



沈绪榜,湖南临澧县人,中国科学院院士。历任航天工业部驻山微电子技术研究所副所长、研究员,中国宇航学会第一届理事,现任西安微电子技术研究所研究员。长期从事电子计算机的总体逻辑设计,参加中国大型系列电子计算机的研制,领导运载火箭计算机的总体逻辑设计,其成果 1985 年获国家科技进步奖特等奖。著有《微型计算机》等。

## 卷首语 Foreword

科技导报 2011,29(12)

# 系统芯片的自然统一

1970 年代发展起来的处理器芯片使计算机的指令集体系结构(Instruction Set Architecture, ISA)设计转移到了芯片上来,实现了计算机的廉价制造和批量生产,促进了计算机产业和电信产业的发展,使 9 亿人口进入了知识社会。随着芯片集成度的上升和计算机应用的发展,1987 年科学家提出了系统芯片(System On Chip, SOC)的概念,目标是使计算机的设计都演变到 SOC 设计上来,成为处理器芯片的换代技术。现在,虽然 1Petaflops 的 MPP(Massively Parallel Processing)计算机已经问世,但其一般应用效率只有峰值运算速度的 5%—20%,SOC 的并行计算模式和体系结构还未演变到成熟的地步。

现实世界中的不少问题往往是可以多种算法,按多线程/任务并发地求解的。基于计算机的网络通信,每发送 1 条短信要涉及到后台服务器的许多线程,特别是在短信峰值时间内,每秒甚至会有数亿个线程并发的任务。并发的应用特征促进了任务/线程级并行(Task/Thread Level Parallel, TLP)计算模式的发展,处理器芯片演变成了多核/众核的 CPU 系统芯片。许多 MPP 计算机就是按照 TLP 计算模式工作的,线程是在处理器(核)上串行执行的,是一种 MTMD(Multiple Thread Multiple Data)的粗粒度的并发计算,使线程之间存在同步和互斥问题。

芯片是在火箭制导控制系统中开始嵌入融合应用的。嵌入式计算机除了处理器之外,传感器实现了人的视觉、听觉与感觉等能力,执行器实现人的四肢等能力。嵌入式计算机处理的大量信息主要是视觉信息,促进了图像处理的细粒度并行的数据级并行(Data Level Parallel, DLP)计算模式的发展,开发出了 DLP 计算模式的 SIMD/Multi-SIMD 的 GPU(Graphic Processing Unit)系统芯片。实际应用说明,DLP 计算模式的 GPU 系统芯片,完成地震成像等数据并行算法的计算效率,要比 CPU 系统芯片的高百倍。于是,不仅有了 DLP 计算模式的 MPP 计算机,而且有了 TLP+DLP 计算模式的 MPP 计算机。由于现在的 CPU 系统芯片和 GPU 系统芯片的体系结构是不同的,TLP+DLP 计算模式的 MPP 计算机存在着不同芯片之间的比例分配和数据传输问题。因此,有了通用的 GPU,也就是所谓 GPGPU 系统芯片的研究。

对于非数据并行算法,现在只有 OLP(Operation Level Parallel)计算模式的 ASIC/FPGA 等阵列芯片,可以使操作流水的深度和操作并行的长度都没有限制。实际应用说明,ASIC/FPGA 等阵列芯片对非数据并行算法的计算效率,要比 CPU 系统芯片的高百倍。阵列芯片常用作芯片设计的模拟器和 MPP 计算机的协处理加速器,因为算法是通过电路设计/逻辑设计映射到这些阵列芯片上的,没有指令流的编程灵活性。

计算机自问世之后首先是作为模拟工具使用的,计算模拟推动了 MPP 计算机的发展,已经有了 1Petaflops 计算速度的 MPP 计算机,1Exaflops 计算速度的 MPP 计算机正在研制之中;据估计,化学研究将需要 1Zettaflops 的计算速度。由于 TLP、DLP、OLP 这 3 种计算模式的芯片体系结构是不统一的,没有减轻甚至加重了 MPP 计算机的“效率墙”、“编程墙”、“功耗墙”、“存储墙”和“通信墙”等问题。

计算机是用来研究我们周围的一切事物的,人们可感知的 3 维空间中的事物是随一维时间而连续演变的;从应用上,SOC 体系结构应该是与事物的四维时空演变自然统一的。SOC 体系结构是应用和实现之间的桥梁,从实现上,SOC 体系结构也应该是与制造技术的演变自然统一的。按照摩尔定律的应用实质,芯片制造技术的基础作用就是使计算机和电子产品变得更小、更轻、更冷、更快和更经济智能。一次集成的芯片技术是以减小特征尺寸而延长摩尔定律的,研究表明每 10 年就会出现一代更小和更廉的计算机。现在的芯片集成度已高达 10 多亿晶体管,为阵列存储器(array memory)和阵列处理器(array processor)的研制创造了条件。但 65nm 之后开始出现了漏电流、线延迟和故障率等所谓的红墙(Red brick Wall)问题,还有特征尺寸的极限问题。为了延长摩尔定律,除了研发晶体管新架构以降低功耗外,IBM、Intel 与 Samsung 等公司还开发了二次集成的 TSV (Through-Silicon-Via) 技术,可使芯片的互连线缩短 1000 倍,引出头增加 100 倍。美国休斯公司在 1987 年 10 月就采用了这种一次和二次集成技术自然统一的发展策略,在 3 $\mu$ m CMOS 工艺的基础上,开发了 WSI(Wafer Scale Integration)技术和 TSV 技术,研制成功了一种航空航天图像处理的 32 $\times$ 32 个 16 位的定点 PE 阵列的 SIMD 体系结构的 MPP 计算机,体积只有手掌大小。

1994 年开始,我们也研制了 16 位字长的有 32 个处理元的每秒 3.2 亿次的阵列处理器芯片,和单指令流的 4096 个处理元的 SIMD 体系结构的 MPP 计算机。按照现在的自然统一的一次和二次集成技术,我们将 1966 年 Flynn 提出的 SISD、SIMD、MISD 和 MIMD 等 4 种体系结构加以合并,提出了单指令流 SI (SD+MD)=SISD+SIMD 的 DLP 计算模式,与多指令流 MI (SD+MD)=MISD+MIMD 的指令级并行(Instruction Level Parallel, ILP)计算模式;研究了以阵列处理器和数据阵列(数组)存储器为基础,实现单指令流的 DLP 计算模式的 SOC 体系结构设计。在这种 DLP 计算模式的 SOC 体系结构的基础上,把数组存储器也作为多指令流的 ILP 计算模式的指令阵列(指组)存储器使用;使阵列处理器也可以完成的多指令流的 ILP 计算模式,并能等效地取代 OLP 计算模式,于是就实现了 ILP 计算模式的 SOC 与 DLP 计算模式的 SOC 体系结构的自然统一,把 TLP 计算模式在 CPU 系统芯片上粗粒度并发的低效计算,转化为 DLP+ILP 计算模式统一的 SOC 上细粒度并行的高效计算。

芯片是知识社会的技术要素,计算机和电子产品的经济性和发展前景,都体现在芯片的技术含量中。但在我国的进口产品中,芯片还是占用外汇最多的项目。有理由相信,在“十六专项”战略任务的牵引下,抓住 SOC 体系结构尚需统一的发展机遇,研究系统芯片的自然统一,实现国产芯片的跨越式发展,是能打破国外芯片的垄断局面的。

沈绪榜

(西安微电子技术研究所,西安 710054)