硅基光量子芯片上量子调控技术和量子信息应用

包觉明¹, 陈晓炯¹, 丁运鸿^{2,3*}, 龚旗煌^{1,4,5,6}, 王剑威^{1,4,5,6*}

1. 北京大学物理学院, 人工微结构和介观物理国家重点实验室, 北京 100871;
2. Department of Photonics Engineering, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby 2800, Denmark;
3. Center for Silicon Photonics for Optical Communication (SPOC), Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby 2800, Denmark;
4. 北京大学教育部纳光电子前沿中心&量子物质科学协同创新中心, 北京 100871;
5. 北京量子信息科学研究院, 北京 100193;
6. 北京大学长三角光电科学研究院, 南通 226010

*联系人, 丁运鸿, E-mail: yudin@fotonik.dtu.dk; 王剑威, E-mail: jww@pku.edu.cn

收稿日期: 2020-02-19; 接受日期: 2020-04-01; 网络出版日期: 2020-06-17

国家自然科学基金(编号: 61975001, 11527901)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2019YFA0308702, 2018YFB1107205)资助项目

摘要 硅基集成光量子芯片是研究光量子信息技术与前沿应用的重要平台之一, 具有高集成度、高稳定性、强可控性、易扩展性等显著优点. 近年来, 硅基光量子芯片在多自由度、高维度、多光子、大规模可重构等关键的量子调控器件和技术上, 取得了一系列重要的科学进展, 并为光量子计算、量子模拟和量子通信等前沿应用的研究, 提供了强有力的硬件和技术支撑. 本文简要总结硅基光量子芯片上量子调控技术及其量子信息应用的前沿进展.

关键词 量子调控, 量子信息, 集成量子光学

PACS: 03.67.Hk, 03.67.Lx, 03.67.Mn, 42.50.Dv, 42.82.Gw

量子信息科学和技术是量子物理学与信息科学相结合的一门新兴前沿交叉学科. 量子技术通过利用量子叠加和量子纠缠等量子力学本质属性, 对量子信息进行有效的处理、计算、传输和存储等, 有望攻克现有经典技术难以有效解决的诸多科学问题. 例如, 指数或多项式加速计算某些重要的复杂问题^[1,2], 有效模拟复杂的量子物理体系和化学材料分子结构^[3], 保证信息和数据传递的可证明安全性^[4], 以及大幅度提升

物理测量的极限等^[5].

量子器件的发展正经历一个从分立元器件到芯片集成化的过程, 这也是科技革命发展的必然趋势^[6]. 光子是量子信息的理想载体之一, 具有噪声低、传输速度快、拥有多种自由度等优点. 通过利用CMOS微纳制造技术, 在硅基光芯片上加工出纳米尺度线宽且大规模集成的高性能量子器件和硬件, 可实现芯片上光量子态的高效制备、操控和探测. 硅基光芯片技术具

引用格式: 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. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 084216
Bao J M, Chen X J, Ding Y H, et al. Silicon-based photonic quantum information technologies (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 084216, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0043](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0043)

有诸多独特优点, 如波导约束能力强、集成密度高、与微电子加工工艺相兼容、有望单片集成各种核心的光子功能器件, 包括量子光源、量子操控光路及单光子探测器等. 硅基集成光子芯片技术, 被认为是实现量子密钥分发与通信、量子计算与量子模拟等功能的重要平台之一.

硅基光子芯片的量子调控能力主要体现在以下几方面: 对光子多自由度的调控能力, 量子态空间的扩张与操控能力, 可重构量子操作与可编程量子信息处理能力, 以及可超大规模集成能力.

对光子进行量子信息编码主要包括偏振、模式、时域、频率和路径等方式. 在芯片上对光子多个自由度的编码和调控取得了诸多进展, 如图1所示. 波导中的准横电和横磁模式可以构成极化编码的量子比特^[7]. 多模光波导支持多个本征模式, 可用来编码量子信息^[8,9]. 光子可处于时域叠加态, 并通过集成的弗兰森干涉仪实现^[10]. 利用光学谐振腔, 光子的频率可处于叠加态来编码量子信息^[11]. 对于路径编码^[12,13], 光子的路径位置处于一种无法确定的量子叠加态, 这种方法的优势在于通过使用马赫-泽德干涉仪可达到高精度和高稳定的芯片上量子态制备、操作和测量. 需要指出的是, 特定的编码方式在不同的量子信息应用中具有独特优势, 如偏振和时间编码适合于芯片间量子信息的传递, 路径编码适合芯片上量子信息处理和计算.

量子态空间的大小取决于光子数和光子模式数. 为扩展光子的模式数目, 即单个光子携带的正交本征基的数目, 可通过操控光子的模式^[8,9]、时域^[10]、频率^[11]和路径^[12,13]实现. 其中芯片上路径编码可实现高维量子

态的任意操作与测量. 基于多路径编码的高维量子纠缠已在大规模集成硅基光芯片上实现(图2(a))^[13]. 通过相干激发16个参量四波混频单光子源阵列, 并精确调控32模干涉仪阵列, 实现了对 15×15 高维量子纠缠态的精确制备、操作与测量. 基于马赫-泽德干涉仪-微环谐振腔耦合型光源的 3×3 高维量子纠缠态制备、操作与测量也已实现^[14], 且该光源可实现高亮度的双光子对产生^[15]. 芯片上多光子态的制备是实现可扩展量子芯片的重要前提. 图2(b)所示芯片实现了四光子四比特真量子纠缠态的芯片上产生、操作和测量^[16]. 基于微环谐振腔实现了高性能的多光子量子光源, 光子全同性优于90%, 无后处理触发效率达到了50%, 双光子纠缠源保真度达到了92%, 实现了可重构的芯片上双比特纠缠门, 实现并判定了四比特Greenberger-Horne-Zeilinger真量子纠缠的存在.

硅基光子芯片具有强可重构性, 通过重编程芯片可在一个芯片中实现多个量子任务和量子算法, 这也是实现通用量子计算的重要前提. 上述量子纠缠制备、操控和测量的实现, 便是得益于芯片的可重构性和可编程性. 另外, 采用线性组合方案实现了一款任意双量子位硅基光子量子处理器芯片, 能够编程执行不同的量子信息处理任务^[17]. 芯片编程实现了98个不同的量子逻辑门(如CNOT和SWAP等), 量子过程保真度达到93%, 实现了不同的量子信息处理应用, 如量子优化算法和量子漫步算法等.

硅基光子芯片的多自由度调控能力, 复杂量子系统的操控能力, 可重构量子操作能力等, 为芯片上量子计算与量子模拟、量子密钥分发与通信等前沿应

图1 (网络版彩图)芯片上用于编码和处理不同自由度单光子量子信息的方式: 偏振、空间和时间模式、位置(路径)、频率
Figure 1 (Color online) An integrated toolkit for encoding and processing quantum information in single photons with different degrees of freedom on chip: polarization, spatial and temporal modes, location (path), frequency.

图 2 (网络版彩图) 硅基芯片上光子量子调控技术与量子信息应用. (a) 高维度纠缠态芯片上制备、调控与测量^[13]; (b) 多光子纠缠态芯片上制备、调控与测量^[16]; (c) 芯片间量子纠缠分布的功能演示^[18]和量子隐形传态^[16]; (d) 芯片间高维量子密钥分发的功能演示^[21]; (e) 用于量子模拟化学^[23]和物理体系^[24]的可编程光子量子芯片; (f) 面向通用光子量子计算的小规模演示^[17]; (g) 面向专用型光子量子计算的小规模演示^[22]. (a)和(e)经AAAS许可转载; (b), (d), (f), (g)经Springer Nature Ltd.许可转载; (c)经OSA许可转载

Figure 2 (Color online) Quantum information applications with integrated silicon photonics. (a) High-dimensional entanglement generation, manipulation and measurement [13]; (b) multiphoton entanglement generation, manipulation and measurement [16]; (c) chip-to-chip entanglement distribution [18] and quantum teleportation [16]; (d) chip-to-chip high-dimensional quantum key distribution in a multicore fiber [21]; (e) an on-chip programmable quantum simulator enable to simulate chemical [23] and physical dynamics [24]; (f) a two-qubit universal photonic quantum computing by linear-combination [17]; (g) a quantum Boson sampler implementing scattershot and Gaussian Boson sampling [22]. (a) and (e) reprinted with permissions from AAAS; (b), (d), (f) and (g) reprinted with permissions from Springer Nature Ltd.; (c) reprinted with permission from OSA.

用, 提供了有力的技术和硬件支撑.

在量子通信应用方面, 通过相干操控芯片上路径和芯片间偏振量子态, 实现了硅芯片间的量子隐形传态功能^[16]和量子纠缠分布^[18](图2(c)), 以及BB84等量子密钥分发协议^[19,20], 同时利用多芯光纤实现了硅芯片间的高维量子密钥分发功能^[21](图2(d)). 在量子计算应用方面, 利用硅基光芯片集成技术, 开发出了一款面向通用量子计算的光量子芯片^[17](图2(f)), 可实现小规模量子检索和优化; 研究了一款专用型光量子计算芯片^[22](图2(g)), 芯片上制备了8光子量子态, 验证了触发型和高斯型两类重要的玻色采样算法. 量子模拟是量子计算机的重要应用领域. 图2(e)所示为一款可编程重构的硅基光量子模拟芯片, 提出并验证了一种新

型量子模拟算法^[23], 成功模拟了金刚石色心氮缺陷单电子自旋体系的演化过程^[24]、化学分子的电子能级结构^[23]和振动能级结构等^[22].

近些年, 硅基光电子集成技术的高速发展^[25]对芯片上光量子信息技术的发展起到了巨大的推动作用. 目前发展的大规模集成硅基光量子芯片, 已达到了670多个光学元件、近100个可重构相位器的单片集成^[13], 芯片上量子信息处理能力得到了显著增强. 通过发展晶圆级硅光子芯片加工技术, 有望在未来实现数百万个量子光学元件的大规模集成, 从而实现功能更加强大的光量子信息处理芯片. 芯片上光量子调控将为大规模光量子计算和量子模拟、高性能低成本量子密钥分发等应用的研究, 提供重要的硬件和技术支撑.

参考文献

- Shor P W. Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring. In: Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. Santa Fe, 1994. 124
- Grover L K. Quantum mechanics helps in searching for a needle in a haystack. *Phys Rev Lett*, 1997, 79: 325–328, arXiv: [quant-ph/9706033](#)
- Feynman R P. Simulating physics with computers. *Int J Theor Phys*, 1982, 21: 467–488
- Bennett C H, Brassard G. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing. In: Proceedings of the International Conference on Computers, Systems and Signal Processing. Bangalore, 1984. 175
- Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Advances in quantum metrology. *Nat Photon*, 2011, 5: 222–229, arXiv: [1102.2318](#)
- Wang J, Sciarrino F, Laing A, et al. Integrated photonic quantum technologies. *Nat Photon*, 2020, 14: 273–284
- Matsuda N, Le Jeannic H, Fukuda H, et al. A monolithically integrated polarization entangled photon pair source on a silicon chip. *Sci Rep*, 2012, 2: 817, arXiv: [1211.2885](#)
- Feng L T, Zhang M, Zhou Z Y, et al. On-chip coherent conversion of photonic quantum entanglement between different degrees of freedom. *Nat Commun*, 2016, 7: 11985, arXiv: [1601.06250](#)
- Mohanty A, Zhang M, Dutt A, et al. Quantum interference between transverse spatial waveguide modes. *Nat Commun*, 2017, 8: 14010, arXiv: [1601.00121](#)
- Zhang X, Bell B A, Mahendra A, et al. Integrated silicon nitride time-bin entanglement circuits. *Opt Lett*, 2018, 43: 3469–3472
- Kues M, Reimer C, Roztocki P, et al. On-chip generation of high-dimensional entangled quantum states and their coherent control. *Nature*, 2017, 546: 622–626
- Silverstone J W, Bonneau D, Ohira K, et al. On-chip quantum interference between silicon photon-pair sources. *Nat Photon*, 2013, 8: 104–108, arXiv: [1304.1490](#)
- Wang J W, Paesani S, Ding Y H, et al. Multidimensional quantum entanglement with large-scale integrated optics. *Science*, 2018, 360: 285–291
- Lu L, Xia L, Chen Z, et al. Three-dimensional entanglement on a silicon chip. *npj Quantum Inf*, 2020, 6: 30
- Wu C, Liu Y W, Gu X W, et al. Bright photon-pair source based on a silicon dual-Mach-Zehnder microring. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 220362
- Llewellyn D, Ding Y, Faruque I I, et al. Chip-to-chip quantum teleportation and multi-photon entanglement in silicon. *Nat Phys*, 2020, 16: 148–153, arXiv: [1911.07839](#)
- Qiang X Q, Zhou X Q, Wang J W, et al. Large-scale silicon quantum photonics implementing arbitrary two-qubit processing. *Nat Photon*, 2018, 12: 534–539, arXiv: [1809.09791](#)
- Wang J W, Bonneau D, Villa M, et al. Chip-to-chip quantum photonic interconnect by path-polarization interconversion. *Optica*, 2016, 3: 407–

413

- 19 Ma C X, Sacher W D, Tang Z Y, et al. Silicon photonic transmitter for polarization-encoded quantum key distribution. *Optica*, 2016, 3: 1274, arXiv: [1606.04407](#)
- 20 Sibson P, Kennard J E, Stanisic S, et al. Integrated silicon photonics for high-speed quantum key distribution. *Optica*, 2017, 4: 172–177, arXiv: [1612.07236](#)
- 21 Ding Y H, Bacco D, Dalgaard K, et al. High-dimensional quantum key distribution based on multicore fiber using silicon photonic integrated circuits. *npj Quantum Inf*, 2017, 3: 25, arXiv: [1610.01812](#)
- 22 Paesani S, Ding Y H, Santagati R, et al. Generation and sampling of quantum states of light in a silicon chip. *Nat Phys*, 2019, 15: 925–929, arXiv: [1812.03158](#)
- 23 Santagati R, Wang J, Gentile A A, et al. Witnessing eigenstates for quantum simulation of Hamiltonian spectra. *Sci Adv*, 2018, 4: eaap9646
- 24 Wang J W, Paesani S, Santagati R, et al. Experimental quantum Hamiltonian learning. *Nat Phys*, 2017, 13: 551–555, arXiv: [1703.05402](#)
- 25 Dai D X, Bauters J, Bowers J E. Passive technologies for future large-scale photonic integrated circuits on silicon: Polarization handling, light non-reciprocity and loss reduction. *Light Sci Appl*, 2012, 1: e1

Silicon-based photonic quantum information technologies

BAO JueMing¹, CHEN XiaoJiong¹, DING YunHong^{2,3*},
GONG QiHuang^{1,4,5,6} & WANG JianWei^{1,4,5,6*}

¹ State Key Laboratory for Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

² Department of Photonics Engineering, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby 2800, Denmark;

³ Center for Silicon Photonics for Optical Communication (SPOC), Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby 2800, Denmark;

⁴ Frontiers Science Center for Nano-optoelectronics & Collaborative Innovation Center of Quantum Matter, Peking University, Beijing 100871, China;

⁵ Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100193, China;

⁶ Peking University Yangtze Delta Institute of Optoelectronics, Nantong 226010, China

Silicon quantum photonics is a promising platform for the development of advanced quantum information technologies, offering a high level of stability, controllability, scalability and integration density. Silicon quantum photonics has enabled a range of key demonstrations including the development of a versatile toolbox for controlling single-photon's different degrees of freedom, the generation of multipartite entanglement and high-dimensional entanglement, and realization of large-scale programmable quantum devices. The progress has unlocked the unprecedented power of chip-scale quantum photonic technologies for advanced applications in quantum communication, computing and simulation.

quantum information processing, quantum information, integrated quantum photonics

PACS: 03.67.Hk, 03.67.Lx, 03.67.Mn, 42.50.Dv, 42.82.Gw

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0043](#)