

# 未来计算机

王海

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

IBM 在“深蓝”击败国际象棋大师卡斯帕罗夫之后,最近又推出每秒处理速度可高达 3.9 亿次的“蓝太平”,企图继续占据“世界第一”的宝座.但两个星期后,美国视算公司(SGI)便推出了新研制的超级电脑“蓝山”,其持续运作时每秒处理速度竟高达 1.6 万亿次.而且故事还没有完.根据美国“加速战略计算创新”(ASCI)和“计算、信息和通信”(CIC)两项计划,美国预计将在未来 10 年内陆续研制成每秒处理速度达 3 万亿次、10 万亿次、30 万亿次、100 万亿次和 1000 万亿次的高性能超级计算机.照这个发展速度加上不断完善的并行软件系统,也许计算机战胜围棋大师的日子也终将到来(围棋的每步计算量远远大于国际象棋每步的计算量,据推算目前最优秀的计算机计算一步围棋的时间甚至长达一年半之久).

影响计算机速度的因素主要是系统时钟频率的快慢,器件集成度大小和指令系统的结构优化程度.传统上,计算机性能的改善在很大程度上来自于体系结构和工艺技术的改进.首先,提高器件集成度和运行频率将继续提高微处理器的运算速度.当前工业大规模生产所采用的主要是 0.25 微米技术,预计在 2010 年左右可以达到 0.07—0.04 微米的水平,而时钟频率预计可接近或突破 Tops(每秒  $10^{12}$  次操作)水平.其次为了解决数据传输时的瓶颈问题,芯片的发展趋势也正由集成电路(IC)向集成系统(IS)发展.这种技术是将 CPU、寄存器和存储器优化地交错集成在同一芯片上,以保证处理器和存储器之间的通信带宽成数量级的增加.此外,采用更优化的指令集系统以最大限度的减少芯片的开销也可大幅度提高计算机芯片的运算速度.这三项主要技术的采用将继续提高传统的计算机数据处理能力.但到达亚 0.1

微米技术后,如不采用新的更高介电常数的介质膜来代替  $\text{SiO}_2$ ,更微小的 MOS 管将无法工作.而且光刻技术本身也存在材料的制约,我们可以采用具有更短德布罗意波长的带电或中性粒子来“曝光”,但用什么材料来制备掩模版等等一系列工业技术问题目前尚无答案.因此,不久前有人预测现行的计算机体系将在 2010 年遇到无法逾越的障碍.这种说法也值得商榷,从目前技术的发展趋势来看,新技术手段不断地被应用到计算机行业,Moore 定律至少到 2010 年仍会有效,届时计算机的基本构架应不会有大的改变.另一方面,在沿着传统框架发展高性能计算机的同时,一些新型的计算机体系也已被提出,有些已经从根本上突破了冯·诺依曼计算机体系与电子技术的局限,这方面的工作得到了多方面的重视.未来高性能计算机目前可分为量子、超导、光子和 DMA 计算机四种类型.

## 1. 量子计算机

首先我们要说明的是,尽管随着半导体器件的微型化,人们也开发出如量子干涉晶体管、量子点共振隧穿器件、库仑阻塞等各种各样采用了量子效应的器件,但我们将其归于传统概念的器件.而量子计算机与传统计算机不同,其基本组成是量子逻辑门.量子逻辑门的组成是原子而不是半导体中的 PN 结;量子逻辑门的逻辑运算是利用原子的量子效应,表征状态的是量子态而不是传统的电压值;运算的过程不是简单的逻辑运算,而是基于量子电动力学以幺正变换为主的量子运算.

量子计算机的雏形可以追溯到 1982 年左右,当时 P. Benioff 提出:计算机可以采用量子力学的方法运行,并首先提出了“量子图灵机”.此后随着三态量子逻辑门数学论证的深入,在

美国标准技术中心, 科研工作者们也终于在实验中实现了第一个量子逻辑门. 从此量子计算机成了数学家和物理学家讨论的热点问题. 量子计算机的优势在于利用量子效应对数据进行大规模并行处理. 传统计算机中 9 个传感器只能存放 9 位数, 而 9 位量子寄存器可以存放  $2^9$  个数, 并同时对这些数进行计算. 1994 年, 利用互联网采用分布在全球的 1600 台工作站成功地分解了一个 129 位数, 但耗时竟达 8 个月之久. 如果要分解 1000 位的大数, 仍然采用这些工作站其计算时间要达到几十亿年. 而采用 Shor 改进后的量子计算机算法, 只需要几百万步就可计算出. 一般说, 一台 40 位的量子计算机只要用不多于一百步就能复现一个量子系统, 而一台 1 万亿位的传统计算机完成这一工作需要模拟计算几年之久. 量子计算机不仅是计算速度上快, 可以解决如大数的因数分解等经典计算机难于解决的问题, 而且在模拟任何一种量子系统时, 量子计算机也具有无可比拟的优势. 此外, 利用量子计算的方法进行的加密被破译的可能性很小, 在通信领域采用量子编码加密可保证信息的安全性.

当然量子计算机也存在一些技术困难. 最大技术难题是噪音问题, 热扰动所造成的噪音信号将使得量子逻辑运算过程完全被破坏. 如何在热噪音不可避免的情况下, 使量子计算机正常工作; 如何采用纠错系统恢复量子逻辑运算; 如何制造量子计算机的原型机等等问题尚未解决之前, 量子计算机的实际应用前景并不乐观. 虽然一些国家已将其列入重要的研究课题, 但就目前的进展而言, 估计人们很难在一二十年内见到量子计算机的产品问世.

## 2. 超导计算机

1911 年昂尼斯发现纯汞在 4.2K 低温下电阻变为零的超导现象, 超导线圈中的电流可以无损耗地流动. 在计算机诞生之后, 就有很多学者试图将超导体这一特殊的优势应用于开发高性能的计算机. 早期的工作主要是延续传统的半导体计算机的设计思路, 只不过是半导体材料制备的逻辑门电路改为用超导材料制备

的逻辑门电路. 从本质上讲并没有突破传统计算机的设计构架. 而且, 在 80 年代中期以前, 超导材料的超导临界温度仅在液氮温区, 实施超导计算机的计划费用昂贵. 综合考虑, 没有雄厚财力的国家都很难投入该领域的实验研究. 1986 年左右出现重大转机, 高温超导体的发现使得人们可以在液氮温区获得新型超导材料, 同时基于超导 SQUID 在外加电流时可以储存或释放一份磁通量子这一原理的 RSFQ 技术也获得成功, 于是超导计算机的研究又重新得到来自政界、工业界和学术界的广泛重视.

采用 RSFQ 技术的超导计算机速度快, 功耗小, 集成电路的工艺比半导体集成电路简单. 处理器的工作频率可达 100GHz 以上, 而每一个门的功耗仅为  $0.1\text{--}0.3\mu\text{W}$ . 1995 年实验室中已用  $1.5\mu\text{m}$  工艺研制出 370GHz 的铌超导电路. 目前, 研制的重点目标是开发出千万亿次水平的超导工作站. 计算机的处理速度与其器件集成度有密切的关联, 目前计算机器件的集成度在很大程度上因为器件散热因素的影响而无法提高. 超导计算机最明显的优势是可以集成超大规模的电路而几乎无需考虑散热, 从而大规模提高计算机的运行速度, 实现超高频下稳定工作.

超导计算机实用化仍然需要做许多工作. 但对比其他类型的超级计算机的设想, 超导计算机的设想目前最为现实, 有望在 20—30 年内取得突破性进展. 因此美国在研制千万亿次超级计算机时, 超导计算机是重点研究和投资领域. 超导计算机的研制和开发同时也紧密依赖于材料科学的进展, 如果能找到更高温区甚至室温的超导材料, 超导计算机将变得更为可能. 如果将超导计算机与目前成熟的半导体技术相结合, 开发出混合型的超级计算机, 还可能大大缩短千万亿次超级计算机研制开发的时间.

## 3. 光子计算机

根据爱因斯坦的相对论, 宇宙中最快的速度是光速. 传统的计算机中信息流的载体是电子, 电子的运动速度远远小于光速 (仅为光速的 0.5% 左右), 并且在电子传输过程中还将产生

大量的热量,从而进一步影响到芯片的集成度.所以,如果能采用光子作为信息流的载体开发出光子计算机,无疑会大大提高运算的速度.光子计算机的最大优势是大规模的并行化处理计算.目前传统的电子计算机由于采用的是串行处理,在处理图像等大数据量的信息流时总不得心应手,为了获得一定的处理速度常常以牺牲图像的精密程度为代价.而光子计算机的处理方式很有可能类似于人眼识别图像的过程,图像将以一帧一帧的方式被光子计算机识别和处理.这种情况下计算速度显然将成千上万倍地提高,而且几乎无须损失画面的细节.目前正在研究的光逻辑运算处理器,其开关时间有望达到纳秒级,运算处理速度可达每秒亿次.全并行式的光子计算机运算处理速度的远期目标是达到预计的每秒千万亿次的量级.

对于光子计算机,关键的问题是如何研制出高功率低功耗的光子控制器件.电子计算机的发展很大程度上是由于可以控制电荷流动的二极管和三极管技术的进步.而光子计算机的基本器件的开发仍不完善,转化效率等指标远未达到工业标准.目前各芯片制造厂商很可能会利用光子的优势先期开发出一些光子与电子混合运行的集成芯片,以解决由于芯片集成度的提高而电子的传输速率有限所导致的同一芯片中时钟不同步的问题.在进一步完善光子集成电路技术,解决可靠性和容错性等根本问题的基础上,未来可逐步开发出具有超级性能的全光子计算机.此外,由于光子计算机的数据吞吐速率极高,为实现实用化全光计算机的目标,数据的并行存储和读取技术的开发也是十分重要的课题.总之,采用光子作为信息的载体,从信息载体速度上讲,显然将会大大提高数据传输的速度;而从信息的处理方式上讲,将会因超大规模并行模式的应用而大幅度提高数据处理的速度.

伴随光子计算机的发展,在光子存储技术和光子通信技术方面的研究方面也取得了引人注目瞩目的进展.以Gree公司为代表开发的GaN基蓝光LED和LD产品将使得光盘的存储密度

提高1—2个数量级;IBM等公司所主导的光全信息存储模式研究有望获得 $100\text{GB}/\text{cm}^3$ 的海量存储;此外采用光孤子通讯技术将大幅提高光通讯的质量和密度,降低光纤线路的成本.全光计算机加高速宽带光纤网络及海量光存储技术将带你畅游21世纪的信息海洋.

#### 4. DNA 计算机

未来高性能的非传统计算机设想中最具神秘色彩的是DNA计算机.懂得一些生物学知识的人应该知道DNA中基本的单位是脱氧核苷酸,而组成脱氧核苷酸的碱基有4种,不同碱基组成的脱氧核苷酸总共有4种.多个脱氧核苷酸一个连一个,就成为脱氧核苷酸链.在一定条件下,双螺旋的DNA分子会解旋和复制.复制过程是碱基的匹配过程.利用生物技术可以制备某种设定模式的单链DNA,在外加酶的作用下可以匹配形成新的DNA链.如果我们把4种脱氧核苷酸的复杂序列看成是某种信息的编码,并且拥有可以随心所欲“裁剪设计”多个DNA链的复制、合成、分解过程的酶,那么我们岂不是就找到了一种可以利用DNA分子进行计算的计算机吗?这一天才的想法来源于美国工程院院士M. Adleman的灵感.并首先由他付诸于实践—计算了一个7个城市的哈密顿路径的问题.历经7天的实验计算,完成了人类首次操控DNA分子进行的计算.DNA计算机的优势在于大规模的并行处理能力.若以一个DNA单链的连接为一次运算,那么对 $10^{20}$ 个以上的DNA单链同时操作所获得的处理速度将是目前超级计算机的成千上万倍.

DNA计算机提出后也遭到了一些反对意见.目前所提出的DNA计算机模式仅是通过加大DNA单链的个数提高并行处理的能力.因此,如果要解决1万个城市的哈密顿圈的问题的话,恐怕全世界全部的DNA都用上也不够.问题的关键在于DNA计算机的雏形“图灵机”尚未明确.近期DNA计算机有突破性进展的可能性不大.但回过头来看,100年以前电子计算机的祖先,哪个不“土头土脑”呢?DNA计算机设想极大地开拓了人们的视野,丰富了

人们的想象空间。或许最终人类将会开发出实用的 DNA 计算机。另外有必要一谈的是,其他生物芯片的开发正在世界各地深入展开。在生物传感器件和存储器件领域的飞速进展使人们可以预计在下个世纪至少将会产生出半导体技术与生物技术相结合的芯片或原型计算机。

## 5. 结束语

研究具有超级计算能力的计算机,一方面是人类的无止境的求知欲望所驱动,另一方面是数学、物理、生物、材料、气象等科学研究的迫切需要。如材料科学目前已逐步摒弃传统的“炒菜式”开发模式,而试图通过缜密的计算给出材料的研究方向,以缩短新材料开发周期和减少投资成本。而目前的超级计算机还不能完全胜任其所需的计算量。

现在我们的时代用计算机发展的语言可以视为 3G 时代。这是指存储密度在 GB 量级;处理速度为 Gops(每秒吉次操作);传输速度达 Gbps(每秒传输吉位数据)。下世纪初,计算机发展将进入 3T 时代,即处理速度为 Tops(每秒太次操作);传输速度达 Tbps(每秒传输太位数据);存储密度在 TB 量级(1T = 1000GB)。这样人类才会进入真正意义的多媒体时代。信息时代意味着只有对信息处理的更快和存储的更密才能保持领先。所以各国都格外关注超级计

算机及外围设备的研制和开发。目前我国的计算机水平尤其是硬件制造水平和先进国家来比差距明显,因此在计算机的研制战略上应“有所赶,有所不赶”。目前就半导体计算机制造技术看,我们很难追上个别发达国家,与其跟着跑,不如从新起点开始。传统的半导体计算机迟早要退出历史的舞台。最迟下个世纪的中叶,新类型的计算机与传统计算机的较量将初见分晓。开发新型的计算机迫在眉睫。计算机的更新将淘汰和塑造一批新型企业。Intel-Microsoft 联盟届时也未必能应变自如。把握历史性的机遇将握住主动权。在我国不仅仅是需要个计划来跟踪国外未来高性能计算机的发展态势,而更需要一大批具有创新思想的人才,这样才有可能拿到中国的版权。上个世纪末物理学最大的遗憾是大多数物理学家的思想凝固,不能敏锐地把握理论和技术的新趋势。本世纪行将结束,21 世纪的序幕即将拉开,未来计算机究竟怎么样?人们拭目以待。上面所介绍的仅仅是一些已被提出的设想和研究的方向。还有没有其他可能的设想呢?可以说,只要一个体系能完成信息的编码、运算和识码过程,就有可能成为一种计算工具。也许你能设想出更好的未来计算机!

\*\*\*\*\*

## 科苑快讯

### 德国高精度原子钟开始试运行

据《科技日报》报道 位于布伦瑞克的德国联邦物理技术局近日宣布,该局耗时 2 年研制的高精度原子钟已建造完成,并已开始试运行。

这台原子钟在理论实验中的精确度达到 10 的负 15 次方秒,相当于每 1000 万年误差 1 秒。但是联邦物理技术局说,实际运行中的一些干扰可能会降低原子钟的精度。

联邦物理技术局的科学家将铯原子蒸气封闭在一个长 1 米的真空谐振腔中,用 6 束激光

同时照射铯原子,使其温度降低到绝对零度以上千分之一摄氏度(绝对零度为零下 273.15 摄氏度),这时原子近乎呈“静止”状态,其水平方向的运动速度只有每秒 1 厘米。在此状态下铯原子发生谐振的信号可以作为划分时间单位——秒的依据。

物理技术局说,高精度原子钟在天文观测和物理研究中是必不可少的工具。比如,为了验证爱因斯坦广义相对论的时空效应,就必须用最精确的原子钟作为参照。在实用技术领域,全球定位系统(GPS)也离不开精确的计时。因此美国、英国、法国和德国的科学家都在竞相制造精度更高的原子钟。