



量子计算机的扩展

文 | 埃里克·P·德贝内迪克特斯 (Erik P. DeBenedictis), 桑迪亚国家实验室 (Sandia National Laboratories)
特拉维斯·S·亨布尔 (Travis S. Humble), 橡树岭国家实验室 (Oak Ridge National Laboratory)
保罗·A·加尔吉尼 (Paolo A. Gargini), IEEE 国际设备和系统路线图 (IEEE International Roadmap for Devices and Systems)
译 | 刘建, 深圳大学

在晶体管出现几十年后, 工程界开发出集成电路, 从而利用大量晶体管制造出计算机。一个原初的发明开启了一个产业, 其再投资的利润使晶体管的数量增加了一百万倍 (这个增长原则现在被称为摩尔定律¹⁾), 这些晶体管构建的计算机则改变了世界。

几十年后, 物理学家和数学家提出了一种名为量子比特的新型计算设备, 似乎像当年的经典计算机一样, 量子计算机散发着改变世界的诱人潜力——虽然我们尚不能证实这种潜力真的存在。研究人员已经创造出小规模量子计算机原型, 现在正与IEEE合作, 制造标准尺寸的系统。

为了更好地理解当前量子计算机的扩展方向, 让我们首先来看看晶体管是如何变成集成电路, 而集成电路又如何演变成当今经典计算的庞然大物。在本专栏中, 我们将量子计算机基准与半导体当年的发展过程相结合, 展示了一种新的前进方向。

制造的扩展

在某些情况下, 可扩展性是很容易判断的。图1a是一个平面集成半导体电路, 图1b是一个集成量子比特电路。它们看起来几乎相同, 所以我们可以假设它们都会根据摩尔定律进行扩展。

我们的假设很可能是真的, 但事实远不止于此。图1c显示了一个早期的“飞线” (flying-wire) 集成半导体电路, 晶体管的集成方式和如今一样, 但表面上方连接有金线。制造一个由百万级的晶体管集成的飞线电路, 需要放置数百万根细小的金线。

图1d中的金枝形吊灯式构件, 是量子计算机研究原型的支撑性结构, 图中的量子比特芯片就安装在底部。枝形吊灯将低温冷却的量子计算机组件连接到各个不同层级的控制电子设备, 然后连接到顶部的室温电子设备。将量子计算机从7个量子比特扩展到100万比特, 需要按比例增加枝形吊灯的复杂性。想象一下, 如果将飞线芯片或枝形

吊灯 (的复杂度) 按比例增加100,000倍, 那将是多么巨大的机械结构, 不仅很难制造, 其中还会包含许多可能在运行过程中损坏的部件。很显然, 这些东西无法扩展。然而, 平面集成电路和量子比特芯片确实具有一种“整洁”的结构, 看起来是可以扩展的; 事实上, 这些类型的结构还适合进行大规模生产。但是, 量子计算机原型是“枝形吊灯”和量子比特芯片的综合体, 这一结构因此无法扩展。目前所有的量子计算机的设计都不可扩展, 因此我们需要更好的设计。

功能的扩展

制造图1a中的平面集成电路的生产线, 与亨利·福特装配大型汽车的生产线类似; 然而, 还有另一种类型的可扩展性, 这成为了计算机对世界产生巨大影响的关键。我们最初假设, 每个晶体管的尺寸不会改变。也就是说, 具有更复杂功能的芯片将会需要更多数量

的晶体管, 这将占用更多的面积, 从而导致每个晶圆中的芯片减少, 且每个芯片将具有更多的缺陷。我们可以由此得出成本-复杂度曲线, 如图2a所示, 其中最优点位于每条曲线的底部。

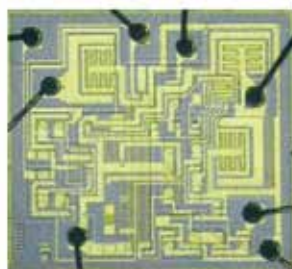
然而, 戈登·摩尔 (Gordon Moore) 1965年的文章¹报道了几代集成电路, 这些集成电路的功能一代比一代复杂, 但由于晶体管同时变小了, 它们占据的芯片面积是相同的。在这种情况下, 图2a中的成本-复杂度曲线同时朝着单组件的低成本和单芯片的多组件移动。摩尔根据这些假设预测, 到1975年, 晶圆的每个裸晶上的晶体管数量将呈指数增长至65,000个, 如图2b所示。这种指数级增长现在被称为摩尔定律。

如果量子计算机的规模可以以指数级扩展, 原因将会有所不同。量子计算机组件必须要非常精确地支撑量子纠缠, 但量子纠缠可以在某些情况下提供指数级的量子加速; 随着量子比特数增加, 在处理某些特定问题上的性能也能呈指数级增长。如果每一代量子芯片都能比前一代增加一个量子比特, 或者如果量子比特能每一代都比前一代更精确, 量子计算机就可以指数级地扩展。

材料的影响

双极晶体管主导了最早的集成电路的制造, 因为它们比金属氧化物半导体 (MOS) 晶体管更快、更小; 但是, 双极晶体管具有固有的扩展性问题。尽管经过了多次尝试, 双极芯片中缺陷的数量仍然无法减少到MOS水平。这

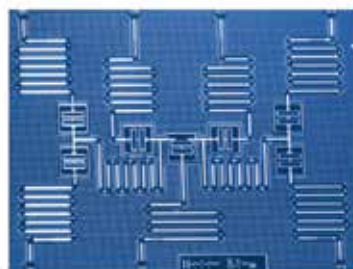
半导体集成电路示例



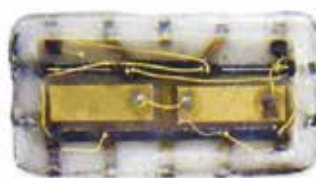
已知的可扩展的固态结构

(a)

量子计算机示例



(b)



第三维度中的脆弱结构限制了可扩展性

(c)



(d)

图1. 可扩展(a) 半导体电路 (约1971年的平面集成电路 [555定时器]; https://en.wikipedia.org/wiki/555_timer_IC) 和(b) 量子比特集成电路 (枝形吊灯底部是IBM 7的量子比特芯片); <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/computing/hardware/tiny-quantum-computer-simulates-big-molecules>)。然而, 量子比特集成电路只是量子计算机的一部分。(c) 飞线集成电路 (来源: 马克·理查兹 (Mark Richards)。由计算机历史博物馆提供) 和(d) 量子计算机枝形吊灯 (稀释制冷机冷却阶段; <https://spectrum.ieee.org/computing/hardware/europe-will-spend-1-billion-to-turn-quantum-physics-into-quantum-technology>)。由于第三维度的脆弱结构, 这两者都不能在制造中扩展。因此, 由于枝形吊灯结构, 包括(b)和(d)的量子计算机不可扩展。

为MOS带来了市场优势: 到1975年, MOS产品已经征服了芯片市场。

量子比特也有类似的材料问题。与双极和MOS晶体管之间的竞争相似, 约瑟夫森结 (Josephson junction, 即超导传输子, transmon) 量子比特、量子点量子比特和其他类型的量子比特间存在竞争。所有量子比特都可能退相干, 当工程化的量子比特与材料中的杂质相互作用时, 信息会丢失。当杂质与工程量子比特之间的叠加太强时, 杂质会变成额外的寄生量子比特并产生误差。

减少由材料杂质引起的退相干的

需求, 类似于减少双极和MOS晶体管中的缺陷的需求。目前没有人清楚任何量子比特中的退相干可以有多大程度的减少, 因此没有人知道哪种类型的量子比特最具长期的可扩展性。

重温提高半导体可扩展性的教训

如果将扩展半导体的过程应用于量子计算机, 需要哪些条件? 如上所述, 该过程需要考虑制造环节、功能和材料。然而, 还有其他问题, 正如摩尔在一篇短文中详述道:¹

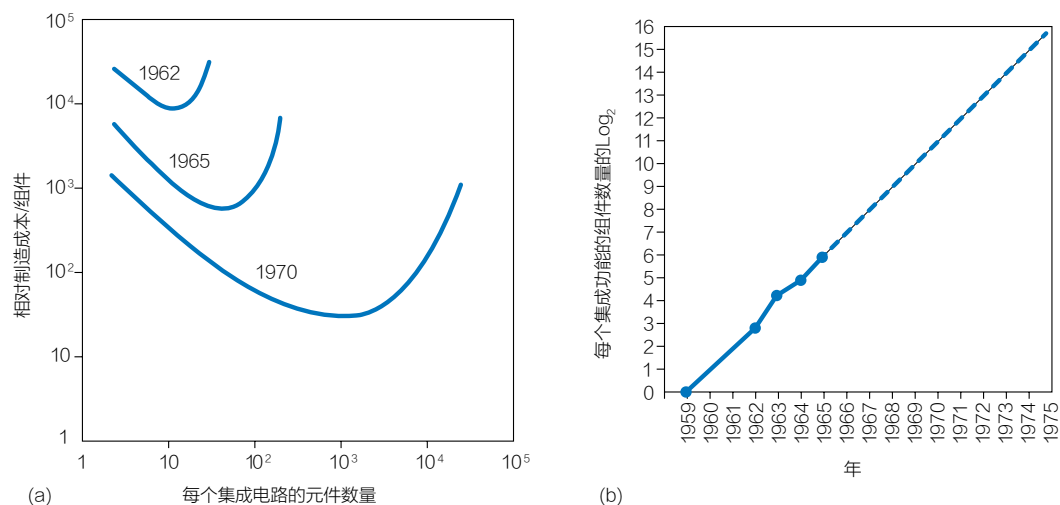


图 2. 来自 (a) 摩尔的文章¹中的数据, 该文章支持 (b) 对未来几年的最佳芯片尺寸的推断。(a) 中的图已经基本在公共语境中被遗忘, (b) 中的图表成为了摩尔定律的代表。但是, 在量子计算机被认为可扩展之前, 需要重新评估这些数据——如果量子计算机注定是可扩展的话。

- > 成本
- > 可靠性
- > 材料 (硅)
- > 产量
- > 复杂度
- > 裸晶尺寸
- > 互连空间
- > 热量
- > 速度
- > 单位面积功率
- > 设计自动化
- > 线性和射频

半导体和量子比特的设计目标的差异并不神秘。戴维·迪温琴佐 (David DiVincenzo) 提出的门式量子计算机 (gate-type quantum computers) 的目标,² 被量子计算界公认为以下的“迪温琴佐标准”:

1. 具有良好特性的量子比特的可扩展物理系统。
2. 能够将量子比特的状态初始化

为简单的同一基准态, 例如 $|000\rangle$...。

3. 一套“通用”量子门。
4. 比门的运算时间长得多的长相关退相干时间。
5. 对特定量子比特进行测量的能力。

第一个迪温·琴佐 (DiVincenzo) 标准使用了“可扩展的物理系统” (scalable physical system) 这一短语, 本质上是简单总结了摩尔标准, 以及半导体行业为管理计算机系统的扩展行而开发的庞大基础设施。我们建议将摩尔的清单与迪温·琴佐 (DiVincenzo) 标准相结合, 为可扩展的量子计算机制定合适的设计目标。

量子计算机的基准

量子计算机的扩展工作在几年前已经非正式地开始了, 但这却是IEEE、

新兴的量子计算机行业以及美国政府的代表在2018年8月30-31日的一次更加正式的会议的议题。(会议提出的) 那幅平滑的路线图认为, 存储密度 (memory density)、时钟频率 (clock rate) 等指标不适合在量子计算机的早期阶段提出。相反, 会议参与者为表1中所示的量子计算机基准开发了试验性矩阵, 针对量子计算的潜在用途的基准和实现它们所需的工程水平的基准是不同的。当这张表格最终被填上具体的指标 (其中一些还有待开发), 并被有关各方所共同接受时, 由此产生的基准将对量子计算机的扩展带来新的视野。

我们不知道量子计算机是否是为应用而生, 是否能达成来自媒体和国会大厅的期望。当前的小规模原型机, 与满足应用所需的数百万量子比特级的量子计算机之间存在很大差距。最具前景的方法, 是开发和改进现有的量子比特设计, 直到一种或多种方法变得可扩展

表1. 暂定的基准层级

基准水平	门式量子计算机	量子退火机	经典计算机（作为对照）
系统	有待开发	有待开发	时钟周期
门	量子体积，包括量子加速	指标有待开发	门延迟;不相关加速
设备	退相干时间	退相干时间	收益

展。世界上一些最大的公司正在相互竞争，并与资金充足的初创公司合作解决这些问题。然而，对任一单个的公司来说，开发大型量子计算机最终可能都太困难了。我们通过最近的会议认识到，IEEE的社群可以共同努力，提高获得成功的可能性。

致谢

桑迪亚国家实验室是一家多功能实验室，由霍尼韦尔国际股份有限公司（Honeywell International, Inc.）的全资子公司桑迪亚国家技术和工程解决方案有限责任公司（National Technology and Engineering Solutions of Sandia, LLC）在合同DE-NA-0003525的约定下为美国能源部国家核安全管理局（US Department of Energy's National Nuclear Security Administration）管理和运营。文章中表达的观点不一定代表美国能源部或美国政府的观点。本文由美国政府承包商根据合同号DE-AC05-00OR22725撰写。因此，出于美国政府目的，美国政府保留一份非独家、免版税的许可，可发布或复制本文的已出版形式，或允许其他人这样做。本文件部分总结了2018年8月30日至31日举行的会议，

参会者包括以下人员：保罗·奔克（Paul Bunyk），史蒂夫·布什（Steve Bush），乔什·柯布斯（Josh Combes），汤姆·康特（Tom Conte），马科斯·达·席尔瓦（Marcus da Silva），埃里克·德贝内迪克特斯（Erik DeBenedictis），戴维·弗格森（David Ferguson），保罗·加尔吉尼（Paolo Gargini），冉·卢克·高地奥特（Jean-Luc Gaudiot），李·戈麦斯（Lee Gomes），帕特·冈曼（Pat Gumann），斯科特·霍尔姆斯（Scott Holmes），特拉维斯·亨布尔（Travis Humble），阿兰·堪丁（Alan Kadin），斯科特·科佐伊尔（Scott Kozoil），布鲁斯·克里莫（Bruce Kraemer），诺伯特·林科（Norbert Linke），阿莱克斯·麦堪斯基（Alex McCaskey），凯西·麦吉奥赫（Cathy McGeoch），彼得·穆勒（Peter Mueller），欧乐戈·姆肯诺夫（Oleg Mukanov），保罗·内申（Paul Nation），萨泰亚弗鲁·帕帕·劳（Satyavolu Papa Rao），博佳·佩罗帕鲁（Borja Peropadre），劳费尔·鲍塞（Raphael Pooser），莫伊奴迪·瓜尔西（Moinuddin Qureshi），马克·雷特（Mark Ritter），安德鲁·索恩伯格（Andrew Sornborger），约翰·斯帕格（John Spargo），希曼舒·太皮亚尔（Himanshu Thapliyal），比

尔·唐迪（Bill Tonti），艾力·特拉克（Elie Track）和卡尔·威廉姆斯（Carl Williams）。■

参考文献

1. G.E. Moore, "Cramming More Components onto Integrated Circuits," *Electronics*, 1965, pp. 114-117.
2. D. DiVincenzo, "The Physical Implementation of Quantum Computation," *Fortschritte der Physik-Progress of Physics*, vol. 48.9, no. 11, 2000, pp. 771-783.

埃里克·P·德贝内迪克特斯是美国桑迪亚国家实验室计算研究中心的技术成员。他是IEEE高级会员，也是ACM和APS的会员。请通过 epdeben@sandia.gov 与他联系。

特拉维斯·S·亨布尔是美国橡树岭国家实验室的杰出科学家。他是IEEE高级会员。请通过 humblets@ornl.gov 与他联系。

保罗·A·加尔吉尼是IEEE国际设备和系统路线图的主席。请通过 paologargini1@gmail.com 与他联系。