光子和光电子集成专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022030402

硅基光子芯片研究进展与挑战

马浩然，李筱敏，王曰海*，杨建义
（浙江大学 信息与电子工程学院，杭州 310027）

摘　要： 硅基光子芯片以光子为信息传输媒介，具有高带宽、高速率、高集成度，及与CMOS工艺兼容等优点，在多个领域具有应用价值。文章首先介绍了几种硅基光子芯片的加工平台，包括绝缘体上硅（SOI），SiN，Ⅲ-Ⅴ族材料（如GaAs和InP）和硅衬底上铌酸锂薄膜，然后回顾了硅基光子芯片在光通信与光互连、光计算、生物传感、激光雷达（LiDAR）和光量子领域的发展现状和挑战，最后进行了总结。

关键词： 硅基光子学；光通信；光计算；生物传感；激光雷达；光量子
中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0218－10

Progresses and Challenges of Silicon-based Photonic Chips

MA Haoran, LI Xiaomin, WANG Yuehai, YANG Jianyi
(Department of Electronics, Collage of Information Science & Electronic Engin., Zhejiang University, Hangzhou 310027, CHN)

Abstract: Silicon-based photonic chips use photon as the information transmission media, which has the advantages of broad bandwidth, high speed, high integration and compatibility with CMOS technology, and has application value in many fields. In this paper, first, several manufacturing platforms of silicon-based photonic chips are introduced, including silicon-on-insulator (SOI), SiN, Ⅲ-Ⅴ compound materials (such as GaAs and InP) and lithium niobate film on silicon, then the development status and challenges of silicon-based photonic chips are reviewed in the fields of optical communication and interconnection, optical computing, biosensors, light detection and ranging (LiDAR)and quantum photonics, and finally, a summary is presented.

Key words: silicon photonics; optical communication; optical computing; biosensors; LiDAR; quantum photonics

0　引言

摩尔定律指出，芯片上单位面积晶体管的数量每18～24个月翻一番，微电子技术的发展一直遵循着这一规律。在过去的50多年里，微电子芯片的集成规模扩展了10亿倍以上[1]。然而随着集成电路晶体管尺寸的不断减小，当前芯片的特征尺寸已达纳米级别，这个尺寸下量子效应显著，晶体管的不可靠性增加[1]，这使得摩尔定律很难再延续发展。为此人们构思了多种解决方案，其中硅基光子芯片极具应用前景。

硅基光子芯片以光子为信息载体，相比于电子，光子具有波长、振幅、相位等多个复用维度，带宽和通信容量更大，频谱利用率更高[2]。传统微电子芯片的电信号在导线中传输，而硅基光子芯片中的光信号在波导中传输。硅波导芯层和包层在1 550 nm波长处的折射率分别为3.5和1.45左右，高折射率差带来了更高的集成度、更小的体积，且硅对光纤通信波段的光几乎透明，光子能够近似无损耗地在光波导中传输。完整的硅基光子芯片上集成了光源、光波导、调制器、滤波器、探测器等器件，能够实现光的产生、路由、调制、处理和检测，这

收稿日期：2022－03－04.
*通信作者：王曰海　E-mail：wyuehai@zju.edu.cn

些功能一同形成了类似于电子集成电路的光学回路[3]，从而实现对信息的传输、控制和处理。硅基光子器件速度快、带宽大，在进行某些特定操作时，所需要的功耗比微电子芯片少，甚至能够解决某些微电子器件无法解决的复杂问题[4]。在加工制造方面，硅基光子芯片可以直接利用微电子技术成熟的互补金属氧化物半导体（CMOS）加工工艺来完成，具有超高的兼容性、高集成度和大规模制造能力[1]。由此硅基光子芯片在数据通信、自动驾驶、传感和计算等多个领域拥有巨大的价值[3]。图 1 是市场研究机构 Yole 对硅基光电子在不同应用场景的市场价值预测[5]，2026 年整个硅基光电子产业的市场规模预估达到 11 亿美元。

本文将介绍硅基光子芯片不同的材料平台，并回顾其在光通信与光互连、光计算、生物传感、片上激光雷达和光量子领域的研究进展和挑战，最后对本文进行总结。

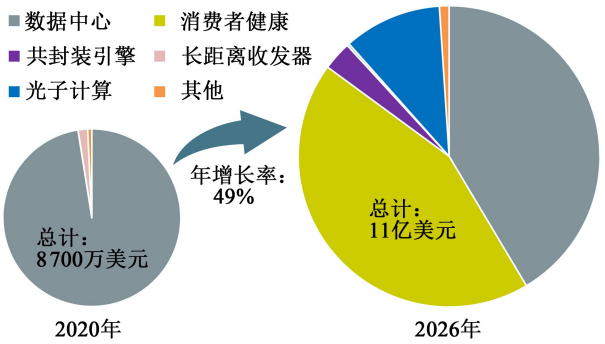


图 1　硅基光电子在不同应用场景的市场价值预测[5]

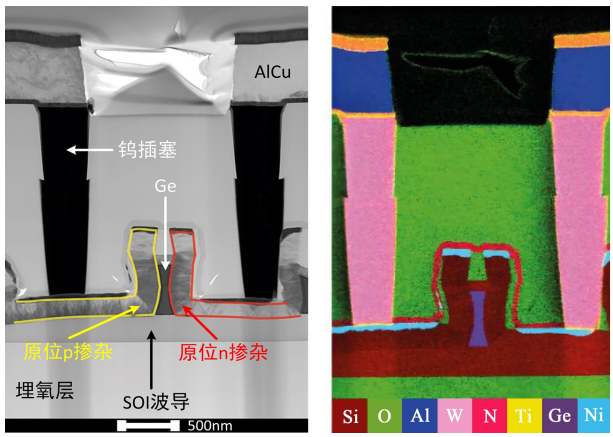
1　硅基光子芯片的制造平台

硅基光子芯片有多种制造平台，下面对绝缘体上的硅（Silicon on Insulator，SOI），SiN，Ⅲ-Ⅴ族（GaAs 和 InP），硅衬底上铌酸锂薄膜这四种常用的制造平台进行简要介绍。

1.1　SOI 平台

SOI 仅由硅和二氧化硅构成，是硅基光子芯片的基本材料平台。硅材料的透明窗口在 1 270～1 650 nm，因此对光纤通信波段的光几乎透明[6]。为构成光学回路，需要在 SOI 平台上集成各种无源和有源器件。

无源器件无需进行外加电学调制，如波导、微环谐振腔（Microring Resonator，MRR）、马赫-曾德尔干涉仪（Mach-Zender Interferometer，MZI）、光栅等，其中波导是基本器件。SOI 矩形波导的芯层和包层分别为硅和二氧化硅，1 550 nm 波长处硅和二氧化硅的折射率分别为 3.5 和 1.45 左右，芯层和包层的大折射率差使得波导尺寸为几百纳米，极大地提高了光子芯片的集成度。同时 SOI 波导对光纤通信波段的光损耗较小，一般在 2～3 dB/cm，通过改进工艺，直波导的损耗可以降低到 0.1 dB/cm 量级[7]。有源器件包括激光器、调制器、探测器等。光源方面，硅是间接带隙材料，发光效率低，不适合做光源，因此需要结合其他材料，如稀土掺杂光源、Ⅲ-Ⅴ族光源、Ⅳ族光源等[8]。硅基Ⅳ族光源是自然之选，多采用体硅、多孔硅、硅量子点、锗硅等结构，但Ⅳ族材料多为间接带隙材料，发光效率比直接带隙低 3～4 个量级[8]。SOI 调制器一般采用热调制或载流子色散调制。硅的热光系数约为 1.84×10^{-4}/K，基于热光效应的热调制器体积小、功耗低、损耗低，但热调速率较慢，仅为兆赫兹量级[9]，且波导间距小时存在热串扰。SOI 载流子调制器基于载流子色散效应，调制速度快，调制速率可达几十吉赫兹[3]，满足高速模块的需求，但这种调制器会引入额外的损耗。探测器方面，由于硅对光纤通信波段的光透明，基于 SOI 平台的探测器面临着困难[6]。Ⅳ族锗材料在近红外波长处不透明，因此锗硅探测器获得了广泛研究。图 2 是 2021 年德国 IHP 发布的一款采用类似鳍式晶体管（FinFET）结构的三明治型锗探测器，FinFET 结构减少了锗的本征区宽度和载流子的渡越时间，由此在 1 550 nm 波长实现了高达 265 GHz 的 3 dB 带宽，超过了此前所有的硅基集成探测器，其响应度为 0.3 A/W，工作暗电流为 100～200 nA[10]。



（a）　STEM 图　　（b）　EDX 图

图 2　FinFET 结构锗探测器的横截面[10]

此外，硅中也存在丰富的非线性效应，如四波混

频、克尔效应、载流子色散效应等，可以用于光频梳、量子光学等领域。然而当泵浦功率较大时，硅中会发生双光子吸收和自由载流子吸收效应，产生额外的非线性损耗。

1.2 SiN 平台

SiN 在传统微电子芯片的 CMOS 工艺中用于对单个晶体管进行隔离，也被用作某种场效应晶体管的栅极材料，可以作为 SOI 的互补平台[7]。SiN 的透明窗口大，从 400 nm 的可见光波段到 2 350 nm 的近红外波段均有很低的传输损耗(<1 dB/m)，由此可以制成品质因数(Q)高达百万的 MRR[7]。SiN 波导的芯层和包层分别为 SiN 和 SiO_2，SiN 在 1 550 nm 处的折射率约为 1.98，芯层和包层的折射率差且较 SOI 波导小，因此需要更大的截面尺寸[7]。SiN 材料中也具有良好的非线性效应，其非线性克尔系数 $n_2=2.5\times10^{-15}\,\mathrm{cm^2/W}$，同时在通信波段不存在双光子吸收和自由载流子吸收效应，因此被广泛用于片上非线性研究。得益于 SiN 材料的超低损耗和优良的非线性效应，Victor 等于 2019 年制备了损耗为 0.4 dB/cm 的富硅氮化硅波导，利用该波导构成了半径为 22 μm、Q 值为 8×10^5 的微环谐振腔，用其产生了 1 300～2 000 nm 的宽谱微环频率梳[11]。然而 SiN 除热光效应外，未发现强电光效应。近期发展出的 SiN-on-SOI 平台结合了 SiN 和 SOI 两种平台的优势，在非线性光学、滤波器、低损耗波导、集成光学陀螺等领域具有应用前景。

1.3 Ⅲ-Ⅴ族平台

Ⅲ-Ⅴ族材料是早期光通信芯片的主要制造平台[12]。Ⅲ-Ⅴ化合物特别是砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)等，天然是直接带隙材料，其价带顶和导带底在波矢 k 空间中处于同一位置，电子和空穴的复合无需交换动量，具有很高的内量子效率，能够高效发光，可以作为激光源的增益物质。在 Si 基上异质集成Ⅲ-Ⅴ族材料构成的混合激光源是硅基片上光源的实现方式之一，但异质集成增加了制造工艺的复杂度[6]。图 3 是 2019 年加州大学圣巴巴拉分校 Jonathan Klamkin 课题组实现的硅衬底上直接外延生长的 1 550 nm 电泵浦量子阱激光器，室温下最大连续输出功率为 18 mW[13]。图 4 是同年加州大学圣巴巴拉分校 John E. Bowers 课题组实现的硅衬底直接生长的量子点可调激光器，边缘模式抑制比大于 45 dB，室温下波长可调范围为 16 nm，输出功率大于 2.7 mW[14]。

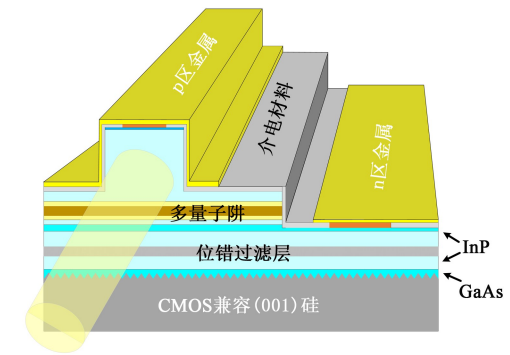


图 3 量子阱激光器示意图[13]

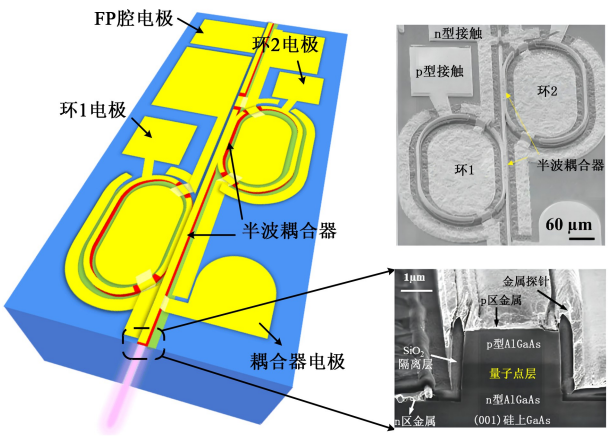


图 4 量子点可调激光器示意图[14]

1.4 硅衬底上铌酸锂薄膜平台

由于具有优异的电光性质($r_{33}=30.8\,\mathrm{pm/V}$)、宽透明窗口(400 nm～5 μm)、较高的折射率(波长为 1 550 nm 时，$n_o=2.21$，$n_e=2.14$)以及高度的稳定性，铌酸锂成为了一种极具优势的用于构建集成光子器件的材料平台。

在目前的研究中，除了能够在铌酸锂平台上构建波导、谐振腔、周期型极化铌酸锂结构、光耦合结构等简单单元外，还能制造高性能的电光调制器、非线性光学器件等集成器件。

传统的铌酸锂波导采用钛扩散或质子交换方法制造，然而使用这两种方法制造的集成器件折射率对比度低，器件尺寸大，引起一系列器件性能降低。借鉴制造 SOI 晶片的智能切割技术，研究人员结合晶片键合技术和晶体离子切片(CIS)技术来制备单晶铌酸锂薄膜，使用这种方法能够制造出高折射率对比度的铌酸锂波导以提升器件性能并缩小占用面积[15]。利用苯并环丁烯(BCB)或晶体键将铌酸锂薄膜与二氧化硅等低折射率衬底进行键合，形成绝缘体上铌酸锂(LNOI)。利用湿法刻蚀/干法刻蚀/化学机械抛光(CMP)/金刚石切割/飞秒激光直写/

聚焦离子束(FIB)铣削技术在 LNOI 上制成铌酸锂脊波导，其相比于传统铌酸锂波导具有更大的折射率对比度，并且能够灵活地运用在各种纳米器件上[16]。然而使用上述方法刻蚀脊波导需要十分精细的加工，这提高了商业生产难度，可以通过在铌酸锂薄膜上加载其他易刻蚀材料的薄膜来规避对铌酸锂的刻蚀，如氮化硅、硫系玻璃、五氧化二钽或二氧化钛等，然而采用这种方式制造的波导有较大的模体积和传输损耗[16]。铌酸锂波导的主要损耗来源于波导弯曲造成的辐射损耗，以及由表面粗糙度引起的散射损耗。

微环器件的性能可以通过品质因数、光插入损耗、串扰、占用面积等性质来表征[17]。2017 年 Zhang 等用干刻蚀波导实现了一种超低损耗单片集成铌酸锂光子平台，其传播损耗低至 2.7 dB/m，微环谐振器 Q 值高达 10^7[18]。2019 年，Zhang 等使用化学机械抛光技术制造了高 Q 值的 LNOI 微环谐振器，在波长约 773 nm 处测得 Q 值为 1.46×10^7[19]。

由于铌酸锂优异的电光性质，其集成器件如电光调制器、光频率梳的带宽高于集成的硅光器件。光栅耦合器的工作机制导致其带宽较窄，不能很好地与一些集成 LN 器件兼容，因此 LNOI 平台上更倾向于使用边缘耦合或对接耦合[16]将光耦合进/出芯片。

大数据时代的到来使得通信容量攀升，对于电光信号调制能力的要求也在逐步提高。由于具有高电光系数、高居里温度和宽透明窗口，铌酸锂材料能满足电光调制器所需的高调制效率、低光损耗和运行稳定性。经过几年的发展，在 LNOI 平台上制造的电光调制器已经能够与发展成熟的 SOI 平台、InP 平台的调制器性能相媲美。2018 年，Wang 等通过在 LNOI 平台上制造铌酸锂薄膜 MZI 调制器(MZM)使折射率对比度提高到 0.7 以上来增强 LN 波导对光的约束。Wang 等通过设计 $LN/SiO_2/Si$ 堆栈的层厚度，达到独立设计微波速度和光群速度的目的，使高频率下器件在无需减小电场和光场重叠的条件下，仍然满足微波信号和光信号的群速度匹配[20]，进一步优化传输线的微波损耗使电光带宽大于 100 GHz，同时具有 CMOS 级驱动电压，调制效率达 2.2 V·cm。除了电光 MZI 调制器(EO MZM)，在 LNOI 平台上还可以实现其他类型的强度或相位调制器，如微环调制器[21]、多模波导调制器[22]和光栅耦合调制器[23]。

集成 LNOI 平台器件凭借其高带宽、高数据传输速率、高消光比、低误码率、低功耗、低成本、小尺寸等优点而在光通信、数据中心、微波光子学、量子光学等应用上都具有独特的优势，在光计算与计量学领域也有着广阔的应用前景。

2　硅基光子芯片的应用与挑战

2.1　光通信与光互连

硅基光子芯片目前的主要应用场景依旧是光通信[12]。随着 5G、物联网和数据中心的发展，光通信系统的信道容量在过去 30 年增加了近 5 个数量级，目前 400 Gbit/s 的光通信芯片正在进行商业化部署，未来光通信芯片将会向着 800 Gbit/s，Tbit/s 级发展[12]。硅基光子芯片具有集成度高、稳定性好、功耗低、相位调制特性好的优点，不仅适合长距离数据传输，也十分适合芯片内/间数据传输短距离、大容量的要求，是理想的光通信和光互连平台。通过单片集成微电子电路，硅基光子芯片可以实现高速、高带宽、低功耗、低延时的片上互连，同时减少芯片上的器件数目、提高互连密度，突破当前微电子芯片在数据互连方面的限制[24]。

硅基光电收发芯片得到广泛的研究和应用，在大容量数据通信中具有重要意义[2]，近年来取得了许多进展。2018 年，英特尔发布了 100 Gbit/s PSM4 QSFP38 硅基光电子收发模块，在通信领域获得了巨大的商业化成功[12]。2020 年，他们发布了一种基于 InP 的双通道相干光收发器，传输速率达到 1.6 Tb/s，其在单个光子芯片上集成了两个完整的发射机和接收机信道的所有必要功能，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[25]。2021 年，中国信科等机构联合研制出了国内首款 1.6 Tb/s 的硅光互连芯片，其单个硅基光发射芯片和硅基接收芯片上分别集成了 8 个通道的高速电光调制器和高速光电探测器，每个通道具有 200 Gb/s PAM4 的高速信号光电和电光转换能力，该器件可用于下一代数据中心的宽带互连。

光通信也需要大规模的光交换阵列。数据中心的通信连接数量每 2.5 年翻一番，导致互连需求急剧增大，光学共封装技术能够满足这一需求[26]。2020 年，英特尔推出一款 1.6 Tb/s 的硅基光子集成光交换芯片，其具有 16 个 106 Gb/s 的 PAM4 光

通道，集成了激光器、光开关、微环调制器、V 型沟槽等器件，可以满足网络交换机应用的共封装光学要求[26]。

此外，光子具有波长、偏振、模式、时间等多个维度资源可以利用，多维复用技术已经广泛用在光纤通信中[27]，结合多个维度的光子集成芯片有望解决光通信新的容量危机。2020 年，上海交通大学苏翼凯课题组采用基于级联亚波长光栅（SWG）的反向耦合器结构，提出了一种波长-模式-偏振信号同时复用的片上多维多路复用/解复用方案，结构如图 5 所示[28]。为验证该方案的可行性，他们制作了具有双波长、双模式和双偏振的 8 通道复用/解复用器，在 1 540 和 1 550 nm 左右波长下的总体插入损耗小于 6.6 dB，串扰低于−18.7 dB。

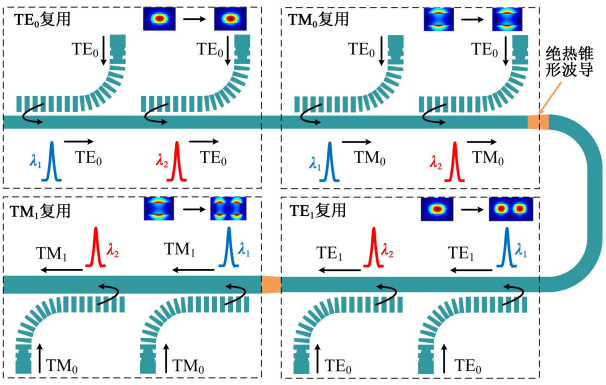


图 5 8 通道多维复用结构示意图[28]

硅基光通信与光互连芯片目前面临 3 个主要挑战：(1)硅基片上光源。片上光源能够提高光互连网络的集成度和能量利用效率[24]，而光源问题是整个硅基光电子技术的主要挑战。目前相对成熟的硅基片上光源是基于Ⅲ-Ⅴ族材料，通过混合集成或异质集成的方式在硅基光子芯片上实现Ⅲ-Ⅴ族激光器[9]。(2)载流子色散效应引起的调制带宽受限。采用新的调制机制如铌酸锂有望解决这一问题。(3)大规模集成和可靠封装。目前可以采用共封装技术来提升大规模集成能力。

2.2 光计算

近年来人工智能、神经网络、语音处理、图像识别等技术蓬勃发展[29]，大容量实时数据处理和分析场景催生了对算力的剧烈需求。目前的数据处理依赖于传统的微电子芯片，尽管这种芯片加工制造技术成熟，但由于结构上的缺陷，其带宽小、速度慢、功耗大[30]。而基于硅基光子芯片的光学神经网络和高性能计算有望解决这个问题。

人工神经网络可以作为人工智能的数据处理工具，其计算集中在大量的矩阵运算上，而光学神经网络在这些运算中几乎不消耗能量[30]。光学神经网络主要包括前馈神经网络（FNN）、循环神经网络（RNN）和脉冲神经网络（SNN），可以利用 MZI 或 MRR 来实现。

MZI 的矩阵运算原理基于酉矩阵分解定理（SVD），即任意的矩阵在奇异值分解后，等价于两个由特征向量组成的酉矩阵和一个对角阵相乘。MZI 通过调节两个臂的相位差可以实现任意的二阶酉矩阵，而对角阵可通过光放大器或可调衰减阵实现[4]。作为里程碑事件，2017 年美国 MIT 大学的 Shen 等在硅基光子芯片上制成了由 56 个 MZI 级联构成的光学神经网络，非线性激活函数在电域上实现，该芯片能够计算酉矩阵，并能用于元音识别[31]。如图 6 所示，工作时，先把声音信号转化为光信号，再由 MZI 光学神经网络进行处理，识别正确率达 76.7%。这项工作证明了利用硅基光子芯片构建神经网络的可行性。MRR 矩阵运算可以通过调节 MRR 的透射率来实现，无需分解矩阵即可以直接得出计算结果，同时微环尺寸小，集成度更高。2019 年 Bangari 等提出了基于波长的卷积神经网络结构，利用波长相关 MRR 在硅基光子芯片上实现了快速的矩阵操作[32]。

通过优化光学神经网络的结构可以提升光学神经网络的应用能力。图 7 是 2019 年美国加利福尼亚大学伯克利分校 Michael Y.-S. Fang 等提出的两种新型 MZI 网络，分别称为网格网络（GridNet）和快速傅里叶变换网络（FFTNet），其中 FFTNet 受到 FFT 算法的启发，相比于传统 MZI 网络，用更少的 MZI 实现了相同规模的卷积运算[33]。2021 年，CUMEC 公司提出了一种超紧凑型可扩展光子神经网络新架构—赝实数光子神经网络架构，与 SVD 网络相比，大幅度降低了 MZI 计算单元的功耗和插入损耗[34]。此外，对非线性激活函数也有诸多研究，如 Williamson 等利用光电转换在硅基光子芯片上实现了曲线类型可调的光电激活函数单元[35]。然而非线性激活函数均未实现理想的全光集成。

MRR 除了可以用于矩阵运算外，也可以用于光学神经拟态计算。人的大脑是目前已知的最高效的计算工具，神经拟态计算就是通过模仿人类大脑皮层的神经元来实现高效计算。神经拟态计算一般

采用 SNN 结构，相比于 FNN 和 RNN，SNN 更接近于人脑的真实情况。2017 年，Tait 等提出了一种广播式 MRR 权值库结构的神经网络，据估计，相比于传统的 CPU，该结构的处理速度提高了 294 倍[36]。两年后，Tait 又提出一种基于调制器的神经元结构，其包含 2 个光探测器和 1 个 MRR，可以在一个集成光子组件中实现光到光的非线性[37]。

此外，硅基光子芯片还可以实现多种模拟运算，如启发式算法求解器、储水池问题、FFT 等。在启发式算法求解器问题上，Roques-Carmes 等提出了一种基于循环神经网络（RNN）的伊辛模型求解器，利用级联 MZI 和非线性噪声链路实现了对伊辛模型问题的快速求解[38]。在储水池问题上，Vandoorne 等利用光波导和光延时线实现了固定连接的储水池，可以完成 100 Gbit/s 以上速率的布尔运算和语音识别[39]。在 FFT 方面，已经有报道使用多模干涉耦合器（MMI）和表面等离激元实现的案例[4]。

用于计算的硅基光子芯片也在逐步实现商业化。2021 年，曦智科技发布了一款集成封装硅光子芯片和微电子芯片的光子计算处理器，光子芯片中集成超过 10 000 个光子器件，包含 64×64 的光学矩阵，在单一问题的运算速度上比目前高端 GPU 快数百倍。

上述工作证实了硅基光子芯片在计算和神经网络上巨大的应用潜力，虽然它在计算速度、功耗等方面优于传统的微电子芯片，但其在神经网络非线性激活函数的全光实现[30]、集成度[29-30]、光子芯片的匹配算法[30]等方面还存在不足。

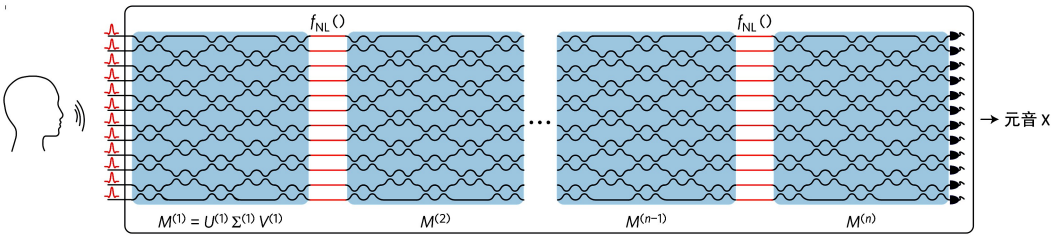
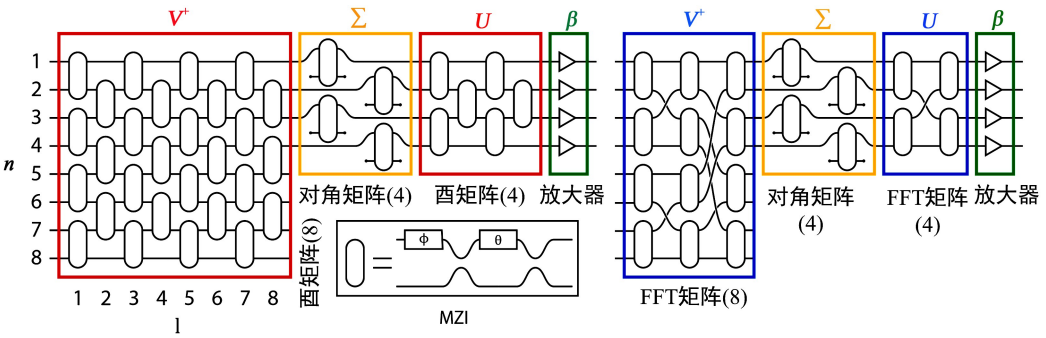


图 6　用于元音识别的光子集成芯片[31]



（a）　GridNet　　（b）　FFTNet

图 7　两种新型 MZI 网络[33]

2.3　生物传感

生物传感器是一种能够将蛋白质、核酸等分子结构的信息转换为声、光、电等信号的设备，广泛应用在生物诊断、药物研发、生命科学等研究领域。硅基光学生物传感器利用生物分子与光场的相互作用，使光的相位、强度、波长等参量发生变化，并利用光电转换将光信号转换为电信号，从而获得生物分子的结构信息，具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强、便于多功能集成、灵活性强的优点。根据传感原理的不同，可以将硅基生物传感器分为基于折射率变化的生物传感、基于荧光技术的生物传感和基于拉曼散射的生物传感[40]。

基于折射率变化的生物传感利用了波导的倏逝波，倏逝波与待测溶液的相互作用会改变包层的折射率，进而改变波导内光波的有效折射率和相位，生物信息就存在于光波的相位中，可以利用 MZI，MRR，以及布拉格光栅等结构来提取。以 MZI 和 MRR 为例来介绍这种生物传感的原理。MZI 是一种干涉型生物传感器，工作时一个臂与溶液相互作用，两臂的相位差随待测溶液而变化，通过检测输出端两臂干涉形成的透射谱就可以得到待测物质的信

息。2020 年,Leuermann 等首次采用相干检测的方式在基于 MZI 结构的 SiN 生物传感芯片上探测蛋白质分子,探测极限在高性能激光源和 FP 激光源下分别低于 300 pg/mL 和 2 ng/mL[41]。干涉型生物传感器结构简单、灵敏度高,但是其尺寸较大,而 MRR 谐振型结构尺寸小,集成度高。MRR 由于谐振波长对腔内光束的相位十分敏感,利用谐振波长的变化就能检测生物信息。2020 年新加坡国立大学的 Lee 等利用级联的微环阵列制成了基于游标卡尺效应的可调谐生物传感器,灵敏度为 3 000 nm/RIU[42]。此外,结合表面等离子波、光子晶体的传感器也逐渐成为研究热点[40,43]。2017 年,Philippe 等利用光子晶体微环谐振腔来制作生物传感器,能够探测到纳摩尔量级的 DNA 以及蛋白质分子,传感灵敏度为 248 nm/RIU,比传统的 MRR 器件提高了近 2 倍[44]。

基于荧光的生物传感需要对检测的分子进行荧光标记,具有灵敏度高、响应范围宽、选择性好等优点[40]。硅基荧光生物传感的平台主要是氮化硅,荧光标记通过波导表面的倏逝波对附近生物分子的激发来实现,包括超分辨显微技术和单分子荧光检测技术等。2017 年,Robin 等提出了一种基于硅基光子芯片的超分辨显微技术,为证明其可行性,他们用该技术对肝组织进行了可视化成像[45]。单分子荧光检测的实现主要依赖于纳米孔结构,2019 年 Schmidt 等把纳米孔光流体芯片和反馈控制电路集成在一起,能够可编程地实现单分子的按需运输和分析,允许用户根据需求配置参数[46]。

基于拉曼散射的生物传感器利用了拉曼散射,即当光波和结构分子发生非弹性碰撞后,光子的能量会与分子的能量进行交换,导致反射光子的频率与入射光有很大的偏移,由于这个偏移只取决于分子结构,可以从反射光中获取大量的探测分子信息,但自发拉曼散射的效率很低,一般小于百万分之一[40]。硅基光子芯片利用波导的倏逝场来激发拉曼散射,并将拉曼信号传递到氮化硅波导中传播,利用波导对光场的强束缚性和与待测样品长距离的相互作用,可以增强自发拉曼散射[40]。另一方面,表面增强拉曼散射的增强因子可以达到 10^{14},可以通过在单模氮化硅波导上集成领结形状的金纳米天线来实现[40]。基于拉曼散射的生物传感具有极大的市场潜力,2021 年 Rockley 公司报道了他们正在研发的一款用于血糖和酒精检测的硅光生物传感器模块,并有可能应用在 Apple Watch 中。该模块采用微环光频率梳做光源,可以通过片上光谱仪来分析血糖等分子产生的拉曼散射信号,具有功耗低、便于集成的优点[47]。

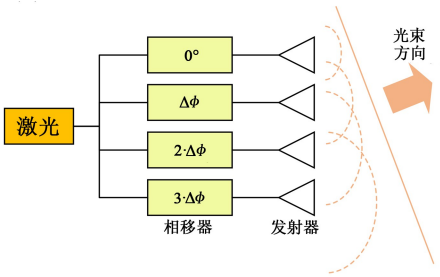
灵敏度是生物传感的重要指标,但目前实现单分子检测的硅基生物传感芯片还较少。未来的生物传感器将向超灵敏度、多功能、基于智能手机的便携式系统发展[43]。

2.4 激光雷达

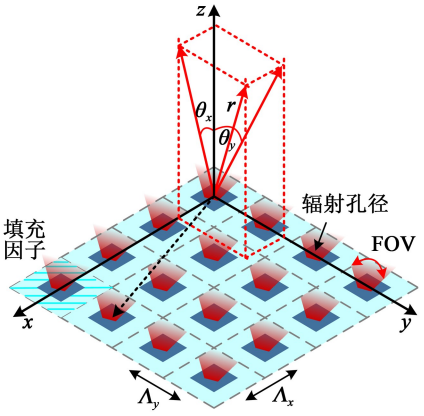
激光雷达是一种通过发射激光束来探测目标的方位、速度的技术,在自动驾驶、三维成像等领域具有重要应用。传统激光雷达采用机械转向的方式,存在结构复杂、易磨损、易受温度和振动等影响的缺点[40]。而硅基片上激光雷达采用固态光相控阵(Optical Phased Array,OPA),可以克服这些问题。OPA 是硅基片上激光雷达的重要组成部分,负责探测信号的产生和发射,由激光源、分束器、相移器和发射器四个部分构成[48],可用在自由空间通信、探测、成像、生物传感等领域[40,48]。OPA 的衡量指标主要包括视场范围(Field of View,FOV)、波束宽度、旁瓣抑制、调制速度、功耗等[40,48]。其中 FOV 确定了波束形成和转向的范围,波束宽度衡量了 OPA 传输点或接收点的大小。

OPA 按照辐射阵列可分为 1D OPA,2D OPA 和其他结构的 OPA[48]。1D OPA 如图 8(a),采用波导阵列结构,利用端面辐射的方式来发射光束,其原理基于夫琅和费衍射和干涉模型,通过改变波导之间的相位差就能实现一维光束的形成和转向。1D OPA 的设计需要考虑波导阵列孔径和波导间距。阵列孔径影响着角分辨率,阵列孔径越大角分辨率越高[49]。波导间距影响着 FOV 和波束发射效率,高发射效率和宽 FOV 分别要求波导间距等于和小于半个波长,但由于 OPA 的调相采用热调制器,会造成热串扰。为此,Michal 等采用 0.775 μm 的半波长波导间距,利用高折射率差的 SOI 波导和色散工程解决了这个问题,并实现了 180° 的 FOV[50]。图 8(b)所示的 2D OPA 利用波导光栅阵列(Waveguide Grating Array,WGA)来实现接近垂直方向的辐射,可以实现二维光束的形成和转向。2D OPA 有多种类型,如基于波导间的相位差、基于相位差和波长、基于固定波长光开关和完全基于波长的 2D OPA 等[48]。2019 年 Pan 等提出一种采用高折射率差光栅结构的 OPA 模型,在 1.55 μm 波

长处可以实现 93.94%的辐射效率，通过调节输入波导的相位差，实现了 22.8°×20.2°的 FOV 和 2.4°×2.5°的波束宽度，并且旁瓣抑制比最大可达 28.4 dB[51]。



（a）　1D OPA 结构示意图



（b）　2D OPA 的原理示意图[48]

图 8　1D OPA 和 2D OPA 示意图

片上激光雷达近几年也取得了一定的进展，除 OPA 的基本参数外，还需要考虑探测距离和测距精度。2019 年 Watts 等通过同时调节相位差和波长，使 1D 512 个单元的 OPA 表现出近似 2D OPA 的性能，总操作功率小于 1 mW，FOV 为 56°×15°[52]。他们用这种 OPA 制成了 2D 和 3D 片上固态激光雷达，其中 2D 激光雷达实现了 185 m 的室外测量距离，3D 激光雷达能够探测到室内的墙和具有显著特征的人像，这显示了 OPA 技术在固态激光雷达方面的应用价值。2021 年 Song 等在 SiN-on-SOI 平台上实现了一种基于调频连续波的片上激光雷达，创新性地采用双级氮化硅波导实现了鱼骨天线 OPA 和链式天线 OPA[49]。鱼骨天线 OPA 的波束宽度和链式天线 OPA 的 FOV 分别是 0.021°×0.029°和 140°×19.23°，其中 0.029°和 140°分别是目前 2D OPA 中已知最小的纵向波束宽度和最大的横向转向范围。由于采用非均匀的波导间距，仅用 128 通道就实现了 4 mm 长的阵列孔径。结合相干接收机，他们用这两种 OPA 实现了具有 100 m 探测距离的 FWCM 片上激光雷达，测距精度达到 5.59 cm。

由此可见，硅基光子芯片在激光雷达方面也具有应用前景。波导阵列的串扰问题限制了 OPA 的 FOV、波束宽度等多个性能，因此在设计时需要对网络进行整体考虑，选择性能更佳的光学器件。

2.5　光量子

光量子芯片利用波导来引导光子，可提供具有核心功能的相位稳定的量子回路，包括量子态的产生、操控和单光子检测[53]。相比于传统的桌面光学，光量子芯片利用硅基光子平台无源低损耗、多维易调控的器件库[4]，便于大规模集成[4,54]，有望进行具有数百或数千个光子的大规模量子信息处理[53]，可以快速推进光量子技术的实用化[54]。近几年光量子芯片得到了快速发展[53]，有望促进量子计算、量子通信、量子传感、量子模拟和基础科学等领域的发展[54]。

量子光源在量子通信、量子计算等领域具有重要应用[55]，分为单光子源、纠缠态源和连续变量光源[55-56]。片上单光子源可以利用硅波导或 MRR 中的自发四波混频（Spontaneous Four Wave Mixing，SFWM）来实现[53,56]。SFWM 是一种三阶非线性效应，把两个泵浦光子转化为一对频率纠缠的信号光子和闲频光子，对光子对进行解纠缠后可以做预报单光子源[57]。2017 年，多伦多大学的 Sipe 等提出一种微环模型，对泵浦光和信号光（闲频光）分别引入不对称的 MZI，使泵浦光和信号光（闲频光）的品质因子（Q）独立可调，可以在不损耗预报效率的情况下对光子对解纠缠[57]。2020 年，南京大学徐平等在 SOI 波导上实现了该结构，实验测得了 52.4%的预报效率和（95±1）%的单光子纯度，超过了理论上 93%的微环单光子源纯度极限[58]。其他类型的量子光源可以参考文献[53,55-56]。

片上量子通信已经在光量子芯片上得到了验证。北京大学王剑威等于 2020 年实现了片上量子隐形传态实验，整个实验包括发射端芯片、光纤和接收端芯片三个部分[59]。如图 9 所示，发射端芯片用 4 微环阵列量子光源产生 4 个高纯度、高不可分辨性的单光子，并用后续的 MZI、移相器等对光子态进行贝尔投影测量和融合操作，光子经 10 m 长的光纤传输后被接收端芯片接收和探测。

利用光量子芯片也可以进行片上量子计算。2021 年，加拿大光量子计算公司 Xanadu 发布了一

款室温下工作的 SiN 可编程光量子芯片，配备了一个全自动控制系统，允许用户远程连接以执行量子算法[60]。如图 10 所示，该芯片包含泵浦光分束、压缩光源、可编程干涉仪等部分，其中 4 对双模压缩真空态光子由4个高品质因子的MRR产生，光量子态由可编程干涉仪操控，信号的读取由片下单光子探测器完成。该芯片执行并验证了高斯玻色子采样、分子振动谱和图相似度三个量子算法。

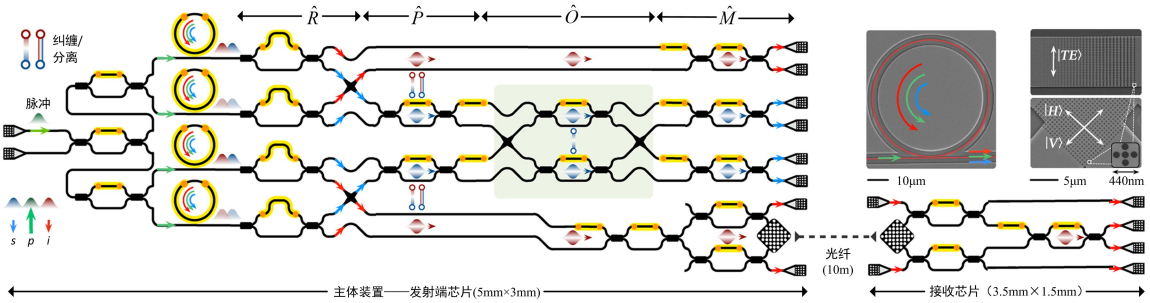
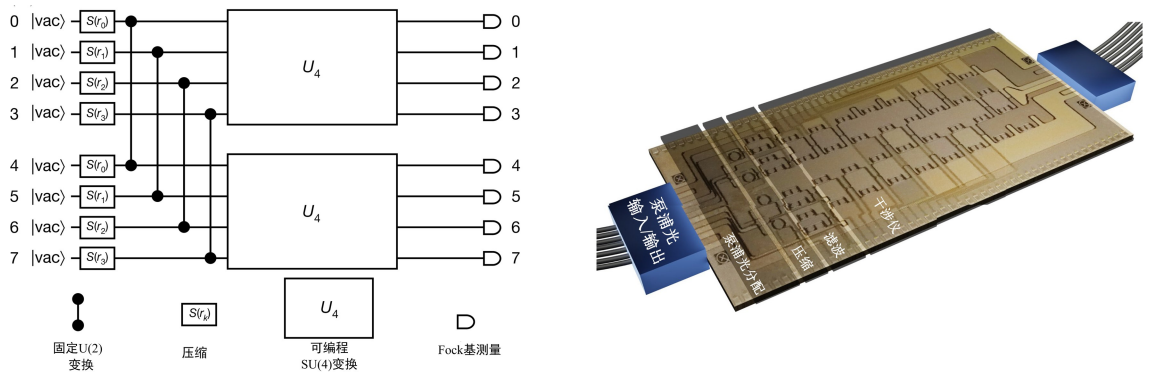


图 9 片上量子隐形传态实验[59]



（a） 工作原理 （b） 具体结构

图 10 Xanadu 光量子计算芯片的工作原理和具体结构[60]

现有的光量子计算方案都基于线性光学计算，而大规模的光量子计算需要用到一种基于测量的量子计算(Measurement-Based Quantum Computing，MBQC)模型——单向量子计算，这种模型需要用到一种称为“簇态”的多光子纠缠态[54]，这可以在硅基光子芯片上实现。2018 年，Roberto 等利用光子的多自由度编码，使用泵浦光的 3 个脉冲和 MRR 的 3 个谐振频率，结合其设计出的受控相位门，用 2 个光子在时间和频率两个维度上实现了簇态，其构成的希尔伯特空间相当于 6.34 个量子比特，具有高度的噪声鲁棒性和纠缠性，他们用此簇态在概念上验证了单向量子计算的可行性[61]。

硅基光量子芯片的发展也面临着诸多问题与挑战：(1)快速、低损耗的光开关网络的需求。短期内处理大量单光子需要对单光子源进行多路复用和解复用，最近 LN，Si-LN 和 Si-钛酸钡开关在这方面显示出了应用前景[53]。(2)完全集成了量子光源、回路和探测器的光量子芯片有待实现，其挑战在于泵浦光的去除和对光子的低温操纵。目前已有抑制比达 100 dB 的级联 MRR 和 MZI 的报道，这有望应对第一个挑战，而后者有望通过可低温操作的 Si-钛酸钡开关解决[53]。(3)如何进一步提高 MBQC 的性能，如何克服大规模制造时的误差和可变性。结合光量子芯片的高可编程性和机器学习算法有望补偿制造的不完美[53]。

光量子芯片的发展与硅基光电子技术息息相关，光量子回路的关键性能需要新材料、先进的集成和封装工艺来驱动[54]。为应对集成光量子的挑战和市场需求，需要有协调的方案，投资开发新的光子集成平台组件和供应链，并建立混合集成和异质集成的基础设施[54]。

3 总结

硅基光子芯片具有多种制造平台，如 SOI，SiN，Ⅲ-Ⅴ族半导体、薄膜铌酸锂等。SOI 平台具有极强的束缚光的能力，基于该平台的无源器件和除光源

外的有源器件已发展得较为成熟；SiN 平台因其超低损耗和优异的非线性效应获得了广泛关注；Ⅲ-Ⅴ族材料，如 InP 和 GaAs，为硅基片上光源提供了解决方案；而薄膜铌酸锂具有高速的电光调制能力。利用单个或结合多种平台，硅基光子芯片在光通信与光互连、光计算、生物传感、激光雷达和光量子等领域都彰显出应用前景。

然而，硅基光子芯片的发展还面临着许多问题：(1)大规模集成光子回路的可靠性。未来需要进一步提升工艺水平，利用巧妙的设计来提高器件的性能和良品率，减少加工误差等因素的影响，从而提高大规模集成光子回路的可靠性。(2)混合集成和异质集成。混合集成的工艺成本较高，且难以实现大规模集成；而异质集成由于Ⅲ-Ⅴ族材料与硅的晶格失配，会造成位错、反相畴等缺陷[9]，因此需要集成工艺的进一步提升。(3)对高性能可靠封装的需求。共封装和 3D 封装技术的发展为此提供了潜在的解决思路。随着硅基光电子技术的发展，硅基光子芯片将趋向于更低成本、更优性能和更高集成度，将在通信、传感、计算等领域展现出愈加重要的应用潜力。

参考文献：

[1] 王　磊，林　涛. 硅基光电子技术前沿报告[R]. 中国通信协会，2020.
Wang L，Lin T. Frontier report of silicon-based optoelectronic technology[R]. China Institute of Communications，2020.

[2] 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，2019，1(3)：4-15.
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，2019，1(3)：4-15.

[3] Siew S Y，Li B，Gao F，et al. Review of silicon photonics technology and platform development[J]. J. of Lightwave Technol.，2021，39(13)：4374-4389.

[4] 周治平，许鹏飞，董晓文. 硅基光电计算[J]. 中国激光，2020，47(6)：9-23.
Zhou Z P，Xu P F，Dong X W. Computing on silicon photonic platform[J]. Chinese J. of Lasers，2020，47(6)：9-23.

[5] Debray A，Malinge J，Mounier E. Silicon Photonics Market and Technology Report 2021[R]. Yole Development，2021.

[6] Dhiman A. Silicon photonics：A review[J]. IOSR J. of Appl. Phys.，2013，3(5)：67-79.

[7] Blumenthal D J，Heideman R，Geuzebroek D，et al. Silicon nitride in silicon photonics[J]. Proc. of the IEEE，2018，106(12)：2209-2231.

[8] 朱元昊，温书育，何　力，等. 后摩尔时代硅基片上光源研究进展[J]. 微纳电子与智能制造，2021，3(1)：136-149.
Zhu Y H，Wen S Y，He L，et al. Research progress of silicon light sources in the Post-Moore era[J]. Micro/Nano Electronics and Intelligent Manufacturing，2021，3(1)：136-149.

[9] 黄北举，张　赞，张赞允，等. 硅基光电子与微电子单片集成研究进展[J]. 微纳电子与智能制造，2019，1(3)：55-67.
Huang B J，Zhang Z，Zhang Z Y，et al. Research progress on monolithic integration of silicon based optoelectronics with microelectronics[J]. Micro/Nano Electronics and Intelligent Manufacturing，2019，1(3)：55-67.

[10] Lischke S，Peczek A，Morgan J S，et al. Ultra-fast germanium photodiode with 3-dB bandwidth of 265 GHz[J]. Nature Photonics，2021，15：925-931.

[11] Ye Z C，Fülöp A，Helgasonó B，et al. Low-loss high-Q silicon-rich silicon nitride microresonators for Kerr nonlinear optics[J]. Opt. Lett.，2019，44(13)：3326-3329.

[12] 李德钊，许鹏飞，朱科健，等. 硅基光电子在通信中的应用和挑战[J]. 电信科学，2021，37(10)：1-11.
Li D Z，Xu P F，Zhu K J，et al. Applications and challenges of silicon-based optoelectronics in communication [J]. Telecommunication Science，2021，37(10)：1-11.

[13] Shi B，Zhao H，Wang L，et al. Continuous-wave electrically pumped 1 550 nm lasers epitaxially grown on on-axis (001) silicon[J]. Optica，2019，6(12)：1507-1514.

[14] Wan Y，Zhang S，Norman J C，et al. Tunable quantum dot lasers grown directly on silicon[J]. Optica，2019，6(11)：1394-1400.

[15] Poberaj G，Koechlin M，Sulser F，et al. Ion-sliced lithium niobate thin films for active photonic devices[J]. Optical Materials，2009，31(7)：1054-1058.

[16] Qi Y F，Li Y. Integrated lithium niobate photonics[J]. Nanophotonics，2020，9(6)：1287-1320.

[17] Padmaraju K，Bergman K. Resolving the thermal challenges for silicon microring resonator devices[J]. Nanophotonics，2014，3(4/5)：269-281.

[18] Zhang M，Wang C，Cheng R，et al. Monolithic ultra-high-Q lithium niobate microring resonator[J]. Optica，2017，4(12)：1536-1537.

[19] Zhang J H，Fang Z W，Lin J T，et al. Fabrication of crystalline microresonators of high quality factors with a controllable wedge angle on lithium niobate on insulator[J]. Nanomaterials (Basel)，2019，9(9)：1218.

[20] Wang C，Zhang M，Chen X，et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. Nature，2018，562：101-104.

[21] Wang C，Zhang M，Stern B，et al. Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators[J]. Opt. Express，2018，26(2)：1547-1555.

[22] Zhou G Q，Zhou L J，Guo Y Y，et al. High-speed silicon electro-optic modulator based on a single multimode

waveguide [C]// 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2019.

[23] Wang M R, Xu G D, Lin F, et al. Single-mode/multimode waveguide electro-optic grating coupler modulator[J]. Appl. Phys. Lett., 1995, 66: 2628.

[24] 梁梓豪，黄红斌，陈舜儿，等. 硅基光互连网络的研究[J]. 光通信技术，2016，40(10)：4-7.
Liang Z H, Huang H B, Chen S E, et al. Study of silicon-based optical interconnection network [J]. Optical Communication Technol., 2016, 40(10): 4-7.

[25] Lal V, Studenkov P, Forst 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), 2020.

[26] Fathololoimi S, Nguyen K, Mahalingam H, et al. 1.6 Tbps silicon photonics integrated circuit for co-packaged optical-IO switch applications[C]// 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2020.

[27] 王 健，曹晓平，张新亮. 片上集成多维光互连和光处理[J]. 中国激光，2021，48(12)：199-228.
Wang J, Cao X P, Zhang X L. On-chip integrated multi-dimensional optical interconnects and optical processing[J]. Chinese J. of Lasers, 2021, 48(12): 199-228.

[28] He Y, Zhang Y, Wang H W, et al. Design and experimental demonstration of a silicon multi-dimensional (de)multiplexer for wavelength-, mode- and polarization-division (de) multiplexing[J]. Opt. Lett., 2020, 45(10): 2846-2849.

[29] Guo X H, Xiang J L, Zhang Y J, et al. Integrated neuromorphic photonics: Synapses, neurons, and neural networks[J]. Adv. Photonics Research, 2021, 2(6): 2000212.

[30] 白 冰，裴 丽，左晓燕. 用于人工智能的硅基光电子芯片[J]. 中兴通讯技术，2021，27(1)：77-82.
Bai B, Pei L, Zuo X Y. Silicon photonic chips for artificial intelligence[J]. ZTE Communications, 2021, 27(1): 77-82.

[31] Shen Y C, Harris N C, Skirlo S, et al. Deep learning with coherent nanophotonic circuits[J]. Nature Photonics, 2017, 11: 441-446.

[32] Bangari V, Marquez B A, Miller H, et al. Digital electronics and analog photonics for convolutional neural networks (DEAP-CNNs)[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(1): 1-13.

[33] Fang M Y S, Manipatruni S, Wierzynski C, et al. Design of optical neural networks with component imprecisions[J]. Opt. Express, 2019, 27(10): 14009-14029.

[34] Tian Y, Zhao Y, Liu S P, et al. Scalable and compact photonic neural chip with low learning-capability-loss[J]. Nanophotonics, 2022, 11(2): 329-344.

[35] Williamson I A D, Hughes T W, Minkov M, et al. Reprogrammable electro-optic nonlinear activation functions for optical neural networks[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(1): 1-12.

[36] Tait A N, De Lima T F, Zhou E, et al. Neuromorphic photonic networks using silicon photonic weight banks[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 7430.

[37] Tait A N, De Ferreira L T, Nahmias M A, et al. Silicon photonic modulator neuron[J]. Physical Review Applied, 2019, 11(6): 064043.

[38] Roques-Carmes C, Shen Y C, Zanoci C, et al. Heuristic recurrent algorithms for photonic ising machines[J]. Nature Communications, 2020, 11: 249.

[39] Vandoorne K, Mechet P, Vaerenbergh T V, et al. Experimental demonstration of reservoir computing on a silicon photonics chip[J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 3541.

[40] 周治平. 硅基光电子学[M]. 第2版. 北京：北京大学出版社，2021.
Zhou Z P. Silicon-Based Optoelectronics[M]. 2nd Ed. Beijing: Peking University Press, 2021.

[41] Leuermann J, Stamenkovic V, Ramirez-Priego P, et al. Coherent silicon photonic interferometric biosensor with an inexpensive laser source for sensitive label-free immunoassays [J]. Opt. Lett., 2020, 45(24): 6595-6598.

[42] Chang Y H, Dong B W, Ma Y M, et al. Vernier effect-based tunable mid-infrared sensor using silicon-on-insulator cascaded rings[J]. Opt. Express, 2020, 28: 6251-6260.

[43] Wang J W, Medina-SÁnchez M, et al. Silicon-based integrated label-free optofluidic biosensors: Latest advances and roadmap[J]. Adv. Materials Technologies, 2020, 5(6): 1901138.

[44] Lo S M, Hu S, Gaur G, et al. Photonic crystal microring resonator for label-free biosensing[J]. Opt. Express, 2017, 25(6): 7046-7054.

[45] Diekmann R, Helle Y I, Ie C I, et al. Chip-based wide field-of-view nanoscopy[J]. Nature Photonics, 2017, 11(5): 322-328.

[46] Ragman M, Stott M A, Harrington M, et al. On demand delivery and analysis of single molecules on a programmable nanopore-optofluidic device [J]. Nature Communications, 2019, 10: 3712.

[47] Patel D. Rockley photonics will revolutionize healthcare by measuring biomarkers such as glucose with lasers in the apple watch[DB/OL]. (2021-06-22). https://semianalysis.com/rockley-photonics-will-revolutionize-healthcare-by-measuring-biomarkers-such-as-glucose-with-lasers-in-an-apple-watch/

[48] Guo Y J, Guo Y H, Li C S, et al. Integrated optical phased arrays for beam forming and steering[J]. Appl. Sciences, 2021, 11(9): 4017.

[49] Li Y Z, Chen B S, Na Q X, et al. Wide-steering-angle high-resolution optical phased array [J]. Photonics Research, 2021, 9(12): 2511-2518.

[50] Phare C T, Shin M C, Miller S A, et al. Silicon optical

phased array with high-efficiency beam formation over 180 degree field of view[J]. arXiv 2018, arXiv: 1802.04624.

[51] Wang P F, Luo G Z, Yu H Y, et al. Improving the performance of optical antenna for optical phased arrays through high-contrast grating structure on SOI substrate[J]. Opt. Express, 2019, 27(3): 2703-2712.

[52] 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 J. of Sel. Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(5): 1-8.

[53] Wang J W, Sciarrino F, Laing A, et al. Integrated photonic quantum technologies[J]. Nature Photonics, 2020, 14: 273-284.

[54] Pelucchi E, Fagas G, Aharonovich I, et al. The potential and global outlook of integrated photonics for quantum technologies[J]. Nature Rev. Phys., 2022, 4: 194-208.

[55] 张晓峰, 朱　俊, 曾贵华. 量子光源综述[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2011, 31(2): 83-93.
Zhang X F, Zhu J, Zeng G H. Overview of quantum light source[J]. J. of Nanjing University of Posts and Telecommun. (Nature Science Edi.), 2011, 31(2): 83-93.

[56] Moody G, Chang L, Steiner T J, et al. Chip-scale nonlinear photonics for quantum light generation[J]. AVS Quantum Science, 2020, 2: 041702.

[57] Vernon Z, Menotti M, Tison C C, et al. Truly unentangled photon pairs without spectral filtering[J]. Opt. Lett., 2017, 42(18): 3638-3641.

[58] Liu Y W, Wu C, Gu X W, et al. High-spectral-purity photon generation from a dual-interferometer-coupled silicon microring[J]. Opt. Lett., 2020, 45(1): 73-76.

[59] Llewellyn D, Ding Y, Faruque I I, et al. Chip-to-chip quantum teleportation and multi-photon entanglement in silicon[J]. Nature Rev. Phys., 2020, 16: 148-153.

[60] Arrazola J M, Bergholm V, BrÁdler K, et al. Quantum circuits with many photons on a programmable nanophotonic chip[J]. Nature, 2021, 591: 54-60.

[61] Reimer C, Sciara S, Roztocki P, et al. High-dimensional one-way quantum processing implemented on d-level cluster states[J]. Nature Physics, 2019, 15: 148-153.

作者简介：

马浩然(1999—)，男，河南省林州市人，博士研究生，主要从事光量子芯片的研究；

李筱敏(1999—)，女，湖南省长沙市人，博士研究生，主要从事电光调制器的研究；

王曰海(1974—)，男，山东省济南市人，博士，副研究员，主要从事光信号处理、硅基光子集成、多媒体智能等方面的研究工作；

杨建义(1969—)，男，浙江省温州市人，博士，教授，博士生导师，主要从事硅基光子集成、硅基光量子芯片与应用等方面的研究。