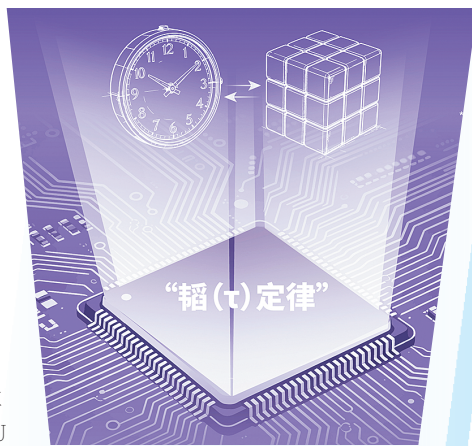


当晶体管小无可小,那就让电子跑得更快

华为「韬定律」解锁后摩尔时代芯片进阶新路

近日,华为提出的“韬(τ)定律”引发半导体产业界和学术界热议。围绕“韬定律”究竟是什么、它与摩尔定律有何不同、能否成为可持续产业路线等问题,记者采访了上海交通大学集成电路学院(信息与工程学院)研究员景乃锋。他的研究方向包括大算力高效芯片、GPGPU(通用图形处理器)、存算一体及近存计算等。



本版图片 IC

问 “韬定律”是什么?它和摩尔定律有何不同?

景乃锋:“韬定律”不是像牛顿定律那样的物理定律,更像是一条被实践证明的工程路线。“ τ ”是电路中表征时间常数的希腊字母,用于表示RC(电阻-电容)延迟。华为延伸了这一符号,提出在器件、电路、芯片、系统等多个层级上,利用各种技术及其组合,通过将延时缩小,实现性能持续提升。

通俗地说,“时间缩微”缩的是延时,包括各个层级上信号传播的延时。降低延时,本来就是集成电路、芯片和电子系统追求速度与性能提升的核心目标之一。

摩尔定律着眼于“空间微缩”,即在物理上把晶体管做小,以降低延时并提升集成度。过去几十年,缩小晶体管尺寸是推动半导体产业发展的重要动力,但它并不是降低延时的唯一手段。当前,先进工艺越来越贵,收益却越来越小,尤其在先进制程获取受限的情况下,如何利用可获得的工艺继续提升性能,就变得更加重要。

摩尔定律在工艺和器件层面,通过空间微缩降低延时;“韬定律”则给出了更多维度。电路级可以通过逻辑折叠,更具体地说包括三维堆叠、混合键合等技术,提升单位面积集成度,拉近模块之间的距离,降低数据传输延迟和功耗;芯片级可以通过架构设计、高速互连降低延迟;系统级则可以通过任务优化、协议优化、调度优化等降低服务延迟。

早期,摩尔定律的有效性掩盖了其他技术的重要性。随着后摩尔时代器件级延迟降低的成本越来越高、收益越来越小,单纯依赖传统工艺提升性能的路径局限更加明显。换句话说,“韬定律”打破的正是这种路径依赖。

问 从学术和技术演进角度看,这一次是全新方向吗?

景乃锋:从学术和技术演进角度看,芯片性能提升本身就是由工艺和架构双轮驱动发展的。在工艺受限条件下,架构发展成为另一重要动力。图灵奖得主大卫·帕特森和约翰·亨尼斯在2017年就提出,未来十年是计算机架构发展的黄金时期。

器件、电路、系统层面也有很多研究和发展方向。例如英伟达提出的黄氏定律,也谈到通过软硬件协同优化,即系统层面的优化,持续提升GPU(图形处理器)性能。因此,“韬定律”给出的路径具有代表性,更符合我国集成电路产业的发展现状。

在上海交大,我们课题组的研究方向包括三维芯片、芯粒技术、近存计算、存算一体、GPGPU等。这些方向同样关注数据传输瓶颈、功耗和能效问题。比如近存计算和存算一体,在突破数据传输瓶颈,也就是存储墙的同时,对能效提升也有帮助。“韬定律”更强调“延时即性能”,在功耗、面积等其他指标优

化上,也能间接发挥作用。

问 华为提到的“逻辑折叠”“系统折叠”,与芯粒(Chiplet)、三维堆叠(3D stacking)、晶圆基板上芯片封装(CoWoS)、光互连等技术是什么关系?

景乃锋:“韬定律”给出的是一个发展方向,其实现包含器件、电路、芯片、系统等多个层级多种技术的组合。华为基于自身在逻辑折叠、统一总线以及Hi-ONE等方面的探索和实践,率先证实了这些技术的可用性和有效性。

这些探索和实践也是学术界和工业界近年来关注的热点技术,与上述技术存在密切关联。这些技术并不都是华为创造的,但华为通过解决一系列复杂的工程技术难题,率先灵活应用这些技术,体系化实现工艺受限条件下集成电路性能持续提升。

问 “韬路线”距离成为真正可规模化、可持续的产业路线会有多远?

景乃锋:“韬路线”包含器件、电路、芯片、系统等多个层级多种技术,其内涵并不是一成不变的,因此瓶颈也不同,每种技术都存在各自需要解决的新问题。比如三维堆叠带来的热问题、应力问题,就是新技术路线带来的新问题,学术界和工业界都在持续探索。从宏观上讲,难点在于如何将这些技术有机地和需求结合,并系统化解决其中出现的新问题,使其在实际产品中切实发挥作用。

EDA(电子设计自动化)工具是从解决这些问题共性方法中提炼出的工具集合,可以将可行经验和方法赋能其他从业者,形成规模化、持续化的产业路线。同时,学科交叉、产教融合的人才培养,也是推动这一路线规模化、持续化发展的核心动力。

问 从中国芯片产业发展的角度看,您如何理解华为提出“韬定律”的意义?

景乃锋:后摩尔时代意味着单纯靠“空间微缩”免费提高性能的时代结束,由此触发人们打破传统路径依赖,寻求新方法和新途径。结合国内集成电路形势,这一点变得备受关注。

未来十年,芯片行业核心竞争变量一方面来自集成电路产业内部,谁能够在“时间缩微”与系统级优化上领先,谁就能主导我国乃至全球芯片新格局;另一方面来自外部需求端,人工智能的需求将直接影响芯片行业发展。

“韬定律”指明了从“空间”到“时间”的发展范式变化,也引发对先进工艺价值的重估。它为中国芯片产业开辟了一条不单纯依赖先进工艺、光刻机的自主可控道路,对于解决我国集成电路产业面临的“卡脖子”问题具有现实意义。它不是颠覆摩尔定律,而是开辟了第二主赛道,也体现了我国集成电路从“跟随”到“引领”的历史性转变。

本报记者 易蓉

芯片

“变形记”与“接力赛”

你手中握着的智能手机,或许是人类工程史上“最密集”的奇迹之一。把它拆开,找到那枚指甲盖大小的主芯片。显微镜下,你会看到一座“微观城市”:亿座“建筑”层层叠叠,千万条“街道”纵横交错,一群被称为电子的“居民”在其中日夜奔流,以接近光速的速度传递信息。

半个多世纪以来,为了让这座“城”越来越大、越来越快,人类遵循着一个看似简单的法则:把城里的每一栋“建筑”,也就是晶体管,做得尽可能小——这便是著名的摩尔定律。不过就在前两日,一个由中国企业提出的全新概念——“韬(τ)定律”,正在向这一统治了六十年的“权威”发起挑战。今天,不妨来了解一下这座“微观城市”的建造史。

开天辟地 晶体管取代庞然大物

要理解芯片,首先要理解晶体管,就得回到一个更早的年代。1946年,世界上第一台通用计算机ENIAC诞生。它重达30吨,占地170平方米,“肚子”里塞满了近1.8万根真空管。这台庞然大物,第一次让人类看到了电子计算的曙光。

一年后,贝尔实验室的三位科学家——巴丁、布拉顿和肖克利发明了一种全新的电子开关:晶体管。它不需要加热灯丝,不需要巨大的玻璃管壳,靠的是一小块半导体材料就能实现真空管的全部功能。更重要的是,它不仅小巧,而且可以大规模、低成本地制造。

1959年,德州仪器工程师杰克·基尔比做出了一个划时代的创举:他把好几个晶体管连同电阻、电容一起,做在了同一块半导体材料上。这就是世界上第一块集成电路,芯片的雏形就此诞生。随后,仙童公司发明了平面制造工艺,让芯片的大规模量产成为可能。

“瘦身”竞赛 摩尔定律统治的时代

1965年,英特尔联合创始人戈登·摩尔在《电子学》杂志上发表文章。他观察到一个规律:集成电路上可容纳的晶体管数量,大约每两年就会翻一倍。这个预言后来被称为“摩尔定律”。它的影响是革命性的:每隔一两年,同样大小的芯片上可以塞进多一倍的晶体管,算力翻倍。

于是,一场席卷全球的“晶体管瘦身竞赛”正式打响——1971年,英特尔推出了世界上第一款微处理器4004,上面集成着2200多个晶体管,每个晶体管的尺寸大约是10微米;1993年,奔腾处理器问世,晶体管数量迈过300万大关;到了2023年,苹果的M2 Ultra芯片已经集成了1340亿个晶体管……如今最先进的制程已经推进到3纳米甚至2纳米。这股疯狂的“瘦身动力”,驱动着人类手机从“砖头”变成“掌上电脑”,驱动着互联网、AI和万物互联的全面到来。有专家点评说,摩尔定律是过去六十年人类科技文明最重要的引擎之一。

前方“拥堵” 当“瘦身”已无路可走

然而,“竞赛”终有尽头。为什么晶体管不可能无限缩小?答案藏在最基本的物理学里——

晶体管像一个微型的“水龙头”,通过一个叫“栅极”的开关来控制电流的通过。制程越先进,栅极长度(或晶体管的沟道长度)就越短。

当一个晶体管小到栅极的绝缘层只有几个到十几个原子厚时,问题出现了:栅极下方的绝缘层变得极薄,薄到部分电子失控。这意味着,当晶体管缩到原子尺度,整个物理规则都变了,经典的控制方式彻底失效。

不仅是物理极限,还有经济极限。建设一条先进制程的生产线,成本高得令人咋舌。一座3纳米晶圆厂的建设费用超过百亿美元;5纳米芯片的设计成本超过5亿美元。如此巨大的投资,能换来多少性能提升呢?答案是:制程越先进,继续“瘦身”的性价比正在断崖式下跌。

当下,晶体管的“几何缩微”之路正在同时撞上物理的南墙和经济的冰山。一个所有人都心知肚明的问题浮出水面:摩尔定律见顶之后,芯片性能还能靠什么继续提升?

换条赛道 “瘦身”到“提速”的思维革命

今天,故事来到“韬定律”——别让晶体管瘦身了,改成让信号跑得更块。这就是“时间缩微”替代“几何缩微”的核心含义。

值得关注的是,当摩尔定律这棵大树生长速度放缓,全球半导体产业的创新力量正在多个方向上“开枝散叶”——其中一个热门的方向叫“芯粒技术”,它的思路是,与其把所有功能都挤在一颗超大芯片上,不如把它们拆成一个个“积木块”,最后用先进封装技术把它们“拼”在一起;还有一个方向是硅光子技术,科学家的设想是,用光来取代电,作为芯片之间,乃至未来芯片内部的高速通信方式,从而实现超高速、低功耗的数据传输;此外,新材料探索也在如火如荼地推进——人类正在寻找硅材料的接班人。

“韬定律”揭示了一种全新的可能——在成熟工艺的基础上,通过系统架构创新,同样可以实现高性能芯片的迭代演进。这意味着,半导体产业的竞争格局,正在从“制程之争”转向“系统创新之争”。

本报记者 郜阳

