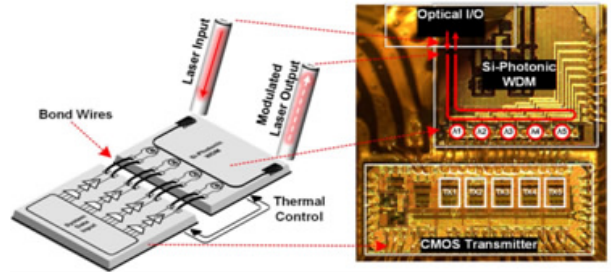
2.2 2.5D 集成

2.5D 集成是 EIC 和 PIC 都通过 flip-chip 的方式集成在 Interposer 上, 并通过 Interposer 上的金属布线实现 PIC 和 EIC 之间的电学互连, Interposer 再与下方的封装基板或 PCB 相连, 其结构示意图如图 4(b) 所示。转接板可以通过两种方式与下方的封装基板或 PCB 相连, 一种是利用 Wire-bonding 使转接板连接到下方的封装基板或 PCB, 另一



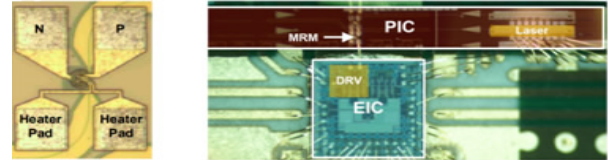
(a) Intel WDM 硅光发射器^[43]

(a) Intel WDM silicon photonic transmitter^[43]



(b) 基于 MRM 的硅光发射器^[44]

(b) Silicon photonic transmitter based on micro-ring modulator^[44]



(c) 112 Gbit/s PAM4 硅光发射机^[45]

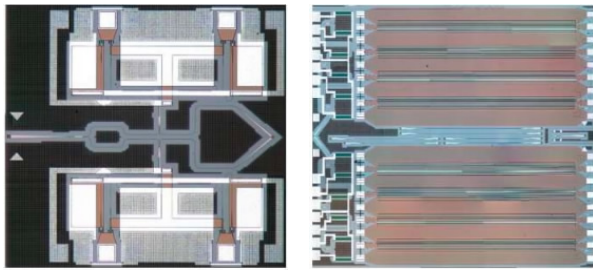
(c) 112 Gbit/s PAM4 silicon photonic transmitter^[45]

图 5 2D 集成的硅基光电子芯片

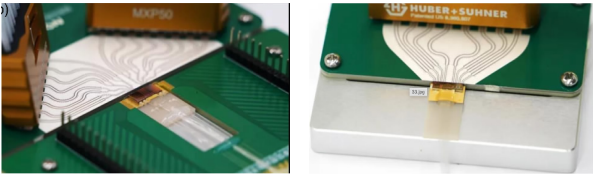
Figure 5 2D integrated silicon-based photonic chip

种是在转接板中制备 TSV, 使其成为 TSI, 上方的 PIC 和 EIC 通过 TSI 垂直连接到封装基板或 PCB。图 7 所示为 2.5D 集成的硅基光电子芯片。

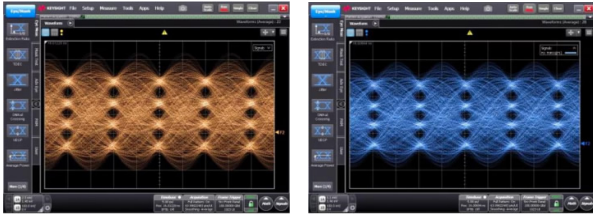
基于 Wire-bonding 的 2.5D 集成技术工艺相对简单, 并且近年来的研究成果展现出了良好的性能。2017 年, 新加坡微电子所 (Institute of Micro Electronics, IME) 实现了一个 2.5D 集成的多通道硅基集成光收发器^[38]。电芯片和光芯片倒装在硅基转接板上, 再通过 Wire-bonding 与底下的 PCB 实现互连, 如图 7(a) 所示。该收发器实现了单通道超过 50 Gbit/s 的传输速率, 通过多通道或者多芯片的共封装, 实现了超过 400 Gbit/s 甚至更高的传输速率。2018 年, Ari Novack 实现了 64 Gbaud 传输速率的集成可调激光器的 2.5D 集成相干硅光收发模块^[52]。光引擎、驱动电路和跨阻放大器 (Trans-im-



(a) 北京大学研制的 100 Gbit/s 硅基光电收发芯片^[50]
(a) 100 Gbit/s silicon-based photonic transceiver chip developed by Peking University^[50]



(b) NOEIC 研制的 1.6 Tbit/s 硅基光发射芯片(左)和接收芯片(右)
(b) 1.6 Tbit/s silicon-based optical transmitter chip (left) and receiver chip (right) developed by NOEIC



(c) 单通道 200 Gbit/s PAM4 硅基光调制器发射眼图(左)和硅基光探测器接收眼图(右)^[21]
(c) Single-channel 200 Gbit/s PAM4 silicon photonic modulator transmitting eye diagram (left) and silicon-based photo-detector receiving eye diagram (right)^[21]

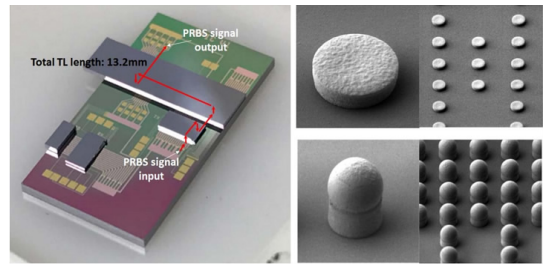
图 6 高速集成硅光收发芯片

Figure 6 High-speed integrated silicon optical transceiver chip

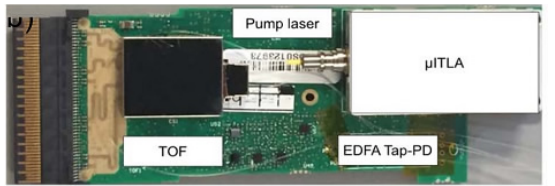
pedance Amplifier, TIA)等被封装到 PCB 上,该相干硅光收发器如图 7(b)所示,其尺寸仅与 1 枚一元硬币相当。

基于 TSI 的互连使电芯片和光芯片与底下载板实现更短电学互连长度和更高的布线密度^[54]。2013 年,佐治亚理工大学在玻璃基板上实现了 2.5D 光电集成芯片^[53]。该方案将 PIC 和 EIC 倒装在玻璃基板上,通过在玻璃转接板上做通孔引出电学信号,其结构示意图如图 7(c)所示。2020 年,Abrams 等人利用在硅转接板上集成多个 PIC 和 EIC 实现了以微盘调制器(Microdisk modulator, MDM)为基础器件的多通道、多芯片的光模块,其中每个传输信道传输速率达到 10 Gbit/s,如图 7(d)所示^[42, 55]。MDM 可以大幅度减小光引擎的尺寸和降低功耗,从而提高集成带宽密度和能效。

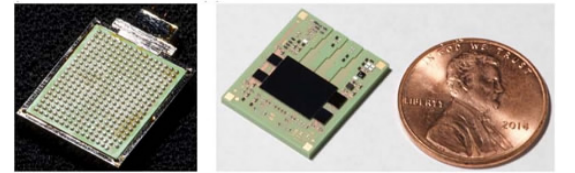
2.5D 集成具有电学互连长度短、互连密度高和功耗低等优点,并且可以实现在同一个载板上放置



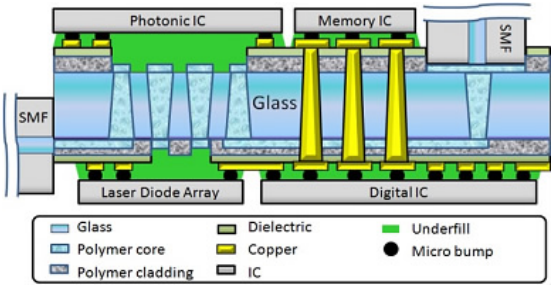
(a) 新加坡 IME 研发的 2.5D 多通道硅基集成光收发器^[38]
(a) 2.5D multi-channel silicon photonic transceiver developed by IME, Singapore^[38]



(b) 64 Gbaud 相干硅光收发模块^[52]

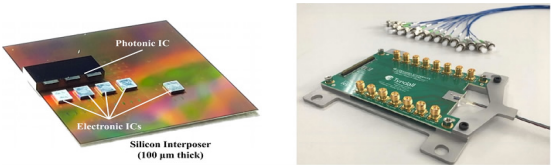


(b) 64 Gbaud coherent silicon photonic transceiver module^[52]



(c) 基于玻璃通孔的 Interposer^[53]

(c) Through-glass-via based Interposer^[53]



(d) 2.5D 多模块集成光模块^[42]

(d) Silicon photonic 2.5D multi-chip module transceiver^[42]

图 7 2.5D 集成的硅基光电子芯片

Figure 7 2.5D integrated silicon photonic chip

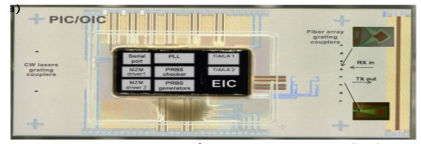
多个 PIC 和 EIC,具有很高的灵活性,可以将更多的功能集成到同一个模块里。但是 2.5D 的电学互连长度会比 3D 集成要长,相应的 RC 时间常数和电学损耗也会增加。2.5D 集成结构被认为是当前技术水平下最合理的集成方案,工艺发展相对成熟,电学互连长度较短,带宽密度较高,很好地平衡了光模块的性能、工艺难度和成本。2021 年,Broadcom 推出了一款用于数据中心的 2.5D 集成的光模块^[56]。该模块采用了光/电共封装的方案,拥有 128 条信道,

单通道传输速率达到 200 Gbit/s, 整体实现了 25.6 Tbit/s 的传输速率, 将光模块的传输速率由百 Gbit/s 向百 Tbit/s 迈进。Broadcom 公司称跟现在的光开关相比, 采用 2.5D/3D 光电共封装的结构可以节约 40% 的功耗和 40% 的 Cost/bit 成本。

2.3 3D 集成

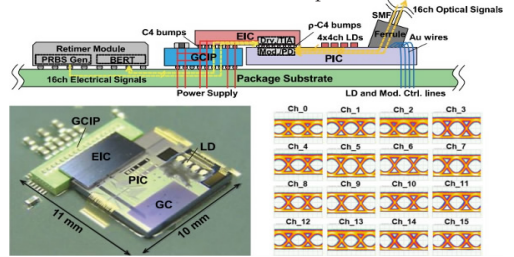
3D 集成方案是将 PIC 直接作为 Interposer, 与 EIC 在垂直方向上实现堆叠, 实现更短的互连长度、更高的集成密度以及更好的高频性能, 如图 4(c) 所示^[57]。一般来说, 3D 光电集成是通过 EIC 倒装在 PIC 的顶部, 再从 PIC 的边缘引线到 PCB 上, 实现光电集成芯片和封装基板或 PCB 的互连。另外, 还可以在 PIC 上直接制备 TSV, 做成有源光子 TSV 转接板 (Active Photonic TSI), 将 EIC 倒装在 PIC 上, 通过 PIC 上的 TSV 与下方封装基板或 PCB 实现垂直互连, 从而进一步缩短电学互连长度。但是硅基光子器件对折射率变化敏感, 在硅光芯片上实现 TSV 金属通孔会引入应力, 从而改变材料的折射率, 需要在设计制备时考虑 TSV 对光子器件性能的影响^[58]。图 8 所示为 3D 集成的硅基光电子芯片。

近年来, 3D 光电集成不断发展, 基于第一种方案的 3D 光电集成芯片越来越成熟。2015 年, Finisar Corp. 的 Gilles Denoyer 等人研发出了传输速率为 56 Gbit/s 的一款不归零码 (Non Return to Zero, NRZ) 3D 集成硅光收发器, 如图 8(a) 所示^[59]。EIC 主要包括了两个 MZM 的驱动和两个发射机和接收机的 TIA/限幅放大器 (Limiting Amplifier, LA), 通过 microbump 与下面的 PIC 相连, 封装好的光模块总功耗为 11.2 pJ/bit。2018 年, 日本富士通公司验证了具有 3D 集成的单通道传输速率超过 25 Gbit/s 的 16 通道硅光收发器, 如图 8(b)^[60] 所示。在该结构中, 一个 EIC 芯片和一个 PIC 芯片通过微凸块 (Microbump)/凸块下金属 (Under Bump Metal, UBM) 直接倒装键合, 最大限度地减少了 EIC 和 PIC 之间的布线长度和寄生电容, 并减轻 TIA 和光电探测器、驱动器和调制器之间电信号的衰减。并且该收发器还利用玻璃转接板支撑键合的 EIC 和 PIC, 利用 solder bumps 实现二者金属互连并利用 Wire-bonding 与 PCB 实现互连。与硅作为转接板相比, 玻璃转接板的电学损耗更小, 但是目前玻璃的加工工艺仍未成熟且玻璃的散热能力比较差。2021 年, 哥伦比亚大学的 Stuart Daudlin 等人利用 DWDM 实现了 64 通道的 3D 集成型的硅光收发器^[61], EIC 通过 flip-chip 键合在 PIC 上, PIC 再

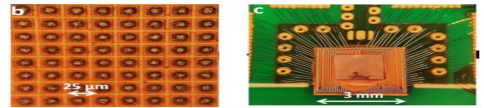


(a) Finisar Corp 的第一款完全 3D 集成的 56 Gbit/s 硅光收发器^[59]

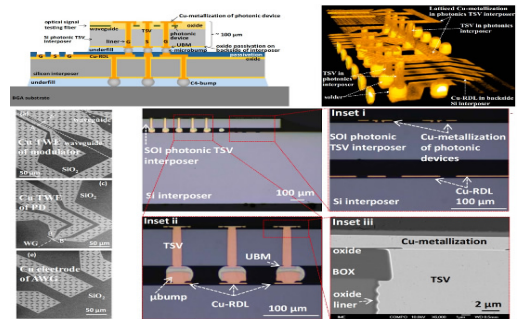
(a) The fully 3D integrated 56 Gbit/s silicon optical transceiver from Finisar Corp^[59]



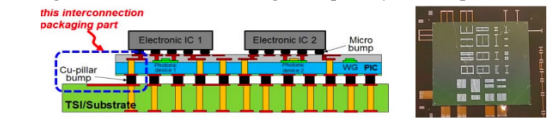
(b) 基于玻璃基板的 16 通道硅光收发器^[60]
(b) 16-channel silicon photonic transceiver based on glass substrate^[60]



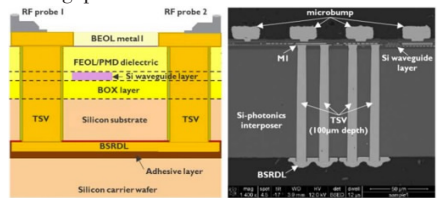
(c) 3D 集成型 DWDM 硅光收发器^[61]
(c) 3D integrated DWDM silicon photonic transceiver^[61]



(d) 基于 SOI 高频有源硅光 TSI 的 3D 光电集成的结构示意图、计算机断层扫描照片、扫描电子显微镜照片、光学显微镜照片^[57]
(d) Schematic, Computed Tomography (CT), Scanning Electron Microscope (SEM), and optical microscope image of 3D integration based on SOI high-frequency active photonic TSI^[57]



(e) 新加坡 IME 基于高频有源硅光 TSI 的 3D 光电集成^[67]
(e) 3D integration based on high-frequency active photonic TSI in Singapore IME^[67]



(f) IMEC 的硅光 TSV 转接板^[68]
(f) TSI based on SOI from IMEC^[68]

图 8 3D 集成的硅基光电子芯片

Figure 8 3D integrated silicon photonic chip

通过 Wire-bonding 连接到 PCB 上, 如图 8(c) 所示。该收发器利用频率梳光源实现 DWDM 和 MRM 高速调制, 180 nm CMOS 工艺实现驱动和放大电路,

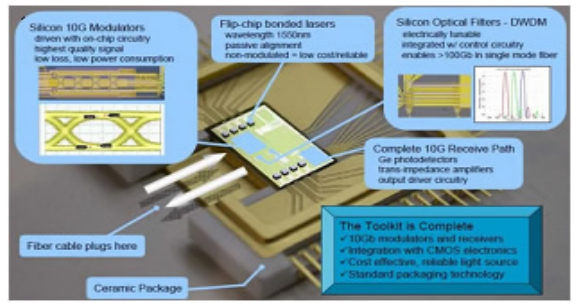
最后通过周期为 $25\ \mu\text{m}$ 的 Cu pillar 实现 PIC 和 EIC 的电学互连。最终利用光电共封装技术 CPO 实现光模块制备,实现面积为 $0.25\ \text{mm}^2$ 的 Tbit/s 级数据传输速率及高达 $5\ \text{Tbit/s/mm}^2$ 的集成带宽密度。利用频率梳光源实现 DWDM 和 3D 集成的方式可以极大地提高光模块的集成带宽密度和降低功耗^[62-64]。

相比于第一种方案,基于有源硅光 TSI 的方案能实现更短的电学互连和更高的集成密度,但其实现的难度也更大。2016 年,新加坡 IME 的 Yang Yan 等人把 TSV 转接板的功能集成到 PIC 中并解决了 TSV 和硅光芯片光耦合之间的制备工艺兼容困难以及 TSV 对光器件性能的影响,如图 8(d) 所示^[37, 65, 66]。该 3D 集成模块中,可调波导阵列光栅 (Silicon Arrayed Waveguide Grating, AWG) 的调节范围超过 $600\ \text{GHz}$,电光调制器带宽超过 $20\ \text{GHz}$,光电探测器的带宽为 $28\ \text{GHz}$,模块整体实现了 $30\ \text{Gbit/s}$ 的数据传输速率。2018 年,新加坡 IME 的 Kim 等人在 SOI 硅光芯片中制备 TSV,将 EIC 倒装键合在硅光芯片上,与 PCB 进行电互连,该结构如图 8(e) 所示^[67]。采用硅光 TSI 的 3D 集成方案具有紧凑封装、更小的外形尺寸和更低的 RF 损耗等优势,其单通道带宽能达到 $50\ \text{GHz}$ 。2021 年,IMEC 也报道了自己在硅光 TSI 方面的研究进展,实现了 $112\ \text{Gbit/s}$ 的 NRZ 传输速率,如图 8(f) 所示^[68]。

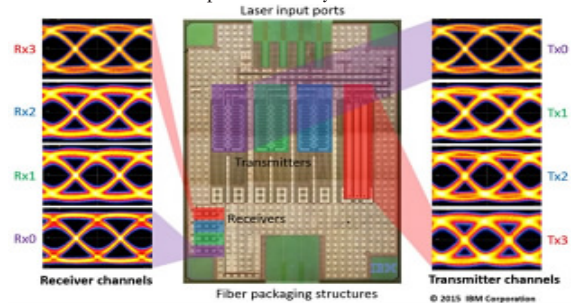
2.4 单片集成

单片集成是指在一个平台上(比如 SOI 衬底)同时制备光器件和电器件,两种器件之间的电学互连通过芯片内部的金属实现,如图 4(d) 所示。单片集成结构因为 PIC 和 EIC 在同一个管芯中, PIC 和 EIC 之间的电学互连大大缩短,从而减小了 RC 时间常数以及电学损耗对信号传输的影响,功耗也得到了降低^[69]。其次,单片集成结构可以最高效率地利用现有的 CMOS 工艺平台,实现低成本的大规模量产^[70-71]。图 9 所示为单片集成的硅基光电子芯片。

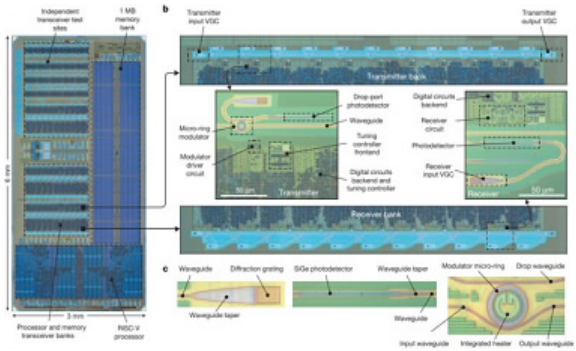
2006 年,Luxtera 研发出了世界上第一款单片集成硅光收发器^[72]。该收发器采用 $0.13\ \mu\text{m}$ CMOS 工艺,在片上集成了 $10\ \text{Gbit/s}$ 硅调制器、高性能的 WDM、 $18\ \text{GHz}$ 锗探测器和 RF 电路和热调直流控制电路,实现了可用于高速光互连的硅光芯片。封装好的硅光收发模块如图 9(a) 所示。2015 年,IBM 利用美国 Global Foundry $90\ \text{nm}$ 工艺技术



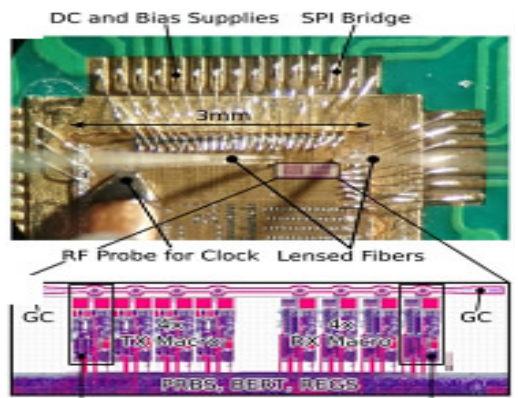
(a) Luxtera 实现的第一款单片集成硅光收发器^[72]
(a) First monolithically integrated silicon photonic transceiver implemented by Luxtera^[72]



(b) 单片集成结构的粗 WDM 收发器^[71]
(b) Coarse WDM monolithically integrated transceiver^[71]



(c) 可用于逻辑运算、存储和通信的光电子芯片^[73]
(c) EPIC for logic computing, memory, and communication^[73]



(d) 基于微环调制器的单片集成的硅光收发器^[74]
(d) Monolithically integrated silicon photonic transceiver based on microring modulator^[74]

图 9 单片集成的硅基光电子芯片

Figure 9 Monolithically integrated silicon photonic chip 在硅光平台上实现了单片集成结构的粗 WDM 收发器,其结构和测试眼图如图 9(b) 所示^[71]。该收发

器每个通道都能实现 25 Gbit/s 的传输速率,整体传输速率超过 100 Gbit/s。同年,美国 UC-Berkeley 和 MIT 的研究组研发出了一款集成了 7 000 多万只晶体管和 850 个光子器件的光电子芯片,如图 9(c)^[73]所示。该芯片可用于逻辑运算、存储和通信。该成果证明了硅光芯片可以与现有的微电子芯片相融合,利用光子在信息传输方面的优越特性能够解决电芯片 I/O 接口所面临的瓶颈,将来可用于数据中心和超级计算机。2021 年,瑞士苏黎世联邦理工大学开发了一款基于 MRM 的单片集成硅光收发器,如图 9(d)^[74],其利用 45 nm “zero change” CMOS 工艺在仅有 0.015 mm² 的尺寸上实现了满足 10 Gbit/s 所需的所有信号发射和接收器件,芯

片带宽密度高达 1.4 Tbit/s/mm²,其功耗仅为 1.91 pJ/bit。

虽然单片集成结构的硅基光电集成芯片具有功耗低、尺寸小和封装简单等优点,但 PIC 和 EIC 的工艺存在一定的差异,想要完全兼容两种器件需要对电路进行协同设计,对工艺进行协同开发,而整个工艺开发的费用是极其昂贵的。并且由于光器件的工艺节点远远落后于电器件,为了单片集成二者,需要在两种器件性能上做一些妥协。单片集成可以最大程度实现光电融合,但若要提高地将光器件和电器件利用 CMOS 工艺单片集成于硅基平台上仍需要学术界和工业界共同努力。表 1 中列出了基于 4 种不同硅基光电子芯片集成技术的部分代表性工作。

表 1 基于 4 种不同集成技术的硅光通信芯片

Table 1 Silicon photonic chips based on four different integration technologies for communication

集成方式	技术成熟度	单通道速率/Gbit/s	调制格式	通道数	尺寸	功耗	调制器类型	参考文献
2D	高	25.0	NRZ	8	8 mm×12 mm	Total ~2W, TX	MZM	[43]
		25.0	NRZ	5	N/A	5.34 pJ/bit, TX	MRM	[44]
		112.0	PAM4	1	N/A	6.00 pJ/bit, TX	MRM	[45]
		1.6 Tbit/s	PAM4	8	N/A	N/A	MZM	[21]
2.5D	中	50.0	NRZ	4	14 mm×8.5 mm	N/A	MZM	[38]
		200.0	QAM	1	21.6 mm×13 mm	Total ~4.9 W	MZM	[75]
		200.0	PAM4	128	N/A	N/A	MZM	[76]
3D	低	56.0	NRZ	2	4 mm×8 mm	11.20 pJ/bit	MZM	[59]
		30	NRZ	1	N/A	N/A	MZM	[37]
		25.0	NRZ	16	10 mm×11 mm	5.91 pJ/bit	MZM	[60]
		100.0	PAM4	4	N/A	N/A	MZM	[67]
		16.0	N/A	64	0.40 mm ² (Si area)	N/A	MDM	[61]
Monolithic	低	10.0	NRZ	4	N/A	65.50 pJ/bit	MZM	[72]
		2.50	NRZ	4	2.9 mm×2.9 mm	1.23 pJ/bit, TX	MRM	[77]
		25.0	NRZ	4	N/A	14.60 pJ/bit	MZM	[78]
		10.0	NRZ	1	0.015 mm ² (Si area)	1.91 pJ/bit	MRM	[74]

注:TX 为发射端;N/A 为 Not available;QAM 为正交幅度调制。

3 2.5D/3D 集成硅基光电子芯片的应用

随着硅光技术的不断成熟和集成工艺技术的不断进步,硅光芯片正在向大规模集成方向发展,单个光芯片集成的光子器件的数量增多和集成密度的提高,其功能也愈加多元化,其应用领域也开始从光通信向激光雷达、生化传感和光计算等领域拓展^[79-80]。在硅光芯片中,许多光器件需要外部电路去调控或者驱动,例如调制器、探测器、移相器和光开关等,因此在大规模集成光器件的同时还需要考虑如何将控制电路与硅光芯片集成,最大程度地发挥硅基光电子芯片的集成优势^[22, 81]。而传统 Wire-bonding 的光

电集成方式已经开始限制硅基光电子大规模集成。

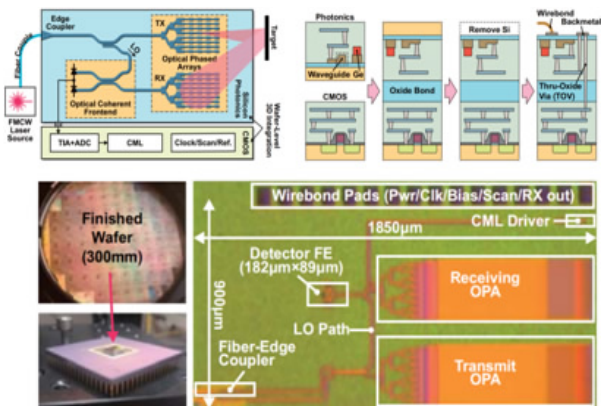
正如前文所述,硅基光电子芯片从传统的基于 Wire-bonding 的 2D 集成向基于 Interposer 或 TSI 的 2.5D/3D 集成发展,以实现更高的集成密度,更小的尺寸,更高的性能以及更低的功耗。在光通信和数据中心的应用中,2.5D/3D 集成的硅基光电子芯片的传输速率已经从 Gbit/s 数量级提升到 Tbit/s 数量级。本节将介绍硅基光电子芯片在激光雷达、生化传感和光计算中的应用,并展望 2.5D/3D 集成技术对于这些应用的潜在优势。

3.1 激光雷达

激光雷达是自动驾驶的核心器件之一,但是目

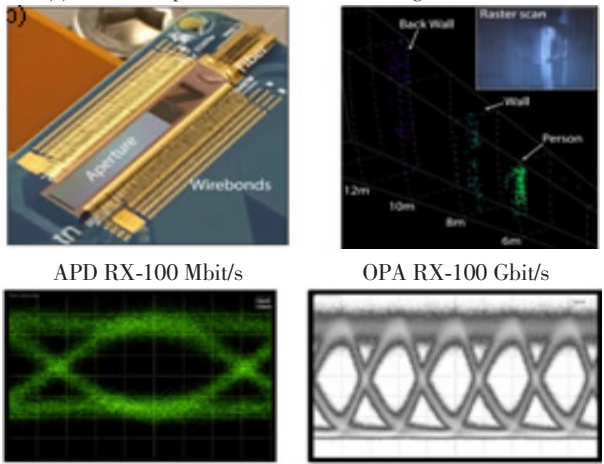
前无论是机械式还是微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 激光雷达的价格都过于昂贵, 并且某些性能指标比如探测距离和速度、分辨率和器件尺寸等无法满足车载激光雷达的性能需求。基于光学相控阵 (Optical Phased Arrays, OPA) 和调频连续波 (Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW) 的激光雷达, 是目前业内认为未来最有前景的解决方案之一, 可以将传统体积较大、价格昂贵的激光雷达在芯片上实现^[82-84]。得益于硅基光子技术在光通信和光互连方向多年的技术积累, 硅基光子集成平台是最有希望实现基于 OPA 的激光雷达的平台之一^[85-87]。图 10 所示为基于硅基 OPA 的激光雷达。

描角度为 $12^\circ \times 12^\circ$ ^[89]。随着学术界和工业界越来越多的研究和投入, 基于硅基光子平台的激光雷达得以快速发展。除了大规模集成 OPA, 还需要在芯片上集成驱动电路、控制电路和接收电路, 以驱动激光器出射频率和波长、控制 OPA 的扫描范围和实现微弱回波信号检测。2019 年, 美国加州大学伯克利分校和麻省理工学院联合研发了第 1 款 3D 集成的 FMCW 相干激光雷达^[90]。如图 10(a) 所示, 该激光雷达将高灵敏度的相干探测器、OPA 和 CMOS 电路集成在一个芯片里, 并且利用 300 mm 的 CMOS 工艺平台实现。在该工艺平台中, 光子器件使用 193 nm 浸没式光刻技术在 300 mm SOI 晶圆上制造, 使用 65 nm 光刻技术在体硅晶圆上制备 CMOS 电路, 然后将 PIC 和 EIC 键合在一起。紧接着去除 SOI 晶圆上的硅衬底, 并用氧化通孔 (Through-oxide Via, TOV) 技术实现光子和 CMOS 器件之间的接触。该激光雷达最终实现了 3.3 cm 的扫描精度。此外, 激光雷达的感知功能可以与无线空间通信功能集成到同一个芯片中, 如图 10(b) 所示^[91]。该 3D 集成的硅基激光雷达芯片可以实现约 180 m 的 2D 探测距离, 约 10 m 的 3D 探测距离并且同时具备 1 Gbit/s 的无线通信能力。在 2021 年的国际消费电子展 (Consumer Electronics Show, CES) 上, Mobile Eye 推出了基于硅光平台的集成式 FMCW 激光雷达, 在一个微小的芯片上实现 184 线扫描^[92]。这个模块集成了激光雷达所需的有源和无源元件及驱动电路, 使基于硅光子的激光雷达在商业化方面迈出了一大步。



(a) 激光雷达结构、工艺流程和 SEM 图^[90]

(a) Structure, process flow and SEM diagram of LiDAR^[90]



(b) 激光雷达实物、测试结果图^[91]

(b) Physical diagram and test results of fabricated LiDAR^[91]

图 10 基于硅基 OPA 的激光雷达

Figure 10 Silicon photonic LiDAR based on OPA

2009 年, 根特大学首次在硅基平台上实现了一维 OPA^[88]。该 OPA 在 1 550 nm 的工作波长实现了 2.3° 的横向扫描范围, 并且通过改变入射波长的办法实现了 14.1° 的纵向扫描范围。2013 年, 麻省理工学院的 Sun 等人实现了第 1 个二维 OPA, 其扫

对于集成大量需要调控的光器件的激光雷达芯片, 2.5D/3D 集成技术可以缩短电学互连长度, 大大减小光电互连的面积, 从而减小激光雷达模块的尺寸、重量和降低成本。因此, 推动硅基 2.5D/3D 集成技术的发展可以促进更大规模的光电器件的集成, 从而实现更高性能的硅基激光雷达芯片。

3.2 光计算

近年来, 随着大数据、云计算、人工智能和图像识别等技术的发展, 对海量的数据进行实时快速处理产生了急切的需求^[31, 93]。但随着晶体管的特征尺寸已经接近摩尔定律的极限, 基于传统微电子芯片的计算机算力已经接近瓶颈。而光子芯片由于光子本身具有传输速度快、低功耗和可并行等优点, 因此光子计算芯片是实现高性能计算的一个非常有潜力的方案^[94-96]。硅基光子计算芯片的主要光学结构包括 MRR^[97-98] 和 MZI^[95, 99]。同时, MRR 或者

MZI 都需要一个匹配的控制电路去实现快速的矩阵操作,例如修改权重等^[100]。图 11 所示为基于硅基光电子技术的光学神经网络芯片。2017 年,MIT 的 Shen 等人在硅基平台上利用 56 个可编程的 MZI 实现了光学神经网络 (Optical Neural Networks, ONN),如图 11(a)所示^[95]。研究人员为了验证其性能,将该芯片应用于元音识别实现了 76.7% 的准确率,证明了利用硅基光电子芯片实现 ONN 是可行的。2021 年,Feldmann 利用 CMOS

集成光子硬件加速器,如图 11(b)所示^[101]。该加速器可以实现多路并行计算,计算能力高达每秒 10^{12} 次成绩累加计算 (Multiply Accumulate, MAC) 运算,图中也展示了其对图像进行处理的结果。2022 年,宾夕法尼亚大学 Aflatouni 等人在硅基平台上实现了深度 ONN,其器件结构和封装成品如图 11(c)所示^[102]。该芯片直接对光信号进行读取和处理,避免了将光信号转换为电信号,并且消除了内存模块,从而大大加快了对信号处理的速度。该芯片可以在 0.5 ns 内实现对手写字母的分类,2 类和 4 类准确率分别高达 93.8% 和 89.8%。

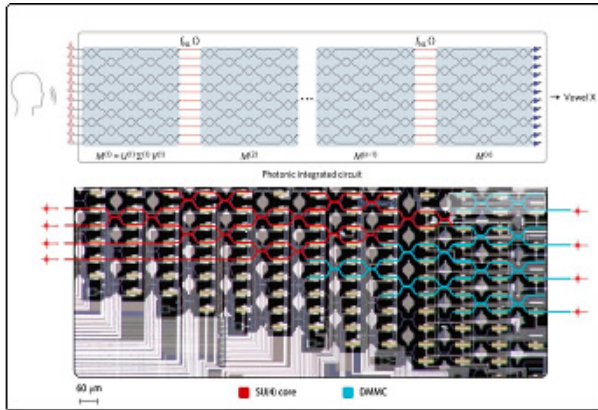
但是上述光子计算芯片采用的是外置的电路驱动和激光器,如果能将激光器和驱动电路通过 2.5D 或者 3D 集成的技术集成到计算芯片上,将会大大缩小光子计算芯片的尺寸和降低芯片整体的功耗,从而集成到现有的计算机上。此外,当矩阵越来越大时,所需要的光器件数量也随之增加,此时通过 Wire-bonding 等传统的方式去实现可编程控制电路是不理想的,其所需面积和功耗都会明显增加。而 2.5D/3D 集成技术可以在很小的尺寸内实现矩阵操作所需要的控制电路,进而获得高集成密度的低功耗硅基光子计算芯片。

光计算是目前研究的热点方向,它与人工智能、脑科学和大数据等行业相关联,又与传统的半导体技术、光电集成技术紧密相关,但是目前相关的研究仍处于初步探索阶段。推动光计算的发展需要半导体材料技术、微电子技术、光子技术、封装技术和算法等多学科共同努力,加速软件与硬件的融合,从而使光计算可以应用于实际,解决目前所面临的算力瓶颈。

3.3 生化传感

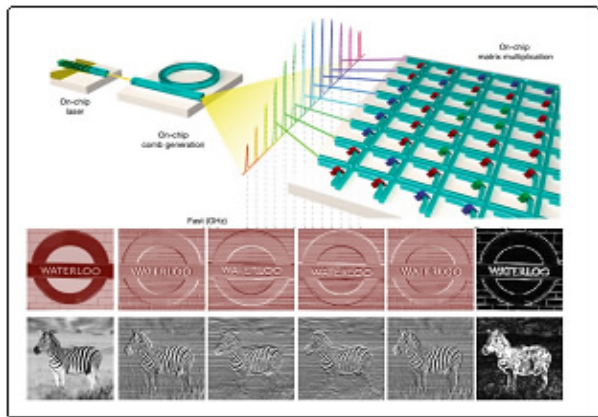
2019 年新冠疫情席卷全球以来,具有生化、健康监测功能的传感设备出现了巨大的市场需求^[103-104]。硅光传感技术因其具有灵敏度高、尺寸小和多功能集成等优点受到了很大的关注。基于硅光平台的传感器主要分为两种,分别是基于光谱和折射率变化。前者是观察吸收光谱和拉曼光谱的变化^[105-106],而后者主要是基于 MRR^[107]、MZI^[108]或者光子晶体^[109]等结构,利用强度或谐振波长的变化将折射率改变提取出来。图 12 所示为基于硅基光电子平台的传感器。

基于折射率改变型的硅光传感器具有灵敏度高和分辨率高等优点,但是其自身无法识别特定的待检测物,需要进行表面功能化修饰。2015 年,Gen-



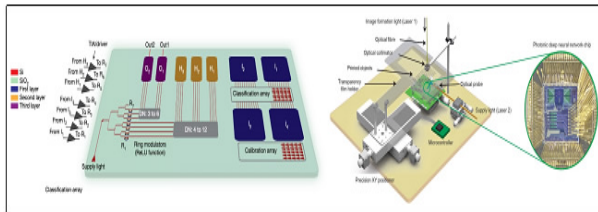
(a) 基于 MZI 光学神经网络芯片^[95]

(a) MZI-based photonic neural network chip^[95]



(b) 基于 PCM 的集成光子硬件加速器^[101]

(b) PCM-based integrated photonic accelerator^[101]



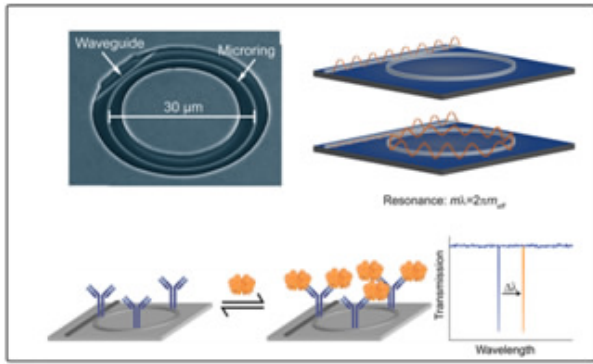
(c) 片上深度 ONN^[102]

(c) On-chip photonic deep ONN^[102]

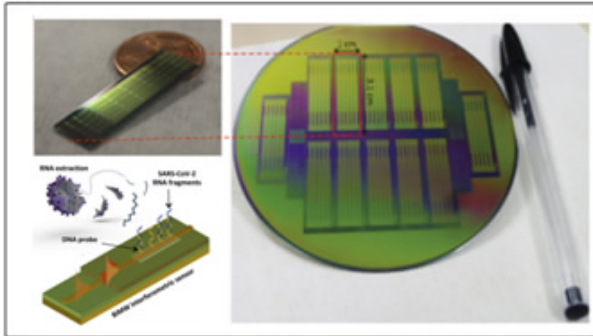
图 11 基于硅基光电子技术的光学神经网络芯片

Figure 11 Silicon photonic neural network chip

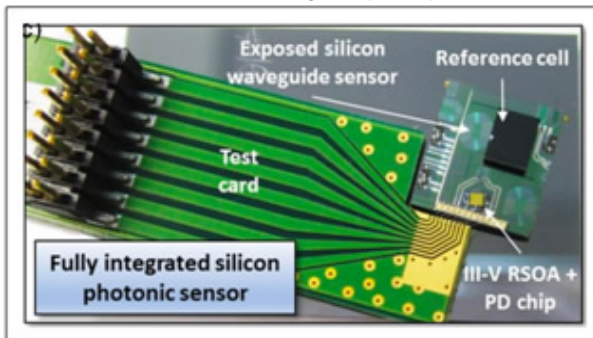
工艺,基于超低损耗的氮化硅波导,在片上集成了光频梳、 16×16 的相变材料 (Phase-change-material, PCM) 记忆矩阵,片上高速调制器和探测器,实现了



(a) Genalyte 生物传感器^[100]
(a) Biosensor from Genalyte^[101]



(b) 基于双模波导 (BiMW) 纳米光子生物传感器^[104]
(b) Nanophotonic biosensor based on Biomodal Waveguide (BiMW)^[104]



(c) IBM 集成硅光甲烷传感器^[112]
(c) Integrated silicon photonic methane sensor from IBM^[112]



(d) Rockley Photonics 血糖监测芯片^[113]
(d) Blood glucose monitoring chip from Rockley Photonics^[113]

图 12 基于硅基光电子平台的传感器
Figure 12 Sensors based on silicon-based optoelectronic platform

Acid, DNA) 的同时检测,如图 12(a)所示^[110-111]。基于该技术,该公司成功实现了在 30 min 内实现对新冠病毒 COVID-19 的检测,并且产业化。但是该传感器仍依赖于外部的激光器和光谱仪,无法实现微型化和便携化。2020 年, Ruiz-Vega 等人提出了一种即时 COVID-19 诊断和冠状病毒监测的纳米光子生物传感器,如图 12(b)所示^[104]。该传感器基于双模波导 (Bimodal Waveguide, BiMW),可在 30 min 内检测到 aM-fM 级别微小浓度的核糖核酸 (Ribonucleic Acid, RNA),其准确度可与基于标准聚合酶链式反应 (Polymerase Chain Reaction, PCR) 的分析仪器相媲美。

基于光谱变化型传感器具有可“识别”待测物的优点,可用于复杂环境的生化传感。2017 年,IBM 实现了首个集成硅光甲烷传感器,如图 12(c)^[26, 112]所示。由于甲烷在 1 651 nm 波长处有吸收峰,IBM 利用先进的 CMOS 技术在 SOI 上制备了长达 10 cm 的波导结构,并且通过倒装键合的方式混合集成了出射波长为 1 651 nm 的片上激光器和其他光子,并且与外部驱动电路等实现封装。该硅光传感器实现了 5 ppmv 的高灵敏度、0.6 mW 的低功耗以及只有 0.25k 美元的单个价格。在性能接近的前提下,实现了远远低于竞品的功耗和价格。2021 年, Rockley Photonics 公司报道了一款可用于血糖、酒精等生物特征进行监测的硅光传感芯片,如图 12(d)所示^[113]。该传感芯片采用频率梳光源和片上光谱仪实现对拉曼散射信号的分析,具有精度高、功耗低并且可以集成到可穿戴设备等优点^[114-115]。

硅光传感器近些年取得了非常显著的进展,已经逐渐开始从实验室走向大众消费市场。采用 2.5D/3D 集成技术将控制电路和分析电路集成到同一个芯片上,可以进一步提高硅光传感器芯片的集成密度,缩小芯片尺寸和降低功耗。硅光传感器尺寸的减小和功耗的降低对于内部空间“寸土寸金”和续航能力有限的可穿戴设备具有重要的意义。若能实现 2.5D/3D 集成的硅光传感器,将能极大地推动其在可穿戴设备内的实际应用。

除了以上 3 种应用,硅基光电子芯片还可以用于光子芯片和量子信息处理等领域,并且已经取得了许多突破性的进展^[116-117],而这些应用需要庞大而复杂的控制电路,因此 2.5D/3D 硅基光电子集成技术对这些应用的发展有着关键的作用。

4 结束语

本文针对 2.5D/3D 硅基光电集成技术面向数

lyte 在 MRR 表面形成生物功能修饰,实现了对多种蛋白质和脱氧核糖核酸 (Deoxyribo Nucleic

据交换中传输带宽高、传输速率快和功耗低等需求,对硅光集成方案进行了介绍和总结。2.5D/3D集成不仅可以缩短光芯片和电芯片之间的互连长度,从而减小寄生效应,提高芯片的集成密度和性能,还可以使芯片封装的尺寸、重量下降,整体的功耗也随之减小。此外,回顾了硅基光电子技术在通信、激光雷达、光计算和生化传感方面的最新进展及其巨大的商业价值。同时,展望了这些芯片的关键性能可以利用2.5D/3D硅基光电集成技术得到大幅提升。未来,随着2.5D/3D硅基光电集成技术的发展,必将推动这些应用向高密度集成、高性能、低功耗和低成本方向发展,从而促进信息社会的进步。

参考文献:

- [1] Cisco Annual Internet Report (2018-2023) White Paper[R]. US: Cisco, 2020.
- [2] Andrae A S G, Edler T. On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030 [J]. *Challenges*, 2015, 6(1): 117-157.
- [3] Young I A, Mohammed E, Liao J T S, et al. Optical I/O Technology for Tera-scale Computing [J]. *IEEE Journal of Solid-state Circuits*, 2010, 45(1): 235-248.
- [4] 王兴军, 苏昭棠, 周治平. 硅基光电子学的最新进展 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2015(1): 1-31. Wang X J, Su Z T, Zhou Z P. Silicon-based Optoelectronics: Progress towards Large Scale Optoelectronic Integration and Applications [J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2022, 15(1): 1-31.
- [5] Kimerling L C, Ahn D, Apsel A B, et al. Electronic-photonic Integrated Circuits on the CMOS Platform [C]//Conference on Silicon Photonics. CA, US: Massachusetts Institute of Technology, 2006: 20060125-20060126.
- [6] Nagarajan R, Joyner C H, Schneider R P, et al. Large-scale Photonic Integrated Circuits [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electron*, 2005, 11(1): 50-65.
- [7] Koch T L, Koren U. Semiconductor Photonic Integrated Circuits [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1991, 27(3): 641-653.
- [8] Yang Y, Fang Q, Yu M, et al. High-efficiency Si Optical Modulator Using Cu Travelling-wave Electrode [J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29978-29985.
- [9] Liang D, Bowers J E. Recent Progress in Lasers on Silicon [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(8): 511-517.
- [10] Liang D, Bowers J E. Recent Progress in Heterogeneous III-V-on-Silicon Photonic Integration [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(1): 59-83.
- [11] Xiang C, Jin W, Huang D, et al. High-Performance Silicon Photonics Using Heterogeneous Integration [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(3): 1-15.
- [12] Zhou Z, Yin B, Michel J. On-chip Light Sources for Silicon Photonics [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(11): e358.
- [13] Baets R, Subramanian A Z, Clemmen S, et al. Silicon Photonics: Silicon Nitride Versus Silicon-on-insulator [C]//Optical Fiber Communications Conference 2016. CA, US: Optica Publishing Group, 2016: Th3J. 1.
- [14] Roeloffzen C G H, Hoekman M, Klein E J, et al. Low-Loss Si₃N₄ TriPlex Optical Waveguides: Technology and Applications Overview [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(4): 1-21.
- [15] Morichetti F, Melloni A, Martinelli M, et al. Box-Shaped Dielectric Waveguides: A New Concept in Integrated Optics? [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(9): 2579-2589.
- [16] Han C, Jin M, Tao Y, et al. Ultra-compact Silicon Modulator with 110 GHz Bandwidth [C]//Optical Fiber Communications Conference 2022. San Diego, CA, US: OSA, 2022: Th4C. 5.
- [17] Lischke S, Peczek A, Morgan J S, et al. Ultra-fast Germanium Photodiode with 3-dB Bandwidth of 265 GHz [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(12): 925-931.
- [18] Fang A W, Park H, Cohen O, et al. Electrically Pumped Hybrid AlGaInAs-silicon Evanescent Laser [J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9203-9210.
- [19] Jones R, Doussiere P, Driscoll J B, et al. Heterogeneously Integrated InP/Silicon Photonics: Fabricating Fully Functional Transceivers [J]. *IEEE Nanotechnology Magazine*, 2019, 13(2): 17-26.
- [20] Chang F, Sun Y, Lingle R, et al. First Demonstration of PAM4 Transmissions for Record Reach and High-capacity SWDM Links over MMF Using 40G/100G PAM4 IC Chipset with Real-time DSP [C]//Optical Fiber Communications Conference 2017. Los Angeles, USA: OSA, 2017: Tu2B. 2.
- [21] NOEIC. 国内首款 1.6 Tbit/s 硅光互连芯片在 NOEIC 完成研制 [EB/OL]. (2021-12-24) [2022-10-21]. <http://www.noeic.com/show-14-272.html>. NOEIC. The First 1.6 Tbit/s Silicon Photonic Interconnect Chip was Developed in NOEIC [EB/OL]. (2021-12-24) [2022-10-21]. <http://www.noeic.com/show-14-272.html>.
- [22] Margalit N, Xiang C, Bowers S M, et al. Perspective on

- the Future of Silicon Photonics and Electronics[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(22):220501.
- [23] Won R, Paniccia M. Integrating Silicon Photonics[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(8):498–499.
- [24] Hsu C P, Li B, Solano-Rivas B, et al. A Review and Perspective on Optical Phased Array for Automotive LiDAR[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27(1):1–16.
- [25] Xie W, Komljenovic T, Huang J, et al. Heterogeneous Silicon Photonics Sensing for Autonomous Cars[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3):3642–3663.
- [26] Tombez L, Zhang E J, Orcutt J S, et al. Methane Absorption Spectroscopy on a Silicon Photonic Chip[J]. *Optics*, 2017, 4(11):1322–1325.
- [27] Zhou H L, Dong J J, Cheng J W, et al. Photonic Matrix Multiplication Lights up Photonic Accelerator and beyond[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 11(2):158–178.
- [28] Hughes T W, Minkov M, Shi Y, et al. Training of Photonic Neural Networks Through in Situ Backpropagation and Gradient Measurement[J]. *Optica*, 2018, 5(7):864.
- [29] Xiao X, On M B, Van Vaerenbergh T, et al. Large-scale and Energy-efficient Tensorized Optical Neural Networks on III-V-on-silicon MOSCAP Platform[J]. *APL Photonics*, 2021, 6(12):126107.
- [30] Chen Z G, Segev M. Highlighting Photonics: Looking into the Next Decade[J]. *eLight*, 2021, 1(1):2.
- [31] Helkey R, Saleh A A M, Buckwalter J, et al. High-Performance Photonic Integrated Circuits on Silicon[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(5):1–15.
- [32] Norman J C, Jung D, Wan Y, et al. Perspective: The Future of Quantum Dot Photonic Integrated Circuits[J]. *Apl Photonics*, 2018, 3(3):030901.
- [33] Shang C, Wan Y, Selvidge J, et al. Perspectives on Advances in Quantum Dot Lasers and Integration with Si Photonic Integrated Circuits[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(9):2555–2566.
- [34] Thomson D, Zilkie A, Bowers J E, et al. Roadmap on Silicon Photonics[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(7):073003.
- [35] Atabaki A H, Moazeni S, Pavanello F, et al. Integrating Photonics with Silicon Nanoelectronics for the Next Generation of Systems on a Chip[J]. *Nature*, 2018, 556(7701):349–354.
- [36] Sousa I D, Achard L. The Future of Packaging with Silicon Photonics [EB/OL]. (2016-02-01) [2022-10-21]. <https://www.ibm.com/downloads/cas/M0NL8N85>.
- [37] Yang Y, Yu M B, Fang Q, et al. 3D Silicon Photonics Packaging based on TSV Interposer for High Density On-board Optics Module[C]//2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). Las Vegas, USA:IEEE, 2016:483–489.
- [38] Kim D W, Au K Y, Luo H Y L X, et al. 2.5 D Silicon Optical Interposer for 400 Gbps Electronic-photonic Integrated Circuit Platform Packaging[C]//2017 IEEE 19th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC). Singapore:IEEE, 2017:1–4.
- [39] Yu M B, Yang Y, Fang Q, et al. 3D Electro-optical Integration based on High-performance Si Photonics TSV Interposer[C]//Optical Fiber Communications Conference 2016. CA, USA:Optica Publishing Group, 2016:1–3.
- [40] Urino Y, Shimizu T, Okano M, et al. First Demonstration of High Density Optical Interconnects Integrated with Lasers, Optical Modulators, and Photodetectors on Single Silicon Substrate[J]. *Optics Express*, 2011, 19(26):B159–B165.
- [41] Williams K A. Prospects for Electronic Photonic Integration[C]//Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics 2017. New Orleans, US:OSA, 2017:IW3A.1.
- [42] Abrams N C, Cheng Q, Glick M, et al. Silicon Photonic 2.5 D Multi-chip Module Transceiver for High-performance Data Centers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(13):3346–3357.
- [43] Liu A, Liao L, Chetrit Y, et al. Wavelength Division Multiplexing based Photonic Integrated Circuits on Silicon-on-insulator Platform[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 16(1):23–32.
- [44] Li H, Xuan Z, Titriku A, et al. A 25 Gb/s, 4.4 V-swing, AC-coupled Ring Modulator-based WDM Transmitter with Wavelength Stabilization in 65 nm CMOS[J]. *IEEE Journal of Solid-state Circuits*, 2015, 50(12):3145–3159.
- [45] Li H, Balamurugan G, Sakib M, et al. A 112 Gb/s PAM4 Transmitter with Silicon Photonics Microring Modulator and CMOS Driver[C]//Optical Fiber Communications Conference 2019. San Diego, USA:IEEE, 2019:Th4A.4.
- [46] Sun J, Kumar R, Sakib M, et al. A 128 Gb/s PAM4 Silicon Microring Modulator with Integrated Thermo-Optic Resonance Tuning[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(1):110–115.
- [47] Li H, Balamurugan G, Sakib M, et al. A 112 Gb/s PAM4 Silicon Photonics Transmitter with Microring

- Modulator and CMOS Driver[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(1):131–138.
- [48] Ahmed A H, Sharkia A, Casper B, et al. Silicon-photonics Microring Links for Datacenters-challenges and Opportunities[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(6):94–203.
- [49] Sakib M, Kumar R, Ma C, et al. A 240 Gb/s PAM4 Silicon Micro-ring Optical Modulator[C]//*Optical Fiber Communications Conference 2022*. San Diego, CA, US: OSA, 2022:01–03.
- [50] 周治平, 杨丰赫, 陈睿轩, 等. 硅基光电子: 微电子与光电子的交融点[J]. *微纳电子与智能制造*, 2019(3):12. Zhou Z P, Yang F H, Chen R X, et al. Silicon Photonics—a Converging Point of Microelectronics and Optoelectronics[J]. *Micro/nano Electronics and Intelligent Manufacturing*, 2019(3):12.
- [51] NOEIC. 100G 硅光收发芯片正式投产使用[EB/OL]. (2018-08-30)[2022-10-21]. <http://www.noeic.com/show-14-35.html>.
NOEIC. 100G Silicon Photonic Transceiver Chips are formally Produced and Operated[EB/OL]. (2018-08-30)[2022-10-21]. <http://www.noeic.com/show-14-35.html>.
- [52] Novack A, Streshinsky M, Huynh T, et al. A Silicon Photonic Transceiver and Hybrid Tunable Laser for 64 Gbaud Coherent Communication[C]//*Optical Fiber Communication Conference 2018*. San Diego, USA: IEEE, 2018: Th4D. 4.
- [53] Chou B C, Sato Y, Sukumaran V, et al. Modeling, Design, and Fabrication of Ultra-high Bandwidth 3D Glass Photonics (3DGP) in Glass Interposers[C]//*IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference*. Las Vegas, USA: IEEE, 2013:286–291.
- [54] Thor L S, Yu L H, Ching J M, et al. Silicon Optical Interposer for EPIC 2. 5D Integration[C]//*Asia Communications and Photonics Conference/International Conference on Information Photonics and Optical Communications 2020 (ACP/IPOC)*. Beijing, China: IEEE, 2020:T3G. 1.
- [55] Abrams N C, Cheng Q, Glick M, et al. Silicon Photonic 2. 5D Integrated Multi-Chip Module Receiver[C]//*Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2020*. San Jose, CA, USA: IEEE, 2020:1–2.
- [56] Johnson J E, Bacher K, Schaevitz R, et al. Performance and Reliability of Advanced CW Lasers for Silicon Photonics Applications[C]//*Optical Fiber Communications Conference 2022*. San Diego, CA, US: OSA, 2022:1–27.
- [57] Snyder B, Mangal N, Lepage G, et al. Packaging and Assembly Challenges for 50 G Silicon Photonics Interposers[C]//*Optical Fiber Communication Conference 2018*. San Diego, USA: IEEE, 2018:1–3.
- [58] Yang Y, Yu M, Rusli, et al. Through-Si-via (TSV) Keep-Out-Zone (KOZ) in SOI Photonics Interposer: A Study of the Impact of TSV-Induced Stress on Si Ring Resonators[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(6):2700611.
- [59] Denoyer G, Chen A, Park B, et al. Hybrid Silicon Photonic Circuits and Transceiver for 56 Gb/s NRZ 2.2 km Transmission over Single Mode Fiber[C]//*The European Conference on Optical Communication (ECOC) 2014*. Cannes, France: IEEE, 2014:1–3.
- [60] Aoki T, Sekiguchi S, Simoyama T, et al. Low-crosstalk Simultaneous 16-channel \times 25 Gb/s Operation of High-density Silicon Photonics Optical Transceiver[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(5):1262–1267.
- [61] Daudlin S, Rizzo A, Abrams N C, et al. 3D-integrated Multichip Module Transceiver for Terabit-scale Dwdm Interconnects[C]//*Optical Fiber Communication Conference 2021*. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2021: Th4A. 4.
- [62] Rizzo A, Dai L Y, Meng X, et al. Ultra-low Power Consumption Silicon Photonic Link Design Analysis in the AIM PDK[C]//*In Optical Interconnects XIX 2019*. San Francisco, CA; USA: SPIE, 2019:31–36.
- [63] Malik A, Liu S, Timurdogan E, et al. Low Power Consumption Silicon Photonics Datacenter Interconnects Enabled by a Parallel Architecture[C]//*Optical Fiber Communication Conference 2021*. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2021: W6A. 3.
- [64] Dumont M, Liu S, Kennedy M, et al. High-efficiency Quantum Dot Lasers as Comb Sources for DWDM Applications[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(4):1836.
- [65] Yang Y. Development of 3D Electro-optical Integration based on Silicon Photonic TSV Interposer[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2016.
- [66] Yang Y, Rusli, Yu M. RF Modeling of the 3D Electro-Photonic Integration based on SOI Photonic TSV Interposer[C]//*IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC) 2019*. Xi'an, China: IEEE, 2019:1–2.
- [67] Kim D W, Yu L H, Chang K F, et al. 3D System-on-Packaging Using Through Silicon Via on SOI for High-Speed Optical Interconnections with Silicon Photonics Devices for Application of 400 Gbps and Beyond[C]//*IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC) 2018*. San Diego, CA, USA:

- IEEE, 2018: 834—840.
- [68] Miyaguchi K, Ban Y, Pantano N, et al. 110 GHz Through-Silicon Via's Integrated in Silicon Photonics Interposers for Next-Generation Optical Modules[C]//European Conference on Optical Communication (ECOC)2021. Bordeaux, France; IEEE, 2021: 1—4.
- [69] Orcutt J S, Gill D M, Proesel J, et al. Monolithic Silicon Photonics at 25 Gb/s[C]//Optical Fiber Communications Conference 2016. CA, US: Optica Publishing Group, 2016: 1—3.
- [70] Stojanovic V, Ram R J, Popovic M, et al. Monolithic Silicon-photonics Platforms in State-of-the-art CMOS SOI processes[J]. Optics Express, 2018, 26(10): 13106—13121.
- [71] Gill D M, Xiong C, Proesel J E, et al. Demonstration of Error Free Operation up to 32 Gbit/s From a CMOS Integrated Monolithic Nano-Photonic Transmitter[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2015. San Jose, CA, USA; IEEE, 2015: ST4F. 3.
- [72] Gunn C. CMOS Photonics for High-speed Interconnects[J]. IEEE Micro, 2006, 26(2): 58—66.
- [73] Sun C, Wade M T, Lee Y, et al. Single-chip Microprocessor that Communicates Directly Using Light[J]. Nature, 2015, 528(7583): 534—538.
- [74] Eppenberger M, Bonomi M, Moor D, et al. Compact Optical TX and RX Macros for Computercom Monolithically Integrated in 45 nm CMOS[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(21): 6869—6879.
- [75] Doerr C, Heanue J, Chen L, et al. Silicon Photonics Coherent Transceiver in a Ball-grid Array Package[C]//Optical Fiber Communications Conference 2017. Los Angeles, USA; OSA, 2017: 1—3.
- [76] Muth K, Raghuraman V, Raghunathan V. Paradigm Shift in High-speed Interface Technology[J]. SPIE, 2022.
- [77] Moss B R, Sun C, Georgas M, et al. A 1.23 pJ/b 2.5 Gbit/s Monolithically Integrated Optical Carrier-injection Ring Modulator and All-digital Driver Circuit in Commercial 45 nm SOI[C]//IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers 2013. San Francisco, CA, USA; IEEE, 2013: 126—127.
- [78] Feilchenfeld N B, Anderson F G, Barwicz T, et al. An Integrated Silicon Photonics Technology for O-band Datacom[C]//IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) 2015. Washington, DC, USA; IEEE, 2015: 25.7.1—25.7.4.
- [79] Thomson D, Zilkie A, Bowers J E, et al. Roadmap on Silicon Photonics[J]. Journal of Optics, 2016, 18(7): 1—20.
- [80] Siew S Y, Li B, Gao F, et al. Review of Silicon Photonics Technology and Platform Development[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(13): 4374—4389.
- [81] Mekis A, Pinguet T, Masini G, et al. Advanced Silicon Photonics Transceivers[J]. Silicon Photonics Iii: Systems and Applications, Pavesi, 2016, 122: 349—374.
- [82] McKinzie K A, Wang C, Noman A A, et al. InP High Power Monolithically Integrated Widely Tunable Laser and SOA Array for Hybrid Integration[J]. Optics Express, 2021, 29(3): 3490—3502.
- [83] Wang Q, Wang S, Jia L, et al. Silicon Nitride Assisted 1×64 Optical Phased Array based on a SOI Platform[J]. Optics Express, 2021, 29(7): 10509—10517.
- [84] Kim T, Ngai T, Timalisina Y, et al. A Single-Chip Optical Phased Array in a Wafer-Scale Silicon Photonics/CMOS 3D-Integration Platform[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019, 54(11): 3061—3074.
- [85] Sun X C, Zhang L X, Zhang Q H, et al. Si Photonics for Practical LiDAR Solutions[J]. Applied Sciences-Basek, 2019, 9(20).
- [86] Martin A, Verheyen P, De Heyn P, et al. Photonic Integrated Circuit-based FMCW Coherent LiDAR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4640—4645.
- [87] Doylend J K, Gupta S. An Overview of Silicon Photonics for LIDAR[C]//SPIE OPTO 2020. San Francisco, CA, US; SPIE, 2020: 112850J.
- [88] Van Acoleyen K, Bogaerts W, Jagerska J, et al. Off-chip Beam Steering with a One-dimensional Optical Phased Array on Silicon-on-insulator[J]. Optics Letters, 2009, 34(9): 1477—1479.
- [89] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale Nanophotonic Phased Array[J]. Nature, 2013, 493(7431): 195—199.
- [90] Bhargava P, Kim T, Poulton C V, et al. Fully Integrated Coherent LiDAR in 3D-Integrated Silicon Photonics/65 nm CMOS[C]//Symposium on VLSI Circuits 2019. Kyoto, Japan; IEEE, 2019: C262—C263.
- [91] Poulton C V, Byrd M J, Russo P, et al. Long-Range LiDAR and Free-Space Data Communication with High-Performance Optical Phased Arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(5): 1—8.
- [92] Intel. Mobileye Innovation Will Bring AVs to Everyone, Everywhere[EB/OL]. (2021-01-11)[2022-10-21]. <https://www.intel.com/content/www/us/en/newsroom/news/ces-2021-mobileye-avs-on-move.html>

- # gs. h4zpy8.
- [93] Dong P, Chen Y K, Duan G H, et al. Silicon Photonic Devices and Integrated Circuits [J]. *Nanophotonics*, Aug, 2014, 3(4-5):215–228.
- [94] Bieren K V. Lens Design for Optical Fourier Transform Systems [J]. *Applied Optics*, 1971, 10(12):2739–2742.
- [95] Shen Y, Harris N C, Skirlo S, et al. Deep Learning with Coherent Nanophotonic Circuits [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(7):441–446.
- [96] Bernstein L, Sludds A, Hamerly R, et al. Freely Scalable and Reconfigurable Optical Hardware for Deep Learning [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1):3144.
- [97] Dong P. Silicon Photonic Integrated Circuits for Wavelength-Division Multiplexing Applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electron.*, 2016, 22(6):370–378.
- [98] Chang L, Liu S, Bowers J E. Integrated Optical Frequency Comb Technologies [J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(2):95–108.
- [99] Reck M, Zeilinger A, Bernstein H J, et al. Experimental Realization of any Discrete Unitary Operator [J]. *Physical Review Letters*, 1994, 73(1):58–61.
- [100] Tait A N, de Lima T F, Zhou E, et al. Neuromorphic Photonic Networks Using Silicon Photonic Weight Banks [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):7430.
- [101] Feldmann J, Youngblod N, Karpov M, et al. Parallel Convolutional Processing Using an Integrated Photonic Tensor Core [J]. *Nature*, 2021, 589, 52–58.
- [102] Ashtiani F, Geers A J, Aflatouni F. An On-chip Photonic Deep Neural Network for Image Classification [J]. *Nature*, 2022, 606:501–506.
- [103] Soler M, Calvo-Lozano O, Estevez M C, et al. Nanophotonic Biosensors: Driving Personalized Medicine [J]. *Optics and Photonics News*, 2020, 31(4):24–31.
- [104] Ruiz-Vega G, Soler M, Lechuga L M. Nanophotonic Biosensors for Point-of-care COVID-19 Diagnostics and Coronavirus Surveillance [J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2021, 3(1):011002.
- [105] Brown L V, Zhao K, King N, et al. Surface-enhanced Infrared Absorption Using Individual Cross Antennas Tailored to Chemical Moieties [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2013, 135(9):3688–3695.
- [106] Kneipp K, Kneipp H, Itzkan I, et al. Ultrasensitive Chemical Analysis by Raman Spectroscopy [J]. *Chemical Reviews*, 1999, 99(10):2957–2976.
- [107] Ou X, Tang B, Zhang P, et al. Microring Resonator based on Polarization Multiplexing for Simultaneous Sensing of Refractive Index and Temperature on Silicon Platform [J]. *Optics Express*, 2022, 30(14):25627–25637.
- [108] Tu X, Song J, Liow T Y, et al. Thermal Independent Silicon-nitride Slot Waveguide Biosensor with High Sensitivity [J]. *Optics Express*, 2012, 20(3):2640–2648.
- [109] Sun F, Zhou J, Huang L, et al. High Quality Factor and High Sensitivity Photonic Crystal Rectangular Holes Slot Nanobeam Cavity with Parabolic Modulated Lattice Constant for Refractive Index Sensing [J]. *Optics Communications*, 2017, 399:56–61.
- [110] Wade J H, Alsop A T, Vertin N R, et al. Rapid, Multiplexed Phosphoprotein Profiling Using Silicon Photonic Sensor Arrays [J]. *ACS Cent Sci*, 2015, 1(7):374–382.
- [111] Mudumba S, de Alba S, Romero R, et al. Photonic Ring Resonance is a Versatile Platform for Performing Multiplex Immunoassays in Real Time [J]. *J Immunol Methods*, 2017, 448:34–43.
- [112] Zhang E, Martin Y, Orcutt J, et al. Monolithically Integrated Silicon Photonic Chip Sensor for Near-infrared Trace-gas Spectroscopy [M]. Baltimore, US: SPIE, 2019.
- [113] Photonics R. Photonics-driven Health Insights that Transform Lives [EB/OL]. (2022-08-01) [2022-10-21]. <https://rockleyphotonics.com/biomarker-sensing/>.
- [114] Rachim V P, Chung W Y. Wearable-band Type Visible-near Infrared Optical Biosensor for Non-invasive Blood Glucose Monitoring [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 286:173–180.
- [115] Zilkie A J, Srinivasan P, Trita A, et al. Multi-micron Silicon Photonics Platform for Highly Manufacturable and Versatile Photonic Integrated Circuits [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(5):1–13.
- [116] 包觉明, 陈晓炯, 丁运鸿, 等. 硅基光量子芯片上量子调控技术和量子信息应用 [J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2020, 50(8):47–51.
BAO J M, Chen X J, Ding Y H, et al. Silicon-based Photonic Quantum Information Technologies [J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2020, 50(8):47–51.
- [117] Wang J, Sciarrino F, Laing A, et al. Integrated Photonic Quantum Technologies [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(5):273–284.