

大规模集成光量子芯片实现高维度量子纠缠

王剑威^{1,2} 丁运鸿³ 龚旗煌^{2,*}

(1 英国布里斯托尔大学 量子光学中心量子工程技术实验室 布里斯托尔 BS8 1TL)

(2 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 量子物质科学协同创新中心 北京 100871)

(3 丹麦技术大学光学工程系 硅基集成光通信中心 丹麦 2800)

2018-04-03 收到

* email: qhgong@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20180503

集成光学量子芯片技术,使用半导体微纳加工工艺实现各种核心光量子器件的片上集成,包括单光子源、量子态操控光路与量子态测量光路、以及单光子探测器等,从而可实现对量子信息的载体(单光子)进行处理、计算、传输和存储等功能^[1]。集成光学量子芯片技术具有稳定性高、性能好、体积小、制造成本低等优点,被认为是一种实现量子通信、量子计算和量子模拟等量子信息应用的重要手段^[2]。

利用硅基纳米光波导技术实现的光量子芯片具有诸多独特优点,如与传统微电子加工工艺兼容、可集成度高、非线性效用强、以及工作波长与光纤量子通信兼容等^[3, 4]。然而,迄今为止光量子芯片的复杂度仅限于小规模演示,如集成少数光量子器件对光子态进行简单操控。因此,我们迫切需要扩大集成量子光路的复杂性和功能性,增强其量子信息处理技术的能力,从而推进量子信息技术的应用。

量子纠缠于1935年由爱因斯坦、波多尔斯基、罗森在他们著名的 Einstein—Podolsky—Rosen (EPR)佯谬中被引入^[5],并同年被薛定谔定义了量子纠缠的概念^[6]。量子纠缠不仅是研究“幽灵般的超距作用”和量子非局域等基础

问题的重要手段,也是实现量子通信和量子计算的重要物理资源。其中多体量子纠缠和多维度量子纠缠是两类主要的纠缠类型。近几年,国内外多个实验室在该领域均取得了重要科研进展,例如在光子^[7-10]、超导^[11-13]、离子^[14-16]和量子点及缺陷^[17-19]等物理体系。

相对于普遍采用的二维体系量子技术,高维体系量子技术具有信息容量大、计算效率高、以

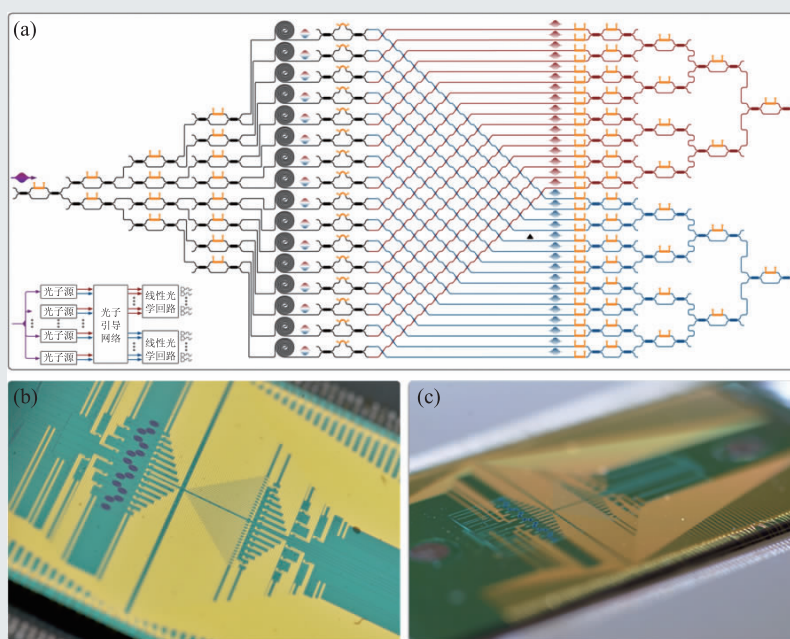


图1 基于硅纳米光波导的大规模集成高维光量子芯片(改编自文献[21]) (a)线路图; (b, c)实物图。黑色圆盘状器件为16个单光子源阵列,橙黄色器件为93个热光调制移相器及其金属电极导线,(a)中实线和(b, c)中黑(蓝)色线为450 nm×260 nm 硅纳米光波导。线路图中所示长方形器件为122个多模干涉型分束器,红蓝交叉为256个低损耗波导交叉结构网络,臂长非一致的马赫—曾德尔干涉仪为16个片上单光子波分复用器。红色和蓝色马赫—曾德尔干涉仪可对两体高维量子纠缠态进行任意基矢的投影测量。(a)中插图 of 普适化的任意两体高维量子态制备、调控以及测量示意图

及抗噪声性强等诸多优点^[20]。光子体系在实现高维纠缠上具有很多天然的优势,例如利用光子的不同自由度(如轨道角动量模式、时域和频域模式等),可以有效编码和处理多维光量子态等。然而,相干且精确地控制复杂量子器件和多维纠缠系统是量子信息科学与技术领域的一项难点,在实现高保真度、可编程、及任意通用的高维量子态操控和量子测量等方面,依然面临很多困难和挑战^[20]。

针对上述问题,我们与德国马普研究所、西班牙光学研究所、波兰科学院和哥本哈根大学的合作者们,提出并实现了一种新型的片上高维量子态制备与调控方法^[21]。该方法利用多路径信息加载的方式,即每个光子以量子叠加态的形式同时存在于多条光波导路径,且两两强关联并纠缠,从而实现了一个高达 15×15 的高维量子纠缠态 $|\Psi\rangle = \sum_{k=0}^{d-1} c_k |k\rangle_s |k\rangle_i$,其中 $|k\rangle_s$ 和 $|k\rangle_i$ ($k=0, \dots, d-1$)表示参量四波混频产生的信号光子(signal)和idler杂散光子在第 k 个光学模式或路径。

通过硅基纳米光子集成技术,我们实现了目前集成度最复杂的光量子芯片(图1),单片集成550多个光量子元器件,包括16个全同的四波混频单光子源阵列、93个光学移相器、122个光束分束器、256个波导交叉结构以及64个光栅耦合

器,从而达到对高维量子纠缠体系的高精度、可编程、且任意通用量子操控和量子测量^[21]。通过可控地激发16个参量四波混频单光子源阵列,可以制备具有任意复系数的高维量子纠缠态。通过单片集成通用型线性光路,可对高维量子纠缠态进行任意操控和任意测量。因此,该多路径高维量子方案具有任意通用性。

我们通过充分利用集成光路的高稳定性和高可控性,实现了高保真度的高维量子纠缠态,如4、8和12维度纠缠态的量子态层析结果分别为96%、87%和81%保真度,远超其他方式制备的高维量子纠缠态性能。图2所示为通过压缩传感式量子态层析技术重构的12维度纠缠态的密度矩阵表示。研究进一步利用对高维纠缠态的高可控性和高保真度,验证了其强量子纠缠关联特性,包括普适化贝尔(Bell)不等式和EPR导引(steering)不等式等,证明量子物理和经典物理定律的重要区别。例如,对4维度量子纠缠态,实验观察得到了 2.867 ± 0.014 的贝尔参数,不仅成功违背经典物理定律61.9个标准差,而且超过普通2维纠缠体系的最大可达值的2.8个标准差。

研究还首次实现高维量子系统的Bell自检测和量子随机放大等新功能。量子系统的自检测功能

可以使经典用户仅使用Bell不等式关联实验数据,对量子系统进行器件非关联型表征和验证^[22]。该功能不需要对被测系统进行任何假设,可在实用化量子信息应用中起重要作用。我们实验上分别对3维(qutrit)最大化纠缠态和部分化纠缠态进行Bell自检测,并得到自检测保真度约为76%。值得一提的是,只有在非常接近理想的Bell不等式关联条件下,才能达到高维量子态自检测的高保真性。此外,通过成功违背高维纠缠体系的Bell和EPR导引不等式,我们进一步验证了量子真

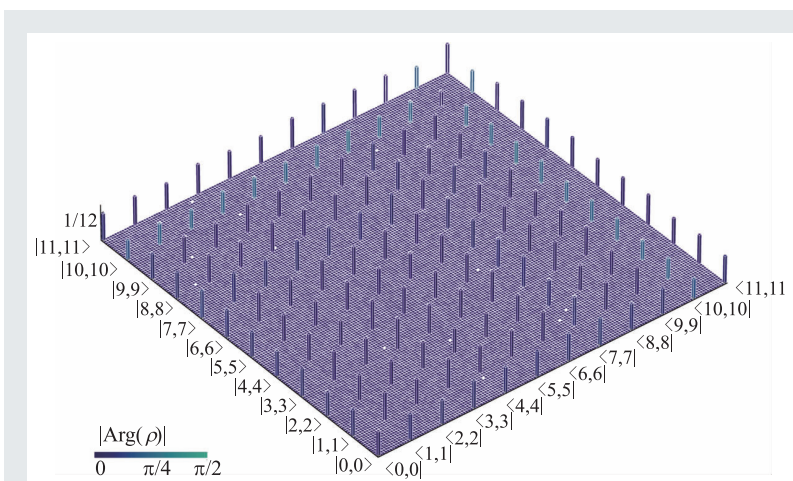


图2 利用量子态层析技术重构的12维度纠缠态密度矩阵 ρ ,其实验保真度为81%。矩阵中元素的高度表示 ρ 的幅度绝对值,元素的颜色表示 ρ 的相位值(改编自文献[21])

随机数产生和量子随机放大。实验验证了 1.82 ± 0.35 的完全器件不相关型随机数,并对14维以下纠缠态均实现了半器件不相关型量子随机放大功能。

这项研究成果最近在 *Science* 上发表^[21]。实现了基于大规模硅基纳米光量子芯片的高维量子纠缠体系,并可以对其进行可控、精确和通用化地制备、调控以及测量高维量子态,实验还展示了高达 15×15 维度的精确可控纠缠体系。研究展示出高维量子体系在量子通信和量子计算方面的独特优势,并有望扩展于更复杂更高维度的量子纠缠体系。

参考文献

- [1] Politi A *et al.* *Science*, 2008, 320:646
- [2] O'Brien J L *et al.* *Nat. Photon.*, 2009, 3:687
- [3] Bonneau D *et al.* *Silicon Photonics III: Systems and Applications.* Springer, 2016. 41-82
- [4] Wang J *et al.* *Nat. Phys.*, 2017, 13:551
- [5] Einstein A, Podolsky B, Rosen N. *Phys. Rev.*, 1935, 47:777
- [6] Schrödinger E. *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 1935, 31:555
- [7] Huang Y *et al.* *Nat. Commun.*, 2011, 2:546
- [8] Wang X L *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 117:210502
- [9] Armstrong S *et al.* *Nat. Phys.*, 2015, 11:167
- [10] Mair A *et al.* *Nature*, 2001, 412:313
- [11] Barends R *et al.* *Nature*, 2014, 508:500
- [12] Song C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2017, 119:180511
- [13] Neeley M *et al.* *Science*, 2009, 325:722
- [14] Monz T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106:130506
- [15] Debnath S *et al.* *Nature*, 2016, 536:63
- [16] Senko C *et al.* *Phys. Rev. X*, 2015, 5:021026
- [17] Veldhorst M *et al.* *Nature*, 2015, 526:410
- [18] Schwartz I *et al.* *Science*, 2016, 354:434
- [19] Zu C *et al.* *Nature*, 2014, 514:72
- [20] Erhard M *et al.* *Light Sci. Appl.*, 2018, 7:17146
- [21] Wang J *et al.* *Science*, 2018, 360:285
- [22] Salavrakos A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2017, 119:040402



The poster features a colorful, multi-layered circular graphic in the background, transitioning from green and yellow at the top to blue and purple at the bottom. In the upper left, there is a circular logo with a colorful flower-like pattern and the text 'ILOPE' and 'www.ilope-expo.com'. The main title 'ILOPE - 2018 北京光电周' is prominently displayed in the center, followed by the subtitle '中国国际激光、光电子及光电显示产品展览会' and its English translation 'China International Lasers, Optoelectronics and Photonics Exhibition'. The dates '2018.10.10-12' and the location '北京·中国国际展览中心(静安庄馆)' are clearly visible. At the bottom, contact information for CIEC and COEMA is provided, along with their respective logos and a QR code.

ILOPE
www.ilope-expo.com

ILOPE - 2018 北京光电周
中国国际激光、光电子及光电显示产品展览会
China International Lasers, Optoelectronics and Photonics Exhibition

2018.10.10-12
北京·中国国际展览中心(静安庄馆)

CIEC
中展集团北京华港展览有限公司
Tel: +86-10-84600314, 84600384
Email: ilope-expo@ciec.com.cn

COEMA
中国光学光电子行业协会
Tel: +86-10-84321499
Email: coema@coema.org.cn

