

俘获离子量子 CCD 计算机体系结构演示

梅尔·海耶斯, 菲加特·摩西

(所属单位: 美国计算机工程学院)

摘要: 俘获离子量子电荷耦合器件 (QCCD) 提案为使用移动离子作为量子位的通用量子计算机制定了蓝图。类似于电荷耦合器件 (CCD) 相机, 它将成像信息存储和处理为耦合像素中的可移动电荷, QCCD 计算机将量子信息存储在带电离子的内部状态中, 这些离子使动态电在不同处理区域之间传输。QCCD 架构的承诺是通过将量子相互作用限制在多个小离子晶体上, 然后将这些晶体的组成离子物理分裂并重新排列成新的晶体, 在新晶体中发生进一步的相互作用, 从而保持在小离子捕获实验中证明的低错误率。这种方法利用了相对于量子位的相干时间快的传输时间尺度、离子的量子位状态对用于传输的电场的不敏感性, 以及空间分离的晶体提供的低串扰。然而, 设计一台能够跨多个交互区域以低误差执行这些操作的机器会带来许多困难, 这减缓了将这种架构扩展到更大量子比特数的进展。在这里, 我们使用低温表面阱将 QCCD 架构的所有必要元素 (可扩展的阱设计、平行相互作用区和快速离子传输) 集成到可编程离子阱量子计算机中, 该计算机具有与实现的低错误率一致的系统性能。在单个离子晶体中, 我们应用这种方法, 使用中路测量和可忽略的串扰误差来实现传送的 CNOT 门。这些结果表明 QCCD 架构为高性能量子计算机提供了一条可行的途径。

关键词: 俘获离子量子, 计算机体系结构

Demonstration of the Trapped-ion Quantum CCD Computer Architecture

Mayer Hayes, Figgatt Moses

(Affiliation: Institute of Computer Engineering, USA)

Abstract: The trapped-ion quantum charge-coupled device (QCCD) proposal lays out a blueprint for a universal quantum computer that uses mobile ions as qubits. Analogous to a charge-coupled device (CCD) camera, which stores and processes imaging information as movable electrical charges in coupled pixels, a QCCD computer stores quantum information in the internal state of electrically charged ions that are transported between different processing zones using dynamic electric fields. The promise of the QCCD architecture is to maintain the low error rates demonstrated in small trapped-ion experiments by limiting the quantum interactions to multiple small ion crystals, then physically splitting and rearranging the constituent ions of these crystals into new crystals, where further interactions occur. This approach leverages transport timescales that are fast relative to the coherence times of the qubits, the insensitivity of the qubit states of the ion to the electric fields used for transport, and the low crosstalk afforded by spatially separated crystals. However, engineering a machine capable of executing these operations across multiple interaction zones with low error introduces many difficulties, which have slowed progress in scaling this architecture to larger qubit numbers. Here we use a cryogenic surface trap to integrate all necessary elements of the QCCD architecture—a scalable trap design, parallel interaction zones and fast ion transport—into a programmable trapped-ion quantum computer that has a system performance consistent with the low error rates achieved in the individual ion crystals. We apply this approach to realize a teleported CNOT gate using mid-circuit measurement, negligible crosstalk error and a quantum volume 7 of $26 = 64$. These results demonstrate that the QCCD architecture provides a viable path towards high-performance quantum computers.

Keywords: Trapped ion quantum, computer architecture

引言

最近的一些理论和实验论文研究了相干控制或“设计”原子、分子和光量子态的能力。这一主题体现在原子干涉仪、原子光学、原子激光器、玻色-爱因斯坦凝聚、腔 QED、电磁感应透明、无反转激光、量子计算、量子密码学、量子态工程、压缩态和波包等主题中的动

力学。第一个量子逻辑门是用捕获的离子执行的; 从那时起, 研究人员展示了相干时间以及门、状态准备和测量保真度, 这些都是任何可行的量子计算平台中最好的。由于它们的净电荷, 原子离子可以被电磁场的特定排列所限制。对于低能量离子的研究, 通常使用两种类型的陷阱——Penning 陷阱, 它使用静电场和磁场的组

合, 以及 Paul 或 rf 陷阱, 它主要通过不均匀振荡场产生的有质动力来限制离子。这些陷阱的操作在各种评论和 Ghosh 最近的一本书中都有讨论。

最近, 研究人员将注意力集中在扩展到复杂量子算法所需的更大量子比特数上。尽管小型离子俘获量子计算机只需要单个俘获区中的单个离子晶体, 但这种方法不太可能扩展到超过 100 个量子位。因此, 努力集中在使用通过光子链路连接的离子晶体网络或在不同晶体之间物理传输离子甚至最终跨陷阱模块的架构。在这里, 我们报告了后一种方法的进展。QCCD 架构旨在创建一个高保真、可扩展的量子计算机, 但代价是一些具有挑战性的要求: (1) 该设备必须能够捕获多个能够进行高保真操作的小离子晶体; (2) 晶体间离子移动的快速传输操作; (3) 跨多个区域的量子比特相位跟踪和控制信号同步; (4) 可能需要捕获两种不同的离子种类: 一种作为量子位, 另一种在传输后将晶体冷却回接近运动基态; (5) 跨设备的传输和量子操作的并行化。其中许多困难已被单独解决, 但将这些功能组合到一台机器中会产生难以调和的性能要求: 例如, 高保真量子比特操作需要最小的运动激励, 因此需要低电极电压噪声, 而快速传输需要高 - 这些相同电极的带宽电压控制。先前的努力表明, 在可扩展的基于 QCCD 的量子计算机方面取得了令人瞩目的进展, 但缺乏多个并行操作区或共感冷却, 或者仅限于单个量子位对。在这里, 我们报告了包含上述所有功能的基于 QCCD 的量子计算机的高级实现。该系统使用多达六个量子位, 即使对于包含许多传输和门控操作的深层电路也能以低错误率运行, 从而实现六个量子位可能实现的最大量子体积 (QV), 而不受错误限制。此外, 我们展示了小的串扰误差, 并表明该系统能够在进行电路测量和条件反馈。通过对光学传输和离子传输序列进行相对简单的升级, 我们的架构将能够容纳更多的量子比特。

方法

霍尼韦尔表面陷阱

我们在位于美国明尼苏达州普利茅斯的霍尼韦尔微加工工厂设计并制造了一个二维表面陷阱。198 直流金电极是用底切蚀刻制造的, 通过消除电介质和离子之间的视线来减轻杂散场。通过连接到稳定性优于 2 mK 的液氮流动低温恒温器的冷指将陷阱冷却至 12.6 K。陷阱频率为 0.97 MHz 的单个 $^{171}\text{Yb}^+$ 轴向加热速率从每秒 100 到 500 量子不等, 典型的径向加热速率为每秒约 500 量子, 两者都受到电极控制技术噪声的限制。

电脑控制

处理器使用量子电路模型进行编程, 将门序列编译为机器控制系统的硬件命令, 该系统还负责电路排队和校准例程。自动校准约占系统工作周期的 25%, 并按计划执行或在测量参数超过指定容差时触发。量子位之间

的时钟同步是通过相位跟踪协议来维持的, 该协议在传输和门操作之后更新量子位相位以说明 a.c. SQ 阶段的明显变化和区间差异。通过在一系列电路运行结束时探测离子晶体模式结构, 可以减轻离子丢失或晶体重新排序事件 (由传输故障和背景碰撞引起) 造成的数据损坏。当检测到这些事件时, 将丢弃自上次检查以来获取的数据并重复电路。检测程序对交换量子位离子的事件以及在探针之前立即以正确顺序留下离子的多个重新排序事件视而不见。对于 $N = 6$ QV 测试, 在 5 小时内运行 400 个不同电路的 100 次重复 (约 107 次运输操作), 仅检测到三个此类事件。

量子位操作

在相对于 x 轴 45° 的 x-y 平面中施加 5-G 磁场, 区域之间的均匀度在 0.2 mG 以内, 匹配量子位频率在 1 Hz 以内。量子位相干时间的特征在于两个区域中的单脉冲自旋回波序列, 显示第一和第二门区域的 $1/e$ 高斯衰减时间分别为 2.0(2) s 和 2.0(3) s。激光以 $\sim 17 \mu\text{m}$ 的光束直径以与陷阱轴成 45° 或 90° 的方向进入栅极区域, 激光功率预算由 TQ 栅极光束控制, 每光束 8.5 mW。

讨论和结论

该架构的要求是同时捕获能够进行高保真量子操作的多个离子晶体。此处使用的离子阱具有由射频 (RF) 电极设置的线性几何形状, 射频 (RF) 电极沿表面上方 $70 \mu\text{m}$ 的一条线 (称为 RF-null) 在 y 和 z 方向上提供均匀的径向捕获力。198 个独立控制的 d.c. 提供额外的诱捕潜力和运输能力。电极几何形状足够灵活, 可以接受不同的操作模式, 但我们将描述限制在陷阱被理解为由 16 个不同区域组成的情况。只有尺寸相同但电极数量不同的门和扩展门区适用于复杂的传输操作, 使其最适合量子操作。此处, 为方便起见, 我们使用最靠近装载孔的延伸浇口和浇口区, 分别称为浇口区 1 和浇口区 2。

所有量子操作都在这些门区中使用平行于陷阱表面传播的激光执行。光束聚焦到足够小的光斑尺寸以寻址单个区域, 但又不足以小到单个离子晶体内的单独寻址。这意味着在任意对之间纠缠双量子位 (TQ) 门, 以及任何单量子位 (SQ) 门、测量或重置都需要离子重排。在这项工作中, 我们将操作模式限制为 $N = 4$ 或 $N = 6$ 量子位, 始终将 $^{171}\text{Yb}^+$ 量子位离子的数量与 $^{138}\text{Ba}^+$ 冷却剂离子的数量相匹配。该机器在 $N = 4$ 模式的两个门区中的每一个中使用一个 (Ba-Yb-Yb-Ba) 晶体进行初始化, 并且在 $N = 6$ 的负载和第一辅助区中使用额外的 (Yb-Ba) 对模式。量子计算始于用户以量子电路的形式提交程序。编译器将量子位分配给物理离子, 以最大限度地减少所需传输操作的数量, 并且电路作为一系列传输和门控操作进行, 为 SQ 和 TQ 门以及测量适当地配对和隔离量子位。完成所有操作后, 离子返回到初始配置, 以便

电路可以重复收集测量统计数据，然后再将结果发送回用户。

传输是通过施加到直流电的动态电压波形实现的。电极分为三类。(i) 线性传输。势阱沿着 RF-null 从一个位置移动到另一个位置。在量子计算期间，这些操作是并行执行的，不同位置的多个阱同时移动。线性传输总是移动 Yb-Ba 对，除了在陷阱加载过程中。(ii) 拆分/合并。分裂操作将单个势阱一分为二，将一个四离子晶体分裂成两个双离子晶体。合并操作是拆分操作的时间反转，两者都只发生在门区。(iii) 交换。通过围绕垂直于 RF-null 的轴旋转量子位来翻转四离子晶体的量子位顺序。这些操作仅发生在门区。单个传输操作的持续时间从 50 μ s 到 300 μ s 不等，并向离子晶体引入适量的运动激发，与多普勒温度相当，从而实现后续的边带冷却程序。使用这三个传输基元，量子位被适当地安排用于使用并行气泡（奇数 - 偶数）排序算法的门控，该算法在 (N) 步中对长度为 N 的数组进行排序。排序序列可能涉及每个量子操作的多个传输操作，但传输故障事件很少见并且会自动检测到，从而允许数据被擦除和未损坏。

跨空间分离的门区跟踪量子位的相位需要稳定的量子位和相位稳定的门操作。为此，我们使用 171Yb^+ 的 $2\text{S}_{1/2}$ 基态中的超精细“时钟”状态作为量子位，并定义 $|0\rangle = |F=0, mF=0\rangle$ 和 $|1\rangle = |F=1, mF=0\rangle$ ，其中 F 和 mF 分别是总角动量及其 z 投影的量子数。这些状态受益于相对较低的磁场灵敏度，我们在两个相互作用区测量了 2 秒的自旋回波相移时间 (T2)，受磁场波动的限制。

我们的本地门集由四种类型的相位稳定门组成。(I) SQZ 旋转。围绕 Z (X、Y、Z 表示布洛赫球轴) 的 SQ 旋转完全在软件中通过相位跟踪更新执行。我们为 Z 旋转设置了 $1/500$ 的分辨率限制。(II) SQ X/Y 旋转。在孤立的 Yb-Ba 晶体上使用共同传播的激光束进行受激拉曼跃迁，在布洛赫球体的 X-Y 平面中围绕任意轴应用 SQ 旋转。我们目前将我们的门设置限制为 $1/2$ 旋转。用户提交的任意 SQ 门被合成最多两个 X/Y 旋转，以及一个额外的 Z 旋转。由于拉曼光束是共同传播的，因此旋转轴的角度由激光束的微波拍音的相位设置，并且不受光程长度漂移的影响，从而允许跨区域直接同步。(III) TQ 门。我们在相敏配置中运行 Mølmer-Sørensen 相互作用并添加由相同激光器驱动的 SQ 包装脉冲以消除光学相位依赖性，从而生成相位不敏感的纠缠门 $U_Z = \exp(-iZ) Z^2$ 。将门映射到 Z 基础允许在多个区域并行执行操作，而无需额外的相位稳定或同步。(IV) 全局微波自转。真空室中的微波天线应用具有可变相位的全局量子比特旋转。微波场振幅在不同的门区有 3% 的不均匀性，因此不适合逻辑运算，也不适用于量子电路。然而，微波用于通过动态解耦来抑制记忆错误。由于振

幅不均匀，我们不能应用全局微波脉冲，这是典型的动态解耦。为了避免相干误差的累积，我们在基态冷却过程中成对地施加相反相位的脉冲，中间没有任何传输操作，从而消除了小幅度误差，同时保留了记忆误差抑制的大部分好处。量子位初始化和测量是通过在空间上隔离单个 Yb-Ba 晶体来执行的，这样共振光对其他量子位的影响最小，从而允许在电路中的任何点执行测量（以及随后的重新初始化，如有必要）。标准光泵和状态相关荧光程序用于初始化和测量。除了全局微波操作之外，还使用随机基准 (RB) 技术在两个门区中表征量子操作。两个区域的相似环境导致几乎相同的操作时间和保真度。给出了 TQ 门的估计误差预算。我们使用 138Ba^+ 作为冷却离子满足交感冷却要求，并在整个量子电路的不同时间采用多普勒和解析边带冷却。冷却激光调谐在 493.5 nm 的 138Ba^+ 跃迁附近，距离 171Yb^+ 中的任何共振足够远以防止诱发误差。这些冷却协议是我们设备中当前的运行时瓶颈，可能是 QCCD 架构所必需的，但可以大大改进。

并行量子操作和传输的最终要求通过整体基准在系统级别进行验证。我们进行了三项整体测量，旨在将系统性能表征为通用量子信息处理器：不同门区中的同步 RB、使用中电路测量的隐形传态 CNOT 门以及系统 QV 的测量。我们通过 RB 描述了 SQ 和 TQ 门（没有区间传输）的性能。我们还将 SQ 同步 RB 方法推广到 TQ 操作以检测串扰错误。我们发现串扰误差在测量不确定度范围内与零一致，突出了 QCCD 架构的核心设计特征之一的好处：使用由局部激光束处理的空间分离的栅极区域。在离子阱量子计算实验中，通过分裂和空间隔离离子晶体，以及使用辅助离子物种，已经实现了保留存储在量子位中的量子信息的中电路测量。我们的架构使用前一种方法，我们通过执行传送的 CNOT 门电路在系统级演示此功能。量子门隐形传态是一种用于在一对远程量子位之间应用门的协议，需要纠缠操作、中电路测量和经典条件量子门——所有这些都是量子纠错所必需的。该协议使用四个量子位，并通过三个纠缠操作、两个中间电路测量和两个测量条件 SQ 操作的组合，在两个从不直接相互作用的量子位之间执行量子 CNOT 门。通过在两个不同的基础上评估所有四个输入状态（总共八个输入状态），我们将操作的保真度限制为 $F_{\text{avg}} = 0.899$ ；所有不确定性表示一个标准偏差。QV 通过测量量子计算机产生难以经典模拟大量量子比特数的量子态的能力来量化量子计算机的有效功率。该测试并不意味着模仿任何特定的量子算法；相反，它旨在强调几个被认为对通用量子计算机很重要的指标（包括量子比特数、门保真度、串扰、本机门集的连通性和灵活性），并提供一个单一的数值来衡量量子计算机的一般潜力系统。

参考文献

[1] Cross, A. W., Bishop, L. S., Sheldon, S., Nation, P.

D. & Gambetta, J. M. Validating quantum computers using randomized model circuits. *Phys. Rev. A* 2019;100:032328.

[2] Cirac, J. I. & Zoller, P. Quantum computations with cold trapped ions. *Phys. Rev. Lett.* 1995;74:4091-4094.

[3] Monroe, C., Meekhof, D. M., King, B. E., Itano, W. M. & Wineland, D. J. Demonstration of a fundamental quantum logic gate. *Phys. Rev. Lett.* 1995;75:4714-4717.

[4] Wang, Y. et al. Single-qubit quantum memory exceeding ten-minute coherence time. *Nat. Photon.* 2017;11:646-650.

[5] Murali, P., Debroy, D. M., Brown, K. R. & Martonosi, M. Architecting noisy intermediate-scale trapped ion quantum computers. In 2020 ACM/IEEE 47th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA) 529-542 (IEEE,

2020).

[6] Monroe, C. et al. Large-scale modular quantum-computer architecture with atomic memory and photonic interconnects. *Phys. Rev. A* 2014;89:022317.

[7] Hucul, D. et al. Modular entanglement of atomic qubits using photons and phonons. *Nat. Phys.* 2015;11:37-42.

[8] Home, J. P. et al. Complete methods set for scalable ion trap quantum information processing. *Science* 2009;325:1227 - 1230.

[9] Kaufmann, H. et al. Scalable creation of long-lived multipartite entanglement. *Phys. Rev. Lett.* 2017;119:150503.

[10] Lekitsch, B. et al. Blueprint for a microwave trapped ion quantum computer. *Sci. Adv.* 2017;3:e1601540.