

硅基集成光量子芯片技术*

强晓刚[†] 黄杰 王洋 宋海菁

(军事科学院国防科技创新研究院 北京 100071)

2023-07-03 收到

[†] email: qiangxiaogang@gmail.com

DOI: 10.7693/wl20230801

Integrated silicon quantum photonics

QIANG Xiao-Gang[†] HUANG Jie WANG Yang SONG Hai-Jing

(Defense Innovation Institute, Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China)

摘要 光量子芯片技术采用传统半导体微纳加工工艺,可在单个芯片上集成大量光子器件,实现量子信息处理应用,具有高集成度、高精度、高稳定性等优势。基于硅基集成光学技术的硅基光子芯片,得益于其CMOS可兼容、非线性效应强、超高集成度等特点,在未来实现实用化大规模光子计算与信息处理应用方面展示出巨大潜力。文章对硅基集成光子芯片技术进行介绍,包括硅基集成光学基础器件,硅基光子芯片上光子的产生、操控和探测等技术,以及面向量子计算及量子信息处理应用方面大规模硅基光子芯片技术的近期进展,并对面临的技术挑战与发展方向进行展望。

关键词 硅光子芯片, 集成量子光学, 量子信息, 量子计算

Abstract Integrated quantum photonics enables the integration of a large number of photonic components on a single device using traditional semiconductor micro-nano processing technology to realize quantum information processing applications, which has the advantages of high integration, high accuracy and high stability. Silicon quantum photonics shows great potential for future large-scale photonic quantum computing and information processing applications of practical interest, due to its CMOS compatibility, strong nonlinear effects, and ultra-high integration. This article presents an introduction to silicon quantum photonics, including the fundamental components, the generation, manipulation and detection of photons on silicon photonic chips, and the development of large-scale silicon quantum photonic chips for quantum computing and quantum information processing applications. The technical challenges and future directions will also be briefly discussed.

Keywords silicon quantum photonics, integrated quantum photonics, quantum information, quantum computation

* 国家自然科学基金(批准号: 62075243; 62205376)资助项目

1 引言

量子信息技术是遵循量子力学规律调控量子信息单元进行信息的编码、存储、传输、处理等的新型信息技术。利用量子叠加、干涉以及纠缠等量子物理特性，量子信息技术展示出超越经典信息技术的巨大应用潜力，例如量子计算具有天然的并行性及超大的信息存储能力，在大数质因子分解、数据库搜索、生物化学模拟等应用中可实现超越经典的计算加速。线性光学量子系统是实现量子计算等量子信息应用的主要物理途径之一，它的主要特点包括：光子具有很长的相干时间，不容易受到外界环境干扰而退相干；光子操控相对容易，利用线性光学元件可以实现对单光子的高精度操控；光子的多自由度可以用于编码高维度量子信息；能够在室温下工作等。基于线性光学量子系统，将单光子作为量子信息单元的载体，可以实现量子态的编码、操控、传输以及探测，进而实现不同的复杂量子计算与量子信息处理应用。

传统上线性光学量子系统大都为分立元件系统，即在光学平台上使用分立的体块线性光学元件组合搭建形成，通过波片、透镜、反射镜等光学元件实现对光子的操控。分立元件量子光学系统不仅体积巨大，而且各个分立元件容易受到外界环境中温度变化、机械振动等诸多因素的影响，系统的稳定性及可扩展性都受到很大的制约。集成光量子芯片技术就是为了克服分立元件量子光学系统的这些不足所提出来的，2008年英国布里斯托大学研究团队首次实验演示了集成光量子芯片技术^[1]。借助于传统半导体微纳加工工艺，集成光量子芯片技术可将光学元件以薄膜形式集成到单个芯片上，不仅实现了线性光学量子系统的集成化，而且具有更高的精确度、更高的稳定性及更好的可扩展性，同时未来批量化生产也将使成本大大降低。因此，集成光量子芯片技术为实现未来实用化大规模、集成化的光量子计算与光量子信息处理应用提供了非常可行的技术途径。

集成光量子芯片的常用材料体系包括硅、氮

化硅、二氧化硅、铌酸锂薄膜等多种材料体系。基于硅基材料体系，特别是绝缘体上硅(silicon-on-insulator, SOI)材料的集成光量子芯片技术，得益于其CMOS工艺可兼容、非线性效应强、集成密度高、可大规模生产等优势，近年来发展非常迅速，备受瞩目。面向未来大规模光量子计算与量子信息处理应用，硅基集成光量子芯片技术在器件集成规模、量子计算应用实现等方面取得了一系列进展，展示出巨大的发展潜力。目前整体上硅基光量子芯片已广泛采用130 nm或更先进的工艺节点进行芯片加工。一系列器件数目达到数百乃至千级的大规模可编程硅基光量子芯片^[2-5]，以及以芯片为核心实现的软硬件一体原型系统样机^[6]被研制出来，基于这些芯片或系统已经进行了丰富的量子计算与量子信息处理应用的实验验证。此外，硅基集成光学技术在光通信、光计算等经典信息领域也具有广泛的应用，这些需求共同推动了当前硅基集成光学技术的快速发展。

2 硅基集成光学基础器件

与分立元件线性光学系统是由波片、分束器、透镜、反射镜等各种基础元件组合而成一样，一个复杂的光量子芯片也包含不同种类的集成化光学器件。硅材料具有很强的三阶非线性效应和紧致模式约束特性，利用半导体微纳加工工艺，可以实现高密度片上集成的光量子芯片基础器件，如光波导、光分束器、光耦合器、光调制器等，如图1所示。

光量子芯片上最基础的器件是光波导，通过它来连接片上集成的其他光学器件，光波导性能直接决定光信号的传输质量。常用的光波导有条型波导、脊型波导，其中条型波导结构简单紧凑，极限弯曲半径较小，主要用于一般的无源光器件(图1(a))；脊型波导具有较大的横向尺寸，能够以较低的耦合损耗与单模光纤进行端面耦合，被广泛使用在有源光器件中(图1(b))。目前，国内外主要半导体代工厂发布的硅光工艺设计工具包(process design kit, PDK)中条形光波导的损耗约为1.5 dB/cm，随着硅光微纳加工技术的进步，光波

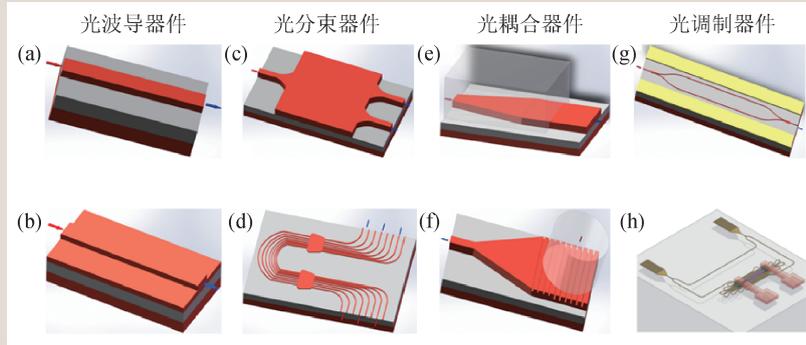


图1 硅基集成光学基础器件 (a)条型光波导; (b)脊型光波导; (c)1×2光分束器; (d)阵列波导光栅波分复用器; (e)端面耦合器; (f)光栅耦合器; (g)电光效应调制器; (h)热光效应调制器

导加工精度和损耗水平还在不断提升。Cardenas等人采用选择性氧化技术制备了侧壁宽度变化仅为0.3 nm的超光滑光波导^[7],该波导在1.55 μm波长处的传输损耗低至0.3 dB/cm,验证了SOI材料平台实现极低损耗光波导的可能性。

光或光子在芯片光波导中传输时,通过光分束器件实现光能量、波长、偏振等的路由、分束及合束功能。常用的光分束器结构包括多模干涉耦合器(multimode interferometer, MMI)、定向耦合器或Y分支结构等。MMI结构由于具有带宽大和稳定性好等优势,目前应用最为广泛。Sheng等人在2012年设计实现的1×2 MMI光能量分束器,其损耗约为0.06 dB(图1(c))^[8]。Yao等人在2021年采用粒子群算法对多通道MMI光能量分束器的输入输出波导结构进行了优化^[9],获得了良好的均匀性和较低的损耗,实验测试结果表明,1×8光能量分束器在超过100 nm带宽范围内,一致性为0.19—0.83 dB。基于光分束器的集成光量子芯片波分复用器^[10]和偏振控制器^[11]也被广泛研究(图1(d)),可分别用于实现光子波长、偏振等自由度的操控。例如,Ding等人在2013年设计了基于渐变波导和MMI结构的偏振分束旋转器^[11],最小插入损耗为0.6 dB。为进一步提高器件性能,缩小器件尺寸,拓展器件功能和用途,Huang等人利用逆向设计方法^[12]设计了全新的多功能聚焦波长分束器^[13]和可扩展偏振分束器^[14],其中聚焦波长分束器可以同时实现光模式的聚焦

和光波长的分束,可扩展偏振分束器则能在0.48 μm×6.4 μm的器件尺寸下实现C波段、L波段和O波段的光偏振分束。

光耦合器则主要用于实现芯片与外部器件的互连,常用的光耦合器包括端面耦合器和光栅耦合器(图1(e), (f))。其中端面耦合器是通过在芯片端面优化设计渐变耦合结构,具有耦合光偏振不敏感和耦合带宽大的优点,Cheben等人2015

年实现的硅光体系端面耦合器中光场耦合损耗最低可降至0.32 dB/facet,偏振无关耦合带宽大于100 nm^[15]。光栅耦合器是利用特定的光栅结构以一定垂直角度实现光波到芯片的耦合输入/输出,具有设计实现简单、位置布局灵活和对齐对准容差较大的优势。Ding等人在2013年设计了一种啁啾渐变的光子晶体光栅,实现了1.74 dB/facet的超低损耗^[16]。目前光栅耦合器的用途也在不断扩展,如二维光栅耦合器可以实现偏振自由度与路径自由度的转换^[17],Sun等人在2023年设计了具有偏振分束功能的光栅耦合器^[18]。

硅光体系可以通过多种方式实现光调制/相移器件。基于等离子体色散效应的载流子耗尽型电光效应调制器,可实现低功耗条件下的GHz高速光调制,但光损耗相对较大(图1(g))^[19]。基于光波导上覆盖电阻发热实现相位调制的热光效应相移器^[20],调制速度相对较慢,但工艺简单、尺寸小、功耗低(10—100 mW量级)^[21],且其器件功耗通过挖槽^[22]和波导缠绕^[23]等工艺可以降至几mW量级(图1(h))。此外,基于光波导物理形变效应的微机电系统(MEMS)结构调制器光学损耗低,但工艺复杂且器件尺寸相对较大^[24]。通过调制器件与光分束器件组合,可以进一步实现马赫—曾德尔干涉仪,是硅光量子芯片实现芯片编程配置的核心器件,是影响计算精度的关键因素。2016年Wilkes等人设计了基于级联结构的马赫—曾德尔干涉仪^[25],该器件可实现对加工误差的有效自动补偿,实现了大于60 dB的消光比。

3 硅基光量子芯片的主要组成

前文介绍的基础器件为实现硅基光量子芯片提供了最基本的器件基础，利用这些基础器件实现大规模的量子计算、量子模拟等应用，核心就是要实现硅基光量子芯片上的光子产生、光子操控以及光子探测，下面进行具体的介绍。

3.1 硅基光量子芯片上的光子产生

硅波导具有很强的三阶非线性效应，在硅基光量子芯片上可以通过自发四波混频(spontaneous four-wave mixing, SFWM)过程来实现光子的产生(图2(a))。在SFWM过程中，两个泵浦光子湮灭产生频率关联的信号—闲频光子对，将其中一个光子用作预报，就可以实现预报型的单光子源^[26-29]。单波长泵浦SFWM光子源产生的信号和闲频光子频率非简并，即频率不一致^[30-33]，而通过双波长泵浦可以产生频率一致的光子对^[33-36]。常用的光子源结构包括长直波导结构和微环谐振腔结构，前者常设计成“蚊香”状(图2(b))，所生成的光子频谱宽，而后者占用片上面积更少(图2(c))，所生成的光子频谱窄，但对加工精度等的要

求也更高。通过使用包含相移器的微环光子源结构设计，能够对片上光子源的纯度、亮度等进行提升^[37-40]，也能够用于产生片上可配置的纠缠光子对^[2, 3]。得益于SOI微纳加工工艺，片上集成的SFWM单光子源通常可以保持很好的一致性，用于产生片上预报型全同光子^[29]和高维纠缠光子对^[5]。纠缠光子源是量子光学研究和光量子信息技术应用的重要资源，在硅基光量子芯片上，通过相干泵浦多个单光子源可以方便地实现路径纠缠的光子态制备^[5, 41]。2019年，中国科学技术大学任希峰团队利用多模硅波导中的SFWM过程实现了片上横模纠缠光子对源，横模纠缠可以相干转换为路径纠缠和偏振纠缠，这为片上实现高维多自由度量子态提供了新途径^[42]。

光量子芯片上多光子产生技术正在不断发展。2019年，英国布里斯托大学团队在硅基光量子芯片上集成了4个长波导光子源，通过符合探测8光子实现了片上4个预报型全同光子，并进行了玻色采样实验^[29]。基于SFWM效应的光子源只能概率性地产生光子，产生效率较低，但可以通过时域^[43, 44]、波长^[45]或者空间^[46]复用技术来提升预报光子率，其关键技术挑战在于片上低损的高速光开关等片上器件的实现。此外，固态单光子源如色心、半导体量子点等光子源方案原理上可以确定

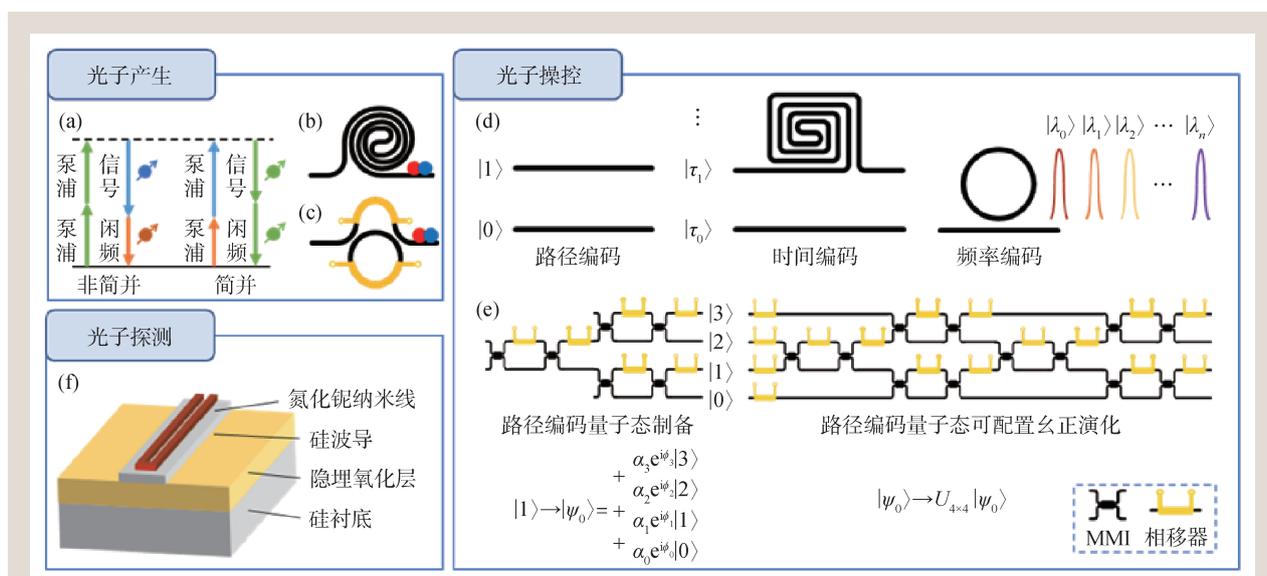


图2 硅基光量子芯片功能模块 (a)自发四波混频；(b)螺旋结构光子源；(c)不等臂干涉仪耦合微环光子源；(d)不同编码自由度；(e)路径编码量子态制备和操控；(f)硅基芯片集成超导纳米线单光子探测器(SNSPD)示意图

性地产生单光子，固态单光子源与硅基光波导的集成也是目前正在快速发展的片上单光子源实现途径^[47-52]。

3.2 硅基光量子芯片上的光子操控

光子具有偏振、模式、路径、时间、频率等多种自由度可以用于编码量子态。在硅基光量子芯片上，已经能够实现对光子的多种自由度进行量子态编码与操控。利用光子在并行传输的多根光波导中的路径信息可实现路径编码的光子态^[5, 33]，通过片上马赫-曾德尔干涉仪及相移器的不同组合结构就可以实现对路径编码量子态的任意调控(图2(d))^[2]。波导中的横电场和横磁场可以构成一组偏振本征态^[53]，通过偏振控制器件^[54-56]实现偏振编码量子态的调控。多模波导的多个本征模式也可以用来编码量子信息^[57, 58]，并且实现了基于模式调控的受控非门(controlled-NOT, CNOT)^[59]。通过硅光量子芯片上实现光延时线，可以利用光子的时间自由度实现时分编码(time-bin)的量子态制备与操控^[60]。光学谐振腔可以用来产生编码光子态的频率本征态^[61]。在光子芯片上，还可以将多种自由度操控结合起来，通过实现多自由度高维光量子态的制备与操控来提升光量子芯片的信息编码与处理能力。

针对不同的量子信息应用，使用不同的编码自由度可以更好地发挥优势，如使用偏振和时间编码可以保证光量子芯片间通过光纤进行量子信息传输的鲁棒性，而路径编码则由于设计简单、易于实现高精度的可编程操控等优势，目前多用于大规模集成硅光量子计算芯片设计。在硅光量子芯片上使用路径编码量子态可在片上构建可实现任意么正变换的大规模可配置线性光学网络，来实现通用的量子么正操作(图2(e))^[62, 63]，这类片上可配置光学网络主要分为三角形架构^[62, 64]和正方形架构^[63, 65]。在大规模硅光量子芯片上实现通用两比特计算^[2]、高维量子态制备^[5]、量子逻辑门^[64]、量子漫步^[3]、量子模拟^[65, 66]、玻色采样^[29]、深度学习^[67]等一系列量子计算或模拟应用中均采用路径编码实现的可配置光学网络。

3.3 硅基光量子芯片上的光子探测

光子探测是将光子信号转换成电信号，是实现量子态信息读取的重要步骤。雪崩光电二极管(avalanche photodiodes, APD)和超导纳米线单光子探测器(superconducting nanowire single photon detector, SNSPD)是量子计算、量子通信等领域常用的两种单光子探测器件，APD可以工作在室温条件下但探测效率低。SNSPD可以实现从可见光到中红外波段的高探测效率、低抖动时间、低暗计数的单光子探测，它通过将纳米线冷却到其超导转变温度后实现光子探测，因此工作温度通常在1.5—4 K。目前绝大多数光量子芯片仅单片集成实现了片上光子产生与光量子态的编码和操控，而光子探测则是通过光纤与片上集成的光耦合器进行耦合，将光子导入外部的单光子探测器设备进行探测。将SNSPD与光量子芯片集成的光子探测正在不断发展^[68, 69]。2012年，通过将SNSPD直接构造在硅波导上的方式，混合集成实现了硅基芯片光子探测效率91%、抖动时间18 ps、暗计数50 Hz的优异性能(图2(f))^[68]。

除了工作在低温环境的SNSPD，近期硅上锗波导耦合的APD在125 K温度下实现了对1310 nm波长38%的探测效率^[70]，为未来室温条件下的集成光量子应用提供了可能性。另一方面，瞄准光子产生、操控以及探测集成于单个芯片的目标，光子源、光子线路以及单光子探测器的全集成光量子芯片也在快速发展^[71-73]，目前已经通过毫米级倒装工艺实现了光量子线路和10个低抖动时间SNSPD的集成，平均探测效率超过10%^[72]。

4 大规模硅基集成光量子芯片进展

硅基集成光量子芯片受益于硅基集成工艺相对成熟的技术基础，芯片上集成的器件规模和种类都快速增长，在过去10余年间，单个硅基光量子芯片上集成的器件数目从数十个已经增长到数百个乃至千级，显示出快速的增长趋势，如图3

所示。同时，通过对芯片上大量集成的相移器、调制器等可配置器件进行操控，硅基光量子芯片可以通过动态编程来实现复杂的量子计算与量子信息处理等任务。硅基光量子芯片技术的大规模集成、可编程配置等优势，推动其在基于光学系统的量子计算、量子模拟以及量子信息处理等应用方面取得了一系列进展。

4.1 量子计算与量子模拟应用

硅基光量子芯片技术为实现大规模光量子计算应用提供了有效的技术途径，利用硅基光波导非线性效应实现的SFWM光子源，可以实现片上纠缠光子对的产生与操控^[33]，通过编程配置片上集成的线性光学网络就可以制备光量子态、实现量子光学幺正操作^[29, 64]，这使得大规模可编程的集成化光量子计算逐渐成为现实。2018年，军事科学院强晓刚等基于大规模硅基集成光学技术实现了国际首个通用两比特硅基光量子计算芯片^[2]，如图4(a)所示，芯片上集成了包括单光子源、滤波器、热光相移器、光分束器、光耦合器等200多个器件，通过使用幺正算符叠加与高维光量子态编码结合的量子计算架构，在单个芯片上实现了纠缠光子的产生、光量子态制备、操控以及投影测量，首次实现了基于线性光学系统的通用两比特量子计算。基于芯片进行了约10万次编程配置，所实现的98个两比特量子门的平均保真度超过93%，系统性展示了硅基光量子芯片技术实现大规模、高精度、可编程光量子计算的可行性。硅基光量子芯片上易于实现高维光量子态编码与操控的特点，为片上光子资源受限情况下不断提升芯片量子计算能力提供了基础。利用片上路径编码的高维光量子态的编码与操控，2020年南京大学马小松等基于硅基光量子芯片实现了双光子三维纠缠态(2-Qutrit)并演示了多种量子信息应用^[74]，如图4(b)所示。2022年北京王剑威等进一步实现了基于四维光子纠缠态(2-Qudit)的可

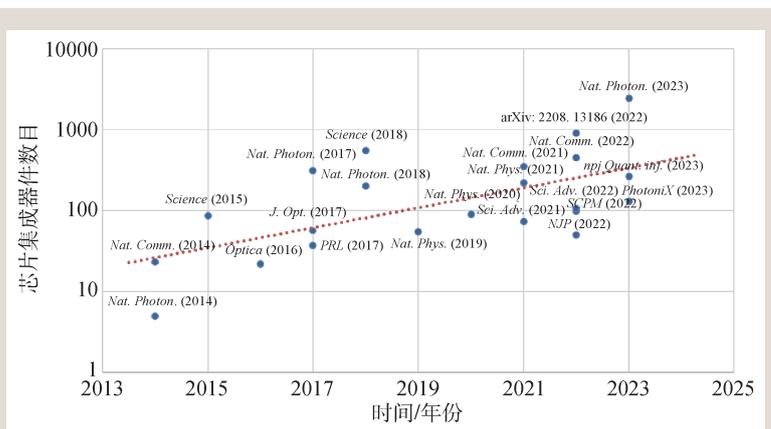


图3 硅基光量子芯片集成器件数目随时间增长情况

编程硅光量子计算芯片，其中每个 Qudit 为 4 维光量子态，芯片可等效实现 4 量子比特的量子计算应用^[75]，如图 4(c)所示。同时，硅基光量子芯片技术也非常适合通过对预先制备的大规模纠缠量子态中的量子比特进行逐次测量来实现通用量子计算的方案^[76, 77]，这为未来通用可容错光量子计算奠定了基础。

面向量子模拟、人工智能等特定领域的专用量子计算是当前量子计算研究的重要方向，有望比通用量子计算机更早地获得应用，面向特定应用的专用硅光量子计算芯片近年来取得不少进展。在量子模拟方面，大规模集成的硅基光量子芯片能够构建复杂量子光学系统，从而用于实现复杂的量子物理实验验证与量子模拟应用。2018年，王剑威等通过在硅基光量子芯片上集成了16个单光子源与光学网络，实验实现了双光子高维路径纠缠量子态的制备与操控^[5]，并基于硅基光量子芯片实验演示了高维光量子态的延迟选择实验^[78]。Harris等利用硅基光芯片上规模化集成的马赫—曾德尔干涉仪网络实现了量子输运现象的实验模拟^[66]。Paesani等在硅基光量子芯片上实现了8光子的玻色采样算法及化学分子动态演化模拟^[29]，如图4(d)所示。在光量子芯片上还可以通过光子的波长、偏振和时间等自由度来模拟量子系统的自旋、能级和相互作用等特性。利用可编程的硅基光量子芯片，量子相位估计、变分量子本征值求解等量子算法被用来实现分子哈密顿量特征值、特征向量等信息的求解^[41, 79, 80]。将目标哈密顿量

的演化过程映射为特定图上量子漫步演化过程的量子漫步模型量子模拟算法也在硅基光量子芯片上进行了实验验证, 演示了拓扑绝缘体的拓扑相位^[6]、时间反演对称破缺对量子输运增强等的模拟^[65]。2023年, 王剑威等基于量子图纠缠态理论实现的硅基可编程光量子芯片, 实现了基于图论的光量子计算和信息处理功能、多光子高维量子纠缠制备以及可编程玻色采样专用量子计算^[4]。

采用专用量子计算模型的大规模硅基光量子计算芯片在大数据处理、人工智能领域中也展示出显著的应用潜力。2019年, Steinbrecher等提出一种光量子神经网络架构, 将机器学习神经网络特征映射到量子光学领域^[81]。2022年, Zhang等在硅基光量子芯片上采用量子自编码器, 实现了高维量子态的压缩和隐形传态^[82]。量子漫步(quantum walk, QW)作为一种专用量子计算模型, 可用于量子模拟及量子算法设计, 特别地通过将图论问题求解与光子的量子漫步演化过程联系起来, 量子漫步模型及算法展示出巨大的应用潜力。基于量子漫步模型的量子算法可以用于图顶点搜索^[83, 84]、图节点中心度排序^[85, 86]、图同构判定^[87]等图论问题应用。2021年, 强晓刚等基于硅基集成光学技术实现了国际首个面向图论问题应用的可

编程硅基光量子芯片, 如图4(e)所示, 可实现通用多粒子量子漫步的可编程动态模拟, 能够同时对演化时间、哈密顿量、粒子全同性及交换特性等量子漫步演化要素进行完全调控, 实验实现了最大25节点图上的顶点搜索、图同构判定等图论问题的量子算法求解^[3]。在此基础上, 2022年强晓刚与中国人民解放军国防科技大学吴俊杰团队等进一步实现了规模更大的可编程硅基光量子芯片, 芯片集成器件规模达到千级, 并以芯片为核心构建了软硬件一体的全栈式光量子计算系统, 可模拟最大节点数达400的图上的任意量子漫步演化过程以及量子漫步算法, 基于系统实验实现了数百节点规模复杂网络上的图论问题量子算法求解^[6], 如图4(f)所示。

4.2 量子信息处理应用

集成光量子芯片技术同样为量子密钥分发(quantum key distribution, QKD)、量子纠缠分发、量子精密测量等量子信息应用的实现提供了集成化、小型化的技术途径。基于硅基光量子芯片技术, 多种QKD协议应用被实现, 包括离散变量QKD、连续变量QKD、测量设备无关QKD以及

高维QKD协议等, 展示出硅基光量子芯片技术在QKD领域的应用潜力。2017年, 英国布里斯托大学团队基于硅基光量子芯片技术实现了多种QKD协议, 包括相干单向(coherent-one-way, COW)QKD、偏振编码BB84 QKD以及时间编码BB84 QKD协议(图5(a))^[88]。2019年, 新加坡南洋理工大学团队实现了基于硅基光量子芯片的连续变量量子密钥分发(CV-QKD, 图5(b))^[89]。2020年, 中国科学技术大学团队则基于硅基光量子芯片技术, 实验实现了与测量设备无关的量子密钥分发(MDI-QKD)协议(图5(c)), 实验演示的通信码率可达1.25 GHz^[90]。Ding等基于硅基光量子芯片和多芯

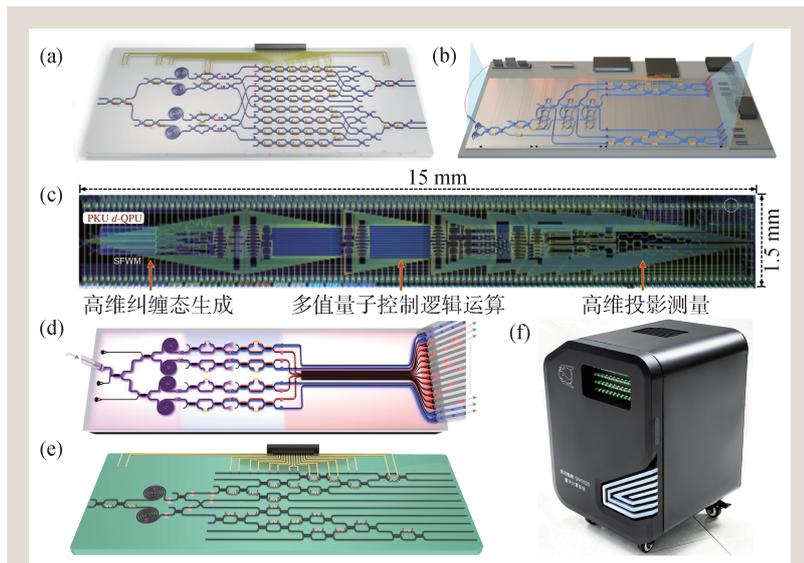


图4 面向量子计算与量子模拟的大规模硅基光量子芯片 (a)通用两比特硅基光量子计算芯片^[2]; (b)2-Qutrit硅基光量子芯片^[74]; (c)2-Qudit硅基光量子计算芯片^[75]; (d)面向玻色采样任务的硅基光量子芯片^[29]; (e)通用量子漫步模拟硅基光量子芯片^[3]; (f)软硬件一体的图论问题应用硅基光量子计算芯片原型系统^[6]

光纤，实验演示了基于空分复用的高维量子密钥分发协议，该方案可以在光纤长度较短的情况下实现高速、高效、高保真的高维量子密钥分发^[60]。

在硅基光子芯片上可以实现光子多自由度的操控及转换，如通过芯片上路径编码与偏振、轨道角动量等编码量子态的转换，能够实现光子纠缠态在不同芯片间的传输，进而实现不同光子芯片间的互连。2016

年英国布里斯托大学团队利用芯片上集成的2维光栅实现了路径编码光子态到偏振编码光子态的转换，展示了两个硅基光子芯片间高保真的纠缠分发与光子态操控^[91]。目前基于硅基光子芯片技术已经可以实现芯片间的高维量子隐形传态、多光子量子纠缠^[92, 93]。2022年，新加坡南洋理工大学团队在硅光子芯片上集成量子自编码器和解码器功能，以压缩—传输—解压缩的方式实现了3维光子态的压缩传输和量子隐形传态^[82]。这些进展为未来光子量子信息网络及分布式量子信息处理奠定了基础^[94]。

硅基光子芯片可在片上实现量子纠缠态的生成与精确操控，如图5(d)所示，不仅可以实现单光子编码的量子态，还可用于实现压缩态操控，从而为高精度、高灵敏度、高稳定的光学传感提供了新的途径，以及用于量子随机数生成器、量子传感器等应用中。例如通过将零差探测器(homodyne detector)集成到硅基光子芯片上，就可以用于量子态测量和随机数生成^[95]。2020年，

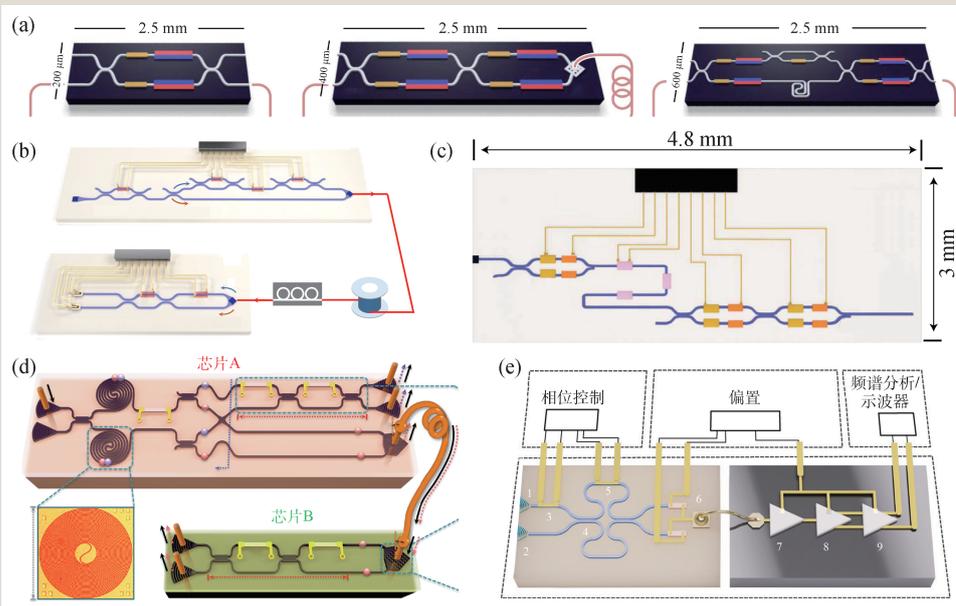


图5 面向量子通信与量子测量的硅基光子芯片 (a)面向相干单向QKD、偏振编码BB84 QKD以及时间编码BB84 QKD协议的硅基光子芯片^[88]; (b)面向连续变量QKD的硅基光子芯片^[89]; (c)面向MDI-QKD的硅基光子芯片^[90]; (d)硅基光子芯片间实现光子态传输与纠缠分发^[91], 其中芯片A产生路径纠缠光子对, 并将其中一个光子转化为偏振编码后经光纤传输至芯片B, 芯片B将接收到的偏振编码光子态转换为路径编码并进行投影测量, 左下角蚊香状波导结构为片上四波混频光子源器件; (e)基于硅基及硅上锗材料光子芯片的量子压缩光测量^[96]

Tasker等基于硅基及硅上锗等光子芯片技术实现了高精度的量子压缩光测量，如图5(c)所示，散粒噪声极限超过9 GHz^[96]。Payne等提出了一种硅和氮化硅光波导异质集成的光子温度传感芯片，有望实现高精度的温度测量^[97]。

5 总结与展望

硅基集成光子芯片技术以传统硅基集成工艺为基础，通过在单个芯片上集成化实现光子的产生、操控以及探测，为大规模光子量子计算及量子信息处理实现提供了有效途径。硅基光子芯片在过去10余年间的集成规模与计算能力也快速增长，展示出了巨大的应用潜力。大规模硅基集成光子芯片的进一步发展也面临着多方面的技术挑战：一是核心器件的设计优化，随着芯片集成规模的增加，芯片上单个器件的性能、体积、损耗都对芯片整体性能产生影响，需要发展更高性能、更小体积、更低损耗的光子器件；二是

大规模硅基光量子芯片优化设计与模拟仿真, 当前光量子芯片设计主要依靠设计人员的设计经验进行, 计算机辅助设计技术相对初级, 需要发展计算机辅助设计技术来进行大规模硅基光量子芯片的优化设计与模拟仿真; 三是大规模硅基光量子芯片的器件标定与封装测试, 芯片器件的精确标定直接影响着光量子芯片的整体性能, 随着芯片规模的不断增大, 需要实现器件的快速精确标定, 同时芯片的光电封装技术以及与电子控制芯片的混合封装等也是影响硅基光量子芯片实用化发展的重要因素。

硅光集成技术除了为光量子计算实现带来全

新的技术路线, 在经典光通信、光计算等领域也具有巨大应用潜力, 国内外传统半导体厂商和研究机构也不断加速硅光集成工艺方面的研究, 进一步地推动硅基集成光量子芯片技术的实用化进程发展。一方面, 未来包含激光器、单光子源、光量子网络以及单光子探测等功能, 以及与硅基电子芯片混合集成的全系统集成硅基光量子芯片随着技术的发展有望得到实现; 另一方面, 突破单一材料体系限制, 结合多种材料体系的异质集成光量子芯片技术也在不断发展, 有望发挥不同材料体系的特性与优点, 共同推进大规模实用化集成光量子计算与量子信息处理芯片的早日实现。

参考文献

- [1] Politi A, Cryan M J, Rarity J G *et al.* *Science*, 2008, 320(5876): 646
- [2] Qiang X, Zhou X, Wang J *et al.* *Nat. Photonics*, 2018, 12(9): 534
- [3] Qiang X, Wang Y, Xue S *et al.* *Sci. Adv.*, 2021, 7(9): eabb8375
- [4] Bao J, Fu Z, Pramanik T *et al.* *Nat. Photonics*, 2023, 17: 573
- [5] Wang J, Paesani S, Ding Y *et al.* *Science*, 2018, 360(6386): 285
- [6] Wang Y, Liu Y, Zhan J *et al.* 2022, arXiv: 2208.13186
- [7] Cardenas J, Poitras C B, Robinson J T *et al.* *Opt. Express*, 2009, 17(6): 4752
- [8] Sheng Z, Wang Z, Qiu C *et al.* *IEEE Photon. J.*, 2012, 4(6): 2272
- [9] Yao R, Li H, Zhang B *et al.* *J. Light. Technol.*, 2021, 39(19): 6253
- [10] Tachikawa Y, Inoue Y, Ishii M *et al.* *J. Light. Technol.*, 1996, 14(6): 977
- [11] Ding Y, Ou H, Peucheret C. *Opt. Lett.*, 2013, 38(8): 1227
- [12] Huang J, Ma H, Chen D *et al.* *Nanophotonics*, 2021, 10(3): 1011
- [13] Huang J, Yang J, Chen D *et al.* *Nanophotonics*, 2020, 9(1): 159
- [14] Huang J, Yang J, Chen D *et al.* *Photonics Res.*, 2018, 6(6): 574
- [15] Cheben P, Schmid J H, Wang S *et al.* *Opt. Express*, 2015, 23(17): 22553
- [16] Ding Y, Ou H, Peucheret C. *Opt. Lett.*, 2013, 38(15): 2732
- [17] Taillaert D, Chong H, Borel P I *et al.* *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, 15(9): 1249
- [18] Sun P, Van Vaerenbergh T, Hooten S *et al.* *Opt. Express*, 2023, 31(3): 4884
- [19] Liu A, Liao L, Rubin D *et al.* *Opt. Express*, 2007, 15(2): 660
- [20] Liu S, Feng J, Tian Y *et al.* *Front. Optoelectron.*, 2022, 15: 9
- [21] Harjanen M, Kapulainen M, Aalto T *et al.* *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(9): 2039
- [22] Fang Q, Song J F, Liow T Y *et al.* *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, 23(8): 525
- [23] Chung S, Nakai M, Hashemi H. *Opt. Express*, 2019, 27(9): 13430
- [24] Errando-Herranz C, Takabayashi A Y, Edinger P *et al.* *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2019, 26(2): 8200916
- [25] Wilkes C M, Qiang X, Wang J *et al.* *Opt. Lett.*, 2016, 41(22): 5318
- [26] Harada K, Takesue H, Fukuda H *et al.* *New J. Phys.*, 2011, 13(6): 065005
- [27] Faruque I I, Sinclair G F, Bonneau D *et al.* *Opt. Express*, 2018, 26(16): 20379
- [28] Paesani S, Borghi M, Signorini S *et al.* *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 2505
- [29] Paesani S, Ding Y, Santagati R *et al.* *Nat. Phys.*, 2019, 15(9): 925
- [30] Sharping J E, Lee K F, Foster M A *et al.* *Opt. Express*, 2006, 14(25): 12388
- [31] Clemmen S, Huy K P, Bogaerts W *et al.* *Opt. Express*, 2009, 17(19): 16558
- [32] Azzini S, Grassani D, Strain M J *et al.* *Opt. Express*, 2012, 20(21): 23100
- [33] Silverstone J W, Bonneau D, Ohira K *et al.* *Nat. Photonics*, 2014, 8(2): 104
- [34] He J, Bell B A, Casas-Bedoya A *et al.* *Optica*, 2015, 2(9): 779
- [35] Feng L T, Zhang M, Zhou Z Y *et al.* *npj Quantum Inf.*, 2019, 5(1): 90
- [36] He L, Liu D, Gao J *et al.* *Sci. Adv.*, 2023, 9(21): eadg6685
- [37] Liu Y, Wu C, Gu X *et al.* *Opt. Lett.*, 2020, 45(1): 73
- [38] Wu C, Liu Y W, Gu X W *et al.* *Sci. China: Phys. Mech.*, 2020, 63: 1
- [39] Zhu P, Liu Y, Wu C *et al.* *Chin. Phys. B*, 2020, 29(11): 114201
- [40] Wang Y, Zhu P, Xue S *et al.* *Chin. Phys. B*, 2022, 31(3): 034210
- [41] Santagati R, Wang J, Gentile A A *et al.* *Sci. Adv.*, 2018, 4(1): eaap9646
- [42] Feng L T, Zhang M, Xiong X *et al.* *npj Quantum Inf.*, 2019, 5(1): 2
- [43] Xiong C, Zhang X, Liu Z *et al.* *Nat. Commun.*, 2016, 7(1): 10853
- [44] Kaneda F, Kwiat P G. *Sci. Adv.*, 2019, 5(10): eaaw8586
- [45] Zhang X, Jizan I, He J *et al.* *Opt. Lett.*, 2015, 40(11): 2489
- [46] Collins M J, Xiong C, Rey I H *et al.* *Nat. Commun.*, 2013, 4(1): 2582

- [47] Kim J H, Aghaieibodi S, Richardson C J K *et al.* *Nano Lett.*, 2017, 17(12):7394
- [48] Katsumi R, Ota Y, Kakuda M *et al.* *Optica*, 2018, 5(6):691
- [49] Katsumi R, Ota Y, Osada A *et al.* *APL Photonics*, 2019, 4(3):036105
- [50] Hollenbach M, Jagtap N S, Fowley C *et al.* 2021, arXiv: 2112.02680
- [51] Prabhu M, Errando-Herranz C, De Santis L *et al.* *Nat. Commun.*, 2023, 14(1):2380
- [52] Higginbottom D B, Kurkjian A T K, Chartrand C *et al.* *Nature*, 2022, 607(7918):266
- [53] Matsuda N, Le Jeannic H, Fukuda H *et al.* *Sci. Rep.*, 2012, 2(1):817
- [54] Sacher W D, Barwicz T, Taylor B J F *et al.* *Opt. Express*, 2014, 22(4):3777
- [55] Guo D, Chu T. *OSA Continuum*, 2018, 1(3):841
- [56] Ruan X, Li H, Chu T. *J. Light. Technol.*, 2022, 40(21):7142
- [57] Feng L T, Zhang M, Zhou Z Y *et al.* *Nat. Commun.*, 2016, 7(1):11985
- [58] Mohanty A, Zhang M, Dutt A *et al.* *Nat. Commun.*, 2017, 8:14010
- [59] Feng L T, Zhang M, Xiong X *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2022, 128(6):060501
- [60] Fang W, Li Y *et al.* *Opt. Express*, 2018, 26(10):12912
- [61] Kues M, Reimer C, Roztocki P *et al.* *Nature*, 2017, 546(7660):622
- [62] Reck M, Zeilinger A, Bernstein H J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 73(1):58
- [63] Clements W R, Humphreys P C, Metcalf B J *et al.* *Optica*, 2016, 3(12):1460
- [64] Carolan J, Harrold C, Sparrow C *et al.* *Science*, 2015, 349(6249):711
- [65] Wang Y, Yu X, Xue S *et al.* *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 2022, 65:100362
- [66] Harris N C, Steinbrecher G R, Prabhu M *et al.* *Nat. Photonics*, 2017, 11(7):447
- [67] Shen Y, Harris N C, Skirlo S *et al.* *Nat. Photonics.*, 2017, 11(7):441
- [68] Pernice W, Schuck C, Minaeva O *et al.* *Nat. Commun.*, 2012, 3(1):1325
- [69] Schuck C, Pernice W H P, Ma X *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(19):191104
- [70] Vines P, Kuzmenko K, Kirdoda J *et al.* *Nat. Commun.*, 2019, 10:1086
- [71] Schuck C, Guo X, Fan L *et al.* *Nat. Commun.*, 2016, 7(1):10352
- [72] Najafi F, Mower J, Harris N C *et al.* *Nat. Commun.*, 2015, 6:5873
- [73] Khasminskaya S, Pyatkov F, Slowik K *et al.* *Nat. Photonics*, 2016, 10(11):727
- [74] Lu L, Xia L, Chen Z *et al.* *npj Quantum Inf.*, 2020, 6(1):30
- [75] Chi Y, Huang J, Zhang Z *et al.* *Nat. Commun.*, 2022, 13(1):1166
- [76] Bartolucci S, Birchall P, Bombin H *et al.* *Nat. Commun.*, 2023, 14(1):912
- [77] Bombin H, Kim I H, Litinski D *et al.* 2021, arXiv:2103.08612
- [78] Chen X, Deng Y, Liu S *et al.* *Nat. Commun.*, 2021, 12(1):2712
- [79] Wang J, Paesani S, Santagati R *et al.* *Nat. Phys.*, 2017, 13(6):551
- [80] Paesani S, Gentile A A, Santagati R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2017, 118(10):100503
- [81] Steinbrecher G R, Olson J P, Englund D *et al.* *npj Quantum Inf.*, 2019, 5(1):60
- [82] Zhang H, Wan L, Haug T *et al.* *Sci. Adv.*, 2022, 8(40):eabn9783
- [83] Childs A M, Goldstone J. *Phys. Rev. A*, 2004, 70(2):022314
- [84] Chakraborty S, Novo L, Ambainis A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 116(10):100501
- [85] Wang Y, Xue S, Wu J *et al.* *Sci. Rep.*, 2022, 12(1):6001
- [86] Izaac J A, Zhan X, Bian Z *et al.* *Phys. Rev. A*, 2017, 95(3):032318
- [87] Qiang X, Yang X, Wu J *et al.* *J. Phys. A: Math. Theor.*, 2012, 45(4):045305
- [88] Sibson P, Kennard J E, Stanisc S *et al.* *Optica*, 2017, 4(2):172
- [89] Zhang G, Haw J Y, Cai H *et al.* *Nat. Photonics*, 2019, 13(12):839
- [90] Wei K, Li W, Tan H *et al.* *Phys. Rev. X*, 2020, 10(3):031030
- [91] Wang J, Bonneau D, Villa M *et al.* *Optica*, 2016, 3(4):407
- [92] Llewellyn D, Ding Y, Faruque I I *et al.* *Nat. Phys.*, 2020, 16(2):148
- [93] Ren S Y, Wang W Q, Cheng Y J *et al.* *Photonix*, 2023, 4(1):1
- [94] Qiang X, Zhou X, Aungskunsiri K *et al.* *Quantum Sci. Technol.*, 2017, 2(4):045002
- [95] Raffaelli F *et al.* *Quantum Sci. Technol.*, 2018, 3(2):025003
- [96] Tasker J F *et al.* *Nat. Photonics*, 2021, 15(1):11
- [97] Payne D A, Matthews J C F. *Appl. Phys. Lett.*, 2022, 121(26):261104

读者和编者

《物理》有奖征集 封面素材

为充分体现物理科学的独特之美，本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投稿与物理学相关的封面素材。要求图片清晰，色泽饱满，富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用，均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至：physics@iphy.ac.cn；联系电话：010-82649029。

《物理》编辑部