

21 世纪微电子技术发展展望

Prospects for the Development of the Microelectronic Technology in the 21st Century

李志坚

(清华大学微电子学研究所, 中国科学院院士)

北京 100084)

一、集成电路技术的高速发展

几十年来集成电路(IC)技术一直以极高的速度发展。著名的摩尔(Moore)定则指出, IC 的集成度(每个微电子芯片上集成的器件数), 每 3 年左右为一代, 每代翻两番。对应于 IC 制作工艺中的特征线宽则每代缩小 30%。根据按比例缩小原理(Scaling Down Principle), 特征线条越窄, IC 的工作速度越快, 单元功能消耗的功率越低。所以, IC 的每一代发展不仅使集成度提高, 同时也使其性能(速度、功耗、可靠性等)大大改善。与 IC 加工精度提高的同时, 加工的硅园片的尺寸却在不断增大(现在直径已达到 8 英寸, 不久可望达到 12 英寸), 生产硅片的批量也不断提高。以上这些导致了微电子产品发展的一种奇妙景观: 在集成度一代代提高的同时, 芯片的性能、功能不断增强, 而价格却不断下跌。这一现象的深远意义在于, 随着微电子芯片技术的快速发展, 一切微电子产品(计算机、通信及消费类产品等)也加速更新、换代; 不仅新一代产品性能、功能大大超过前一代, 而且价格的越来越便宜又为电子信息技术的不断推进及其迅速推广应用到各个领域创造了条件, 导致了人类信息化社会的到来。

一般常以动态存储器(DRAM)芯片的存储容量来代表 IC 芯片的集成度, 用微处理器(MPU)芯片的主频来衡量当时 IC 芯片能达到的速度。当前 IC 已达到特大规模集成(ULSI——集成度大于 10^8) 阶段, DRAM 最高的已达到 256 兆位(256Mbit), 按 Moore 定则推算, 预期到 2012 年前后可达 256 吉位(256Gbit, 1 吉位 = 10^3 兆位)。一套大百科全书的信息容量约为 1Gbit, 人脑的信息量为 4Gbit, 这表明当前的 3 个 DRAM 芯片已几乎能存下一套大百科全书的全部信息, 而到 2012 年 1 个 256Gbit 的 DRAM 芯片的信息容量将等于 64 个人的脑子。当前高速 PC 机的 MPU 工作频率可达 500 兆赫

(MHz), 预期到 2012 年左右可达到 10 吉赫(10GHz, 1 吉赫 = 10^3 兆赫)或更高。上述数值举例表明, 进入 21 世纪, 微电子技术仍将高速发展。

二、信息技术发展是 ULSI 发展的推动力

人们容易看到微电子芯片一代代发展所推动的计算机、通信和消费电子产品的快速更新换代, 而忽视了正是这些电子信息产品的发展需要推动着 IC 技术的高速进展。当前, 要建立一条 8 英寸硅园片、0.5 ~ 0.35 微米的 ULSI 生产工艺线需要约 10 亿美元以上的投资, 这一投资必须在 3 ~ 5 年内收回, 因为 3 ~ 5 年后将用新一代技术。新一代的投资将不是 10 亿, 而或许是 20 亿美元。不仅如此, 在这 3 ~ 5 年内还必须投入更大(几十倍)的研究、开发资金, 才能保持技术领先。很显然, 如果没有蓬勃发展的市场需求, 这种几乎是无止境的连续投入是不可设想的, 而一旦投入减缓或终止, 技术进步也就停止了。技术进步促进市场需求, 市场需求推动技术进步, 这是当今社会技术发展的明显规律。

当前集成电路世界市场(包括一些半导体其它产品)约为 1500 亿美元, 预计 2010 年可达到 10000 亿美元以上, 更重要的是, 正是 IC 技术支撑着近 7 倍左右的电子工业市场和数十倍乃至百倍的信息产业市场。而又正是这些市场的驱动, 使人们有意愿不断地向微电子基础技术——ULSI 技术进行高额的科技和工业设施投入, 从而促成了 IC 技术发展的良性循环。

21 世纪初期信息技术发展的方向是多媒体(智能化)、网络化、个人化, 计算机、通信和消费电子的一体化(C³化)。这要求电子信息系统能获取、存储和处理容量更大的信息, 更精确、更高速地传输和处理这些信息, 并准确、实时地显示和应用这些信息。总结起来说, 以上这些对微电子芯片的要求是: 存储密度更高, 工作速度更快, 功能更强和功耗更小。我们可以扼要地把上述要求归结为: 把当前的

3G 指标推进到 21 世纪初期的 3T 指标($G=吉, T=太, 1T=10^3G$), 即, 存贮容量由 Gbit 计发展到 Tbit 计; 处理速率由 GOPS(每秒作吉次操作)计发展到 TOPS(每秒作太次操作)计; 传输速率则从 Gbps(每秒传输吉位数字信息)计发展到 Tbps(每秒传输太位信息)计。也就是说, 要把芯片的存贮容量、工作速度和传输能力(实现远距离光纤传输包括对光纤技术的要求)再提高千倍。这个指标, 和上节中我们对 ULSI 技术发展所作的推算结果是大致相符的, 表明至少在 21 世纪前期微电子技术的高速发展不仅是可能的而且是十分迫切需要的。

三、ULSI 发展的两个方向

ULSI 技术发展在 21 世纪有两个紧密联系的方向。其一是上面已提到的, 依靠加工特征线宽的不断缩小使集成密度、速度不断提高和功耗不断降低, 以制作出功能更强、性能更好、用途更广的 IC 芯片。当前工业大生产的特征线宽为 0.25 微米, 小批量试生产可达到 0.18 微米, 预计到 2010~2012 年可达到 0.07~0.04 微米, 相应的门电路延时则由今天的纳秒(ns)级进步到皮秒(ps)级。为了达到这个目标, 首要的技术问题是光刻精度问题。用当前的光学曝光技术, 通过不断缩短光源波长, 达到 0.18 微米似乎不成问题, 但要到 0.1 微米和亚 0.1 微米级, 大生产中将使用何种光刻机(超远紫外 O₃EVV, 电子束, X-射线)是尚待研究开发的问题。ULSI 中的连线技术是这个方向中的又一重要课题。ULSI 中互连线所占的芯片面积往往可达 70% 之多, 布线层也可达 5~7 层, 且因 RC 延时并不随尺寸比例的减小而改变, 逐使其对 IC 的重要性更为突出。为此, 多层布线和平面化技术、选用电导更高的金属连线材料、介电常数低的绝缘膜作布线层间隔离层介质等项新技术均需加速研究。器件结构的优化是实现 0.1 微米和亚 0.1 微米 ULSI 技术的一项重要研究课题, 这包括利用掺杂和源漏工程等技术扼制不利的二级效应; 发展独特的结构和充分利用速度过冲等效应以有利于提高器件的电流驱动能力和降低功耗等等。

ULSI 发展的另一个方向是系统芯片(System on a chip- SOC)。简单地说就是由今天的 IC(Integrated Circuit)发展为日后的 IS(Integrated System)。迄今为止, 我们接触到的微电子系统是基于多芯片集成的; 系统工程师根据系统的功能和性能选用多种 IC 芯片产品(也有定制一些专用集成电路——ASIC), 然后通过印刷电路(PCB)等办法加以集成为系统。这种多芯片技术, 随着系统功能和性能的日益提高, 将越来越不能满足要求。例如, 我们知道, 即使是光速, 通过 1 厘米距离其信号传输

延时也要超过 33 皮秒, 而我们今后要达到的高速电路延时为 1 皮秒量级。所以, SOC 技术是微电子的一个必然发展方向。

SOC 技术在 90 年代后期已受到广泛的重视。现在有 3 种方式可实现 SOC: 第一种是以 MPU 为核(Core)把一个系统所需要的存贮器、ADC、DAC、I/O 电路及其它功能块集成于一个芯片上去, 以组成系统芯片; 第二种是以 DSP(数字信号处理器)为核组成; 第三种则是直接根据系统算法设计制作系统芯片。这 3 种方式各有优缺点。第一种可利用现成的 MPU 及一系列现成的 IC 功能块库的资源, 组成的系统具有较大的灵活性, 可以通过一般编程应用于多种场合; 其缺点则是占用芯片面积大, 在专用场合其性能也难以达到最优化; 第二种方式, DSP 也有较多形式的模块库可资利用, 且因 DSP 中已安排了某些高速算法与 ULSI 结构相结合, 所以芯片利用率及某些特定应用的性能均高于第一种方式, 但其灵活性相应地也降低了, 且要有专门的排程技术; 第三种途径可以把特定系统的最优化算法与 ULSI 结构框架作最有效的结合, 可以用最小的器件和芯片成本达到最佳的性能, 不需排程序, 但失去了灵活性, 而且设计周期(Turn Around Time)较长。众所周知, 系统和 ULSI 设计方法学上的革新是 IC 向 IS 发展的灵魂, 是 SOC 进一步发展的关键。以已有的微电子系统为例, 在 CISC(复杂指令集计算机)时代要达到 IMOPS 的处理率, 大约要化费 10^6 个晶体管, 但用 RISC(精简指令集计算机)算法, 并把高速暂存存贮器和一些外围部件集成在一起实现 IS, 则用同样数量的晶体管可实现 1GOPS 的处理率; 进一步, 如采用专用 SOC 技术, 即充分地把优化算法与 ULSI 结构相结合, 为达到同样的 1GOP 处理速率只需几千个晶体管即可。

SOC 的发展对 ULSI 提出了许多研究课题: 多种工艺(如存贮器与逻辑 IC 工艺等)和多种电路(如数字电路与模拟电路)技术的兼容; 多层互连; 系统级及自上而下的设计工具(特别是系统设计人员、ULSI 结构和电路设计人员和工艺设计人员协同工作的环境与工具)的开发; 新的系统思想和 SOC 设计方法学等等。

四、两种极限及其突破

随着 ULSI 器件尺寸的不断缩小, 人们经常提出其极限问题, 即特征线宽的缩小和芯片集成度的提高到底有没有限制? 对 IC 级来说有两类“极限”, 一是工艺上的, 即工艺上再也达不到更窄的线宽, 主要是光刻精度的问题, 这一问题可用不断缩短曝光光源的波长, 乃至用带电或中性粒子(其德波洛伊波波长可以十分短)“曝光”方法使之不断向更高

精度推移, 现在尚不认为会构成限制性的基本因素; 另一方面, 由于集成器件的尺寸不断缩小, 一些物理效应将影响器件的正常工作, 最后使之失效, 这势将使当前以 CMOS 场效应晶体管为基础的 ULSI 技术达到其极限。但是对这一极限也要有一个动态的看法, 例如本来认为因为隧道电流及场致缺陷的原因, 人们预期 MOS 晶体管中的栅氧化层厚度将以 3nm 为其“极限”, 按比例缩小原则, 为避免二级效应这一“极限”, 将限定器件的最小尺寸; 但是最近的实验表明用 1.5nm 的栅 SiO₂ 仍可制作高性能的、微小的 MOS 晶体管, 从而把这一“极限”向前推进一大步; 进而如果我们成功采用更高介电常数的介质膜来替代 SiO₂, 这一“极限”将被进一步大大地向前推移。源漏两个 PN 结的穿通将最后导致器件不能工作, 这当然是 MOS 晶体管沟道缩小的最后限制, 也是今天人们把 ULSI 高速发展只推测到 2012 年的 0.04 ~ 0.05 微米的原因。即使对这一点, 随着技术的发展也是允许人们改变其看法的; 不久前这个限值还曾被公认为 0.07 微米。

但是无论如何, 到 21 世纪前叶 CMOS 为基础的 ULSI 技术的集成度终将接近其极限, 而由高速发展期进入成熟期。为此人们正在积极研究新一代的器件如量子器件、分子器件和功能器件等等, 以期有朝一日能替代 CMOS 晶体管, 发展新的 ULSI 微电子技术。这种努力当然是十分必须的。但硅基 CMOS ULSI 已达到如此成熟的程度, 毕竟已成为人类十分宝贵的技术资源, 真想要发展它的继承者, 必须进行长期的艰苦卓绝的奋斗。所以, 除非像 1949 年发明晶体管一样出现一种惊人的新发明, 这种取代并非易事。

我们认为随着 ULSI (CMOS 为基础) 的日益趋近成熟, 从系统级出发, 考虑当前以冯诺曼串行数值计算、数学模型驱动为基础的信息处理系统的处理能力的“极限”如何, 是有意义的。当 ULSI 的最高

性能限定后, 这类系统处理人类知识能力就是有限的。如果在智能处理系统的根本原理和结构上能有所突破, 用哪怕是已有的 ULSI 技术的能力, 也可望去解决难以想像的比今日复杂得多的问题。所以这一层次上的“极限”的研究更具有挑战意义。在这一方面, 上节中所提出的 SOC 技术似乎提供了一些线索。现今人们正在探索如何把神经网络技术、模糊决策论、混沌理论等一系列新的理论和其它脑科学和认知科学研究的一些新成果, 用于构造新一代知识处理系统芯片。这一类研究的成果必将导致系统的功能和性能大大提高, 有可能把微电子 ULSI 技术的利用效率提高到更高的水平。

五、结束语

微电子 ULSI 技术发展极为迅速。受到电子信息发展的强大推动, 21 世纪这种高速发展的趋势将会继续。以 CMOS 技术为基础的 ULSI 的发展存在一些基本限制因素, 当其接近到难于克服的极限时, 这一技术将进入发展的成熟期, 这种态势在 21 世纪前叶可能出现。有两种打破这种极限的解决前景, 一种是发明出新的原理的集成微电子器件, 产生全新一代的微电子技术; 但更有可能的是另一种前景, 即在成熟的极高水平的 CMOS ULSI 基础上, 沿着近年发展起来的系统芯片 (SOC) 的发展道路, 突破传统上基于当代计算机系统处理人类知识问题的能力极限, 创造出基于更新的原理和结构的系统芯片。

21 世纪人类将全面进入信息化社会, 对微电子信息技术和微电子 ULSI 基础技术将不断提出更高的发展要求, 微电子技术仍将继续是 21 世纪若干年代中最为重要的和最具有活力的高科技领域之一。

(责任编辑 蔡德诚)

科技动态

卢柯博士荣获 1998 年国际亚稳及纳米材料年会金质奖章

在 1998 年 12 月 6 日 ~ 12 日在澳大利亚悉尼召开的 1998 年国际亚稳及纳米材料年会 (ISMANAM) 上, 经该年会常务委员会评选, 将本年度 ISMANAM 金质奖章授予英国牛津大学材料科学与工程系主任 B. Cantor 教授和国家杰出青年科学基金获得者、中国科学院金属研究所卢柯博士, 以奖励他们在材料科学与工程领域的杰出贡献。

亚稳及纳米材料是当今材料科学与工程领域的研究热点, 也是 21 世纪新材料发展的主要方向, 它的发展

将极大地推动信息工业、能源工业及生物技术的发展。国际亚稳及纳米材料年会是世界各国亚稳及纳米材料领域的科学家研讨和交流该领域的最新成果和动态的重要国际会议。为鼓励和促进这一新兴材料学科的发展, 会议自 1995 年起每年在世界范围内评选两名 (一名老年学者和一名青年学者) 对该领域发展有杰出贡献的学者, 授予 ISMANAM 金质奖章。卢柯博士是中国第一位获此殊荣的学者。

(国家自然科学基金委供稿)