

可扩展的量子加速算法演示

——基于三维集成芯片的专用光子量子计算原型机首次实现

唐豪 金贤敏[†]

(上海交通大学物理与天文学院 上海 200240)

2019-01-10收到

[†] email: xianmin.jin@sju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20190307

专用量子计算，由于可以直接构建量子系统，不需要依赖复杂的量子纠错，因而相对于通用量子计算具有更灵活的实现方式和更高的可行性。一旦能够制备和控制的量子系统达到全新尺度，将可以直接用于探索新物理和在特定问题上推进远超经典计算机的计算能力。量子行走是专用量子计算的一个强有力的工具，它是经典随机行走在量子物理中的一个对应，具有相干性和叠加态的量子特征。量子行走能够将许多特定计算任务对应到量子演化空间的耦合系数矩阵中，展现出加速计算的特征。

想要将量子行走真正运用于专用量子计算实现量子优越性，务必满足两点：足够多的行走路径，及可根据算法需求自由设计的演化空间。近十年来，科学界对量子行走的实验探索从未停歇，成功地在核磁共振^[1]、离子阱^[2]、中性原子阱^[3]及光学体系^[4]等不同物理体系中实现了一维量子行走。不过只在小型一维阵列中的原理性演示还不足以推进量子行走的实用化，因此陆续有了二维量子行走的实验尝试^[5-7]，或是通过时间代表其中一个维度^[5]，或是用两个粒子在一维结构的演化来模拟二维结构^[6]，或是构建“十”字形的准二维结构^[7]，都没有实现真实意义的自由二维演化空间。我们通过飞秒激光直写技术制备超大规模光子量子计算集成芯片，使得首个真正空间二维量子行走的实验演示得以实现^[8]。这项工作通过增加量子演化维度和系统尺度的方式来提升量子态空间的尺度，提供了一种可行的量子计算处理资源。

量子行走作为专用量子计算的重要内核，已经在许多优化算法中被理论预测具有明显量子加速效果，如空间搜索问题^[9]、元素甄别问题(ele-

ment distinctness)^[10]、判定图形同构(graph isomorphism)问题^[11]、分析布尔公式(boolean formulas)问题^[12]等等，都可能在实际应用中带来可观效益。其中，对于粘合树结构上的“快速到达”(fast hitting)问题^[13]，量子行走的优势尤为突出。“快速到达”问题由 Childs 等人在2002年提出^[13]，将两

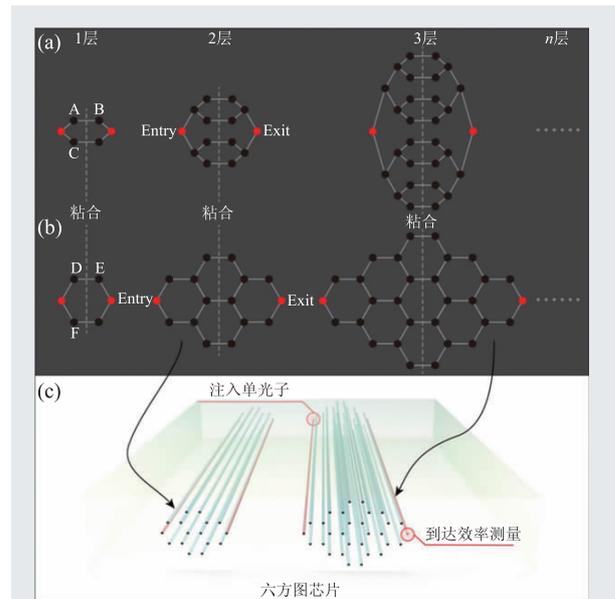


图1 粘合树结构示意图 (a)常规二叉粘合树结构；(b)我们提出的可扩展的六方粘合树结构。它和常规二叉粘合树类似，是将两个树状结构末端相连，要求粒子从一个顶点(Entry)到达另一个顶点(Exit)；(c)六方粘合树结构在三维光子量子芯片中的对应。每根波导对应粘合树的一个节点，端面显示出六方粘合树结构，纵向对应了演化时间。光子沿着波导传输并通过倏逝波耦合到四周的波导，由于耦合强度随波导间距增大而指数衰减，只有近邻波导之间才考虑光的耦合，对应着粘合树中两个节点之间的连线(例如，节点AB之间、节点DE之间的连接)，而相距更远的波导两两之间则被看作相互断开(例如，节点AC之间，节点DF之间无连接)。对于常规二叉粘合树，想要在光子芯片中密集安排指数增长的波导数，又要通过波导间距精确控制哪些相互连接或断开，几乎是不可行的；而六方粘合二叉树结构，即使层数很大，都可以在芯片中很好地安排

个树状结构^[14]的末端相连，要求粒子从一个树的顶点到达另一个树的顶点。量子行走具有天然的叠加态特性，在面对分叉选择的时候，不是选择左或者右，而是可以选择左和右的叠加态，使得量子行走在粘合树结构上可以轻松“快速到达”，对优化、搜索等实际问题都有潜在的广泛应用前景。

不过，想要在实验中演示量子“快速到达”算法，还充满了挑战。如图1所示，常规二叉粘合树的节点数目随着层数增加呈指数级增加，这会迅速耗尽几何上的制备空间，因此是不可扩展的。对此，我们提出了一种六方粘合树结构，并通过飞秒激光直写技术成功映射到三维光量子集成芯片中。这种六方粘合二叉树结构，即使层数很大，都可以在芯片中用三维波导来对应，因而具有很好的可扩展性。

我们首先根据理论分析获得量子动态演化过程中最大到达概率以及对应演化长度，通过飞秒激光直写技术制备波导演化长度在该最优演化长度值附近的若干组芯片样品。然后通过激光注入、CCD成像观测芯片输出的光强概率分布，确定实验中不同层数结构中实现最优到达概率的样品。再向所选样品注入单光子量子光源^[15]，用高

精度单光子成像观测在最优“快速到达”情形下的演化图形。理论分析方面，量子行走演化分布可以通过矩阵指数方法求解；经典随机行走采用一个灵活的量子随机行走模形^[16]，它是一个量子行走和经典随机行走的混合行走，把其中量子行走的权重设为0，经典随机行走的权重设为1，就可以计算时间连续型纯经典随机行走的演化情况。

图2展示了对于2层六方粘合树的“快速到达”实验和理论结果。量子算法可实现约90%的最优到达效率，最优演化长度约为25 mm；而经典算法只能缓慢地达到最优演化情形，而且最优到达效率只有6.25%，比量子行走小了10倍。这是经典随机行走的扩散传输本质导致的，出口节点达到的最优到达效率相当于1除以所有节点的数目。量子行走在复杂分叉结构时可以选择左和右的叠加态，从而在最优到达效率和最优演化长度都具备明显的优势。

将六方粘合树的层数逐步增大到8层，结构复杂度不断提升。如图3所示，在几种不同层数结构中的最优到达情形中，出口波导都会聚了比大部分其他波导更高的光强，而经典情形是当出口节点达到最优时，光强平均分布在所有节点

中，因而最优到达效率非常低。我们进一步分析了量子行走和经典随机行走在六方粘合树结构上的“快速到达”表现随着结构层数的量化关系。量子最优到达效率始终比经典最优到达效率高10倍以上。而且量子算法和经典算法达到最优到达效率时，分别需要与六方粘合树层数呈线性及平方关系的演化长度，而演化长度与演化时间成正比。也就是说，我们演示的量子快速到达，相比经典算法具有平方级加速，而且最优效率提高一个数量级。该项研究提供了利用量子系统的维度和尺度作为全新资源研发专用光量子计算的路线图。该研究于近期在《自然》杂志子刊《自然—光子

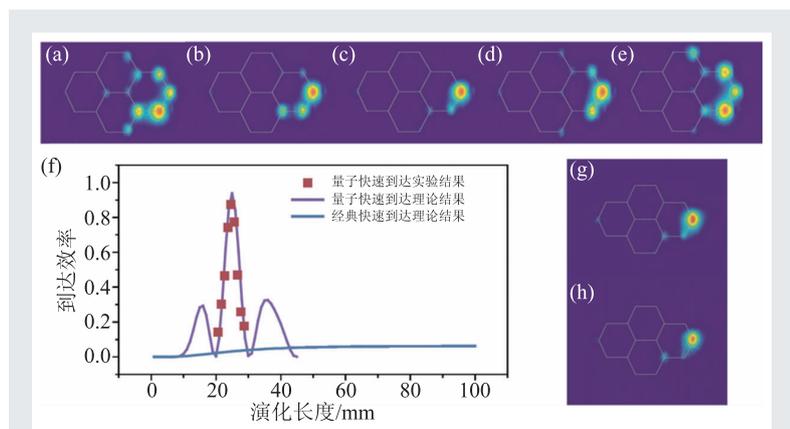


图2 2层六方粘合树“快速到达”的量子算法和经典算法结果对比(a—e)不同演化长度样品的激光源入射演化图像；(f)“到达”效率随演化长度变化的结果分析，量子“快速到达”的实验和理论结果非常吻合；(g)进一步微调确认最优演化长度样品，用激光源入射获得演化图像及(h)用高精度单光子源获得同样品的演化图像。可以看出(g)激光源和(f)单光子源获得图像非常一致，用激光光源是利用激光的相干性模拟量子演化结果，可以用来预选合适的样品，而单光子源是观测真正的量子行走，可以实现真实的量子“快速到达”实验演示

学》(Nature Photonics)上发表^[17]。

总结地说，我们在飞秒激光直写制备的三维光量子集成芯片中成功构建了大规模六方粘合树并演示了量子快速到达算法内核，相比经典情形展示了平方级加速，而且最优效率提高十倍。通过这项研究，首个基于三维集成芯片的专用光量子计算原型机首次得以实现，也使得研发更多物理系统可扩展的专用光量子计算方案成为可能，提供了利用量子系统的维度和尺度作为全新资源研发专用光量子计算的路线图。由于粘合树结构很容易让人联想到计算机科学中的二元树或决策树，如果能将量子算法运用到计算机科学中的优化、管理、及信息搜寻等各种实际问题中去，有望推动量子计算的实际应用，并促进许多跨学科交叉问题及新兴研究领域综合性研究。

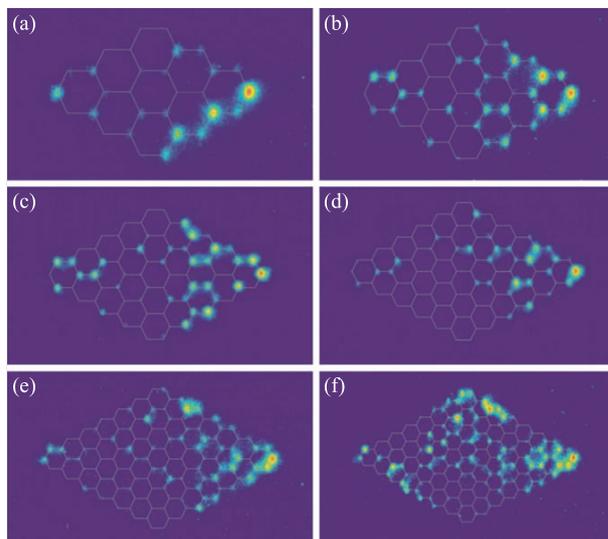


图3 结构复杂度不断增大的量子“快速到达”实验结果。将层数为3—8层的这6组的最优演化长度样品选出来，注入单光子源，用高精度单光子成像观测在最优“快速到达”情形下的演化图像，分别如图(a—f)所示

参考文献

- [1] Du J *et al.* Phys. Rev. A, 2003, 67:042316
- [2] Schmitz H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2009, 103:090504
- [3] Karski M *et al.* Science, 2009, 325:174
- [4] Peruzzo A *et al.* Science, 2010, 329:1500
- [5] Schreiber A *et al.* Science, 2012, 336:55
- [6] Xue P *et al.* Phys. Rev. A, 2015, 92:042316
- [7] Poullos K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 112:143604
- [8] Tang H *et al.* Sci. Adv., 2018, 4:eaat3174

- [9] Childs A M *et al.* Phys. Rev. A, 2004, 70:022314
- [10] Aaronson S *et al.* J. ACM, 2004, 51:595
- [11] Douglas B L *et al.* J. Phys. A: Math. Theor., 2008, 41:075303
- [12] Farhi E *et al.* Theory Comput., 2008, 4:169
- [13] Childs A M *et al.* Quantum Inf. Process., 2002, 1:35
- [14] Farhi E *et al.* Phys. Rev. A, 1998, 58:915
- [15] Kim Y H *et al.* Phys. Rev. A, 2003, 68:013804
- [16] Whitfield J D *et al.* Phys. Rev. A, 2010, 81:022323
- [17] Tang H *et al.* Nat. Photon., 2018, 12:754

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寄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：010-82649470；82649029

《物理》编辑部