

·科技纵横捭阖·

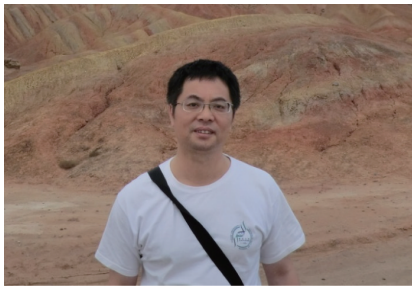
## 摩尔定律已经接近物理极限了吗

4月19日,是“摩尔定律”诞生50周年纪念日。毋庸置疑,电子和信息技术已深入我们生活,触摸着我们的衣食住行,其发展速度令世人瞩目,似乎有源源不断的动力推动着这一进程。

1942年世界第1台电子计算机问世,占地150 m<sup>2</sup>、重30 t,装配了数万只电阻、电容和电子管等元器件,耗电150 kW。当时人们憧憬着如此多的元件和连线可以集成在一小块载体上。1947年美国贝尔实验室制造出第1只晶体管,替代了体大、耗电而且“脆弱”的电子管,让这种想法成为可能。此后,基于半导体集成电路的构想相继出现,1958—1959年间发明了锗集成电路和硅集成电路。自此,集成电路持续引导着电子革命。1965年,美国人戈登·摩尔(Gordon Moore)从一个化学家转型成电子工程师,他注意到从第1块集成电路产生以来,芯片上集成的晶体管数量大约以每年翻一番的速度增加。他甚至还大胆预测,这些组件的缩小速度将持续至少10年时间,并于1965年4月19日正式提出。当时人们只认为这是对芯片发展速度的总结,甚至摩尔自己都认为这不是科学上的定律,只是一个机遇而已。不过,后来数十年的发展却不断印证了这一观察和推断,使其最终赢得了“定律”的殊荣,并修正为“集成电路的集成度每两年翻一番”。

摩尔定律提出3年后,英特尔公司诞生,摩尔是该公司的创始人之一。从1971年英特尔推出第1片微处理器至今,微处理器使用晶体管数量的增长基本符合摩尔定律。摩尔定律不仅适用于对存储器芯片的描述,也可精确说明处理器能力和磁盘驱动器存储容量的发展。

数十年来,半导体行业中摩尔定律的持续,主要得益于制造工艺的发展。1959年美国仙童公司推出平面型晶体管,3年后推出平面型集成电路,这种平



面型制造工艺就是在研磨平整的硅片上采用“光刻”技术来形成半导体元件的。只要“光刻”精度不断提高,元件密度就会相应提高,该工艺被称为“半导体的工业键”,也是摩尔定律持续的技术基础。1970年俄罗斯物理学家尼古拉·巴索夫等开发了准分子激光,可用来腐蚀硅片上的微电路,继续为这个技术的发展助力。当然,基础科学的重要作用也值得重视,如:半导体能带理论的发展促成了晶体管的诞生。

无独有偶,类似摩尔定律的增长规律开始逐渐体现在制药、遗传学和医疗等行业。生物学家已将摩尔定律用于生命科学研究,将摩尔定律中的晶体管换成了核苷酸进行计算,结果显示生命最早出现在100亿年前,比地球45亿年的预测年龄老得多。这一假说支持了生命科学中的一个重要流派——有生源说。

随着晶体管变得越来越小,其弊端开始显现。从20世纪90年代开始,人们对摩尔定律的前景产生担忧。虽然微小的晶体管其速度和能源效率持续增加,但当组件达到约100 μm时,小型化会产生负面效果和糟糕的性能。英特尔公司与IBM公司试图在基础科学中寻找提高晶体管性能的材料。在凝聚态物理学家们的帮助下,他们知道了当晶格拉伸时硅的导电能力可大幅度提高。进入21世纪,由于应变硅技术的引入,摩尔定律又得以持续。到目前为止,半导体行业的发展从未停顿下来,晶体管继续缩小,电脑芯片也体现出更高的性能。现在最先

进的微处理器晶体管只有10~14 nm,预计2023年可以缩小至4~6 nm。不过,如今电路中的余热已成为限制因素,将阻碍摩尔定律中有关“计算机时钟速度的指数增长”,耗电芯片也制约了其在移动设备上的应用。摩尔定律是否已经接近其物理极限呢?

在对摩尔定律前景担忧的同时,也存在一些乐观态度,不过并非盲目。摩尔定律目前面临的物理极限是难于制造出更小的芯片,如果能找到硅的替代品,那么问题或许就迎刃而解了。基于第三代半导体材料氮化镓的硅基板技术可以实现很高的功率密度,进一步缩小设备的外形尺寸并提高能效。二氧化铪是一种具有宽带隙和高介电常数的陶瓷材料,即使厚度只有几个原子也具有绝缘作用,是最有可能替代目前硅基集成电路的核心器件,以解决尺寸极限问题。这些努力可能会带来一代或两代以上更小晶体管的产生。但之后想进一步提高性能,则需要全新的物理学支持。世界各地的实验室都在寻找可大大降低能耗的方法和材料,其中一个方式是利用原子集体“拓扑”属性的固有稳定性,这是古代在传递信息中所采用的结绳编码实践的现代解读。还有一些研究人员正在尝试最基本的“神经形态”电路架构,这是来自大脑神经网络可塑性的灵感。

有人认为,摩尔定律也许更像一个信仰系统,这个信仰牵引着科学技术不断超越自我,并取得新的突破。诚然,在物理实验室能完好运转的法则未定适用于批量生产,今天大多数的努力和尝试也许最终将一无所获。然而,社会应该有信心,基础科学的突破将成为维持摩尔定律与人类进步的阶梯。

文/赵斌

作者简介 复旦大学生命科学学院,教授。图片为本文作者。

(编辑 王丽娜)