

卷首语

从传统计算机芯片到量子计算机芯片

现代计算技术的革命史,从原理上看是一部物理“三明治”结构的创新史。从半导体晶体管到超导量子比特,这一跨越近80年的历程不仅揭示了基础科学的深邃力量,更展现了人类对算力极限的永恒追求。在这条道路上,每一次材料的突破、每一层结构的革新,都在重塑技术边界,为人工智能、量子信息等前沿领域奠定基石。

1 从二进制到量子态:数学与物理的双重驱动

计算能力的跃升始终根植于数学与物理的底层逻辑。以二进制为例,幂指定义了现代信息技术的规模:2的10次方是10个2相乘,等于1024,约等于1000,可以计为10的3次方,这就是现在二进制千字节的来源。如果把这个幂指数增加到60,就约等于10的18次方,就是100亿亿,这是目前世界上最快的超级计算机每秒钟处理的浮点数的数目。若指数增至70,算力将进一步突破至10万亿亿次量级,这是下一代10万亿/秒浮点数这种超级计算机的处理速度。

量子计算的诞生,标志着另一维度上的范式突破。为了了解这一点,我们先谈一谈初级概率论。一个硬币有正反2种状态,记为2的1次方;2个硬币导致4种状态,记为2的平方; N 枚硬币,则

产生2的 N 次方状态。如果 $N=60$,则产生的状态数差不多等于10的18次方,即100亿亿种状态。量子计算机是物理上通过量子叠加或量子纠缠,同时操控 N 个量子比特(量子硬币)的 2^N 种状态,实现指数级并进行运算、存储及处理量子信息的物理装置。按照上面的介绍,60个逻辑比特的理想量子计算机的算力即可匹敌传统超级计算机。所以,量子计算机背后的科学原理就是指数加速原理。

2 半导体与超导:物理“三明治”的技术迭代

1947年,半导体场效应晶体管的发明开启了信息时代的大门。其核心结构如同一个不对称“三明治”——金属电极、绝缘层与硅基半导体的结合。通过电场调控导电性,实现了数字电路的“0”与“1”。这一突破催生了集成电路与微处理器,相关成果2次荣膺诺贝尔物理学奖,并推动计算机从房间大小的庞然大物发展为掌上设备。然而,半导体技术的辉煌背后,是能耗与集成度的根本矛盾:为追求更高算力,晶体管数量呈指数增长,但这以空间与能源的巨量消耗为代价。

经典计算机的物理极限已然显现。世界上最快的超级计算机包含的晶体管数目达到了6千万亿个、占地3亩、日



薛其坤

实验物理学家
中国科学院院士
南方科技大学校长

研究方向为扫描隧道显微学、分子束外延、自旋电子学、拓扑绝缘量子态、低维和高温超导电性等。

南方科技大学,深圳
518055

均耗电 50 万度,如中国天河、神威等。尽管速度已经接近每秒 100 亿亿浮点数,但体积非常庞大。

解决这样一个问题的方案就是诺贝尔奖获得者塞尔日·阿罗什(Serge Haroche)提到的量子计算机。量子计算机的晶体管或者量子比特究竟长什么样?这就是超导“三明治”。1962 年,约瑟夫森效应揭示了超导体-绝缘体-超导体结构的量子隧穿特性。铝-氧化铝体系(氧化铝为绝缘层)的“三明治”成为超导量子比特的核心载体。

3 量子计算机研制的挑战与应对

当前量子计算机的研制仍处于起步阶段。超导路径虽占据主流,却面临制冷系统复杂、错误率高等瓶颈。需要应对的核心挑战是如何将实验室原理转化为稳定可控的工程技术。

尽管量子比特的结构与半导体晶体管相似,但超导量子比特

须在极端低温下才能工作,例如,以铝为材料的超导量子比特需在接近绝对零度(-273°C)下运行,需要依赖庞大的制冷系统。

由于庞大的制冷系统,最终的量子计算机需占用 1/4 足球场空间。与此同时,离子阱、冷原子阵列等替代方案也在并行发展,中国在相关领域发展很快。清华大学与北京量子信息科学研究院正积极探索多技术路径,试图通过光子集成、拓扑量子比特等方向突破现有局限。

然而,所有路径均需攻克同一核心难题:逻辑比特的保真度。现在的超导量子比特的出错率大概是 $10^{-3}\sim 10^{-4}$,通用量子计算机要求逻辑错误率低于 10^{-10} ,还有非常漫长的道路要走。半导体晶体管的出错率大约是 10^{-12} ,显然,相对于半导体的晶体管,超导方面还有大量的工作要做。

从超导“三明治”约瑟夫森效应到可编程量子比特的的发展,耗时近 40 年。从半导体理论到集

成电路商业化也经历了数十年沉淀。这印证了基础研究的颠覆性潜力与产业转化的长周期规律:即需要非常漫长的时间才能把一个原理变成真正有用的技术。量子计算机的完全实现或许需要 10~20 年的时间,其难度甚至超越人类首次登月,是一个国家最强科技实力的象征之一。中国已将量子信息列为战略优先领域,通过国家重点研发计划、新型研发机构建设等举措统筹基础研究与应用开发。

基础研究的发现往往会催生一些革命性的工业基础,但从科学发现到最后走向产业需要很长的时间,在量子信息这种高科技领域表现得更加突出。因此,要统筹好基础研究、应用基础研究、产业商业化,也要统筹好长期和短期的关系。经过努力,希望有一天量子计算机能走向真正的应用,给强人工智能、通用人工智能时代提供强大的算力。