

系统集成技术的基础研究

钱圣巴* 刘恩德*

[摘要] 系统集成技术已成为当前电子技术发展的一个主要方向。本文介绍了系统集成技术的基本概念、主要内容和应用,指出系统集成技术的基础研究对发展我国微电子工业的重大意义。本文还介绍了该项研究作为国家自然科学基金会重大项目已取得的进展和成果。

1988年国家自然科学基金委员会资助的重大项目“系统集成技术的基础研究”,是一个很有发展前途的项目。承担单位是清华大学微电子所和北京大学计算机系。

集成电路是本世纪60年代初发展起来的新型电子器件。它是把若干有源或无源的元器件,连接在某种基片上,构成一个功能完整的整体电路。其中以在硅片上做的(硅基)的集成电路发展最为迅速,目前已能在小小的硅片上集成上百万个元器件。由于集成电路的发展,大大改变了电子器件的面貌,产生了质的飞跃。特别是,集成电路的发展为计算机技术的突破性发展开辟了道路,引起了一系列深刻的技术革命,推动了生产力向前发展。

当前集成电路的发展已出现两个明显的方向。其一,发展微细加工工艺技术,即光刻的线条越来越细,在芯片上集成的元器件越来越多,并在此基础上研制成超高集成度和超高速的集成电路。其重点是突破集成技术微细化过程中出现的各种技术障碍,包括工艺、器件和基本电路等一些技术上的创新。其二,利用已达到的工艺技术来发展各类专用电路、集成子系统或集成系统,并将其应用于信息技术和其它技术领域。这是从应用需要出发,重点发展专门应用的电路结构、设计方法和工具、以及相应的专门工艺。近几年来盛行的一些专业术语,如集成系统(SI)和应用专门电路(ASIC)等就是这方面发展的产物。

现今,微细加工工艺技术的发展大大超前于设计和应用技术,是半导体技术发展的一个明显的特点。集成电路的集成度已具有非常高的水平,每个芯片上能集成上百万个元器件,加工精度达到零点几个微米。但是高水平的工艺当前主要还仅用于随机存取存储器(RAM),远没有发挥其巨大潜力。故而,重要的是,如何充分发挥这一高集成度技术潜力,研究在芯片上“放”什么东西以及怎样“放”的问题,以构造出各式各样应用于信息领域和控制领域的子系统乃至系统,使其造福于人类,并把现在的社会真正推向信息化时代。

系统集成技术是实现上述任务的主要途径。系统集成就是把一个系统或子系统所需的元器件集成在一个芯片或几个芯片上。这样的系统以信号处理为主要目标。一般,从传感器接收模拟输入信号开始,对信息进行预处理(放大、滤波等);将模拟量转换成数字量(A/D转换),实时数字信息处理(DSP),然后将数字量转换成模拟量(D/A转换),直到输出所需的反

* 航空航天部七〇六研究所

馈信号,驱动和控制信息源,构成一个完整的闭环控制的实时信息处理系统。目前,对于这类系统,大多数还是用通用计算机,通过复杂的软件和相应的硬件器件来实现的,不仅体积庞大、价格昂贵、速度低,而且往往还做不到真正的实时控制。

当前还做不到(也不一定有必要)把上述整个实时信息处理系统集成到一个芯片上,而是根据需求和可能合理地定下几个界面,把一个系统划分成几个(如传感器、A/D转换器)子系统,然后把这一些子系统分别集成到少数几个芯片上。

概括地说,在超大规模集成电路技术基础上,系统集成技术可包括以下几个方面:

1. 把不同功能部件集成在一起的优化工艺;
2. 把能体现特定应用的算法与电路硬件结合在一起的部件电路结构;
3. 从系统出发的设计方法、工具和测试方法。
4. 相应的特殊要求的新电路单元、新部件和器件物理。

系统集成技术用途十分广泛,包括各种工业自动控制、多通道控制、雷达和声纳的高速信号处理、语音和图像处理、人工智能、机器人、气象探测、假肢控制以及与人民生活有关的各领域(如多指标抽血化验检测器)等,在航空、航天等军事领域也有着重要的应用前景。一些科学技术先进的国家对系统集成基础研究非常重视,发展非常迅速。例如,集成传感器的研究已经成为重要的专门技术方向,已经提出了一系列做应用专门电路(ASIC)的专门工艺,其中以双极互补金属氧化物半导体(BiCMOS)最为突出;流水线、并行处理、脉动阵列(Systolic)等体系结构结合高速算法的新电路结构设计方法大量出现,并已取得实际成果(16×16位乘法器,速度达到7.4毫微秒);多种高性能的专用处理器(如512×512非隔行扫描电视图象实时处理器)、识别孤立口语词汇词语的语音识别器以及用于视频数据流的二维示波器,均已出现。

二

面对集成电路的两个发展方向,我们国家应该怎么办?如何选择主攻方向?

我国的微细加工工艺比发达国家落后许多。国外已经有了亚微米的生产线,而我国最先进的只有2—3微米的生产线,与发达国家相比,差距正在逐渐加大。不用说赶超,就是跟踪也很难,还需要花大量外汇购置精密设备(而且只能买到比较过时的),还要建造超净厂房,制造各种新材料等,最终还是跟在别人后面跑。

而系统集成技术,它是在现有工艺基础上扩大应用成果,相对来说对工艺、设备等方面的要求比较低。就我国国情而言,发展系统集成技术可能更为合适一些,它可为我国集成电路工业的发展提供一个转机,扭转以往被动不利的局面。如项目选择得当,组织得力,在某些方面我们有可能较快地赶上甚至超过国外先进水平。

虽然系统集成技术的基础研究有着广阔的发展和应用前景,但它终究还是探索性、预研性、具有理论意义和潜在应用前景的基础性研究,一时难以取得明显的效益。因此,在短期行为比较盛行的前几年,没有得到资助,也未能列入“七五”科技攻关项目。只是在列为国家自然科学基金重大项目以后,才得以开展。

国家自然科学基金委员会把系统集成技术作为重大项目,给予高强度资助,是具有远见的。为了充分发挥国家自然科学基金的作用,更好地完成项目规定的任务,所选择的承担单位都具有较强的科技力量和较好的设备条件。如:

1. 国家已在清华大学微电子所和北京大学计算机系投入了大量的资金,建立了超大规模集成电路工艺线和计算机辅助设计(CAD)手段。国家科学基金即可用来作为项目开展的费用,开展研究工作。

2. 两个单位都有长期从事大规模集成电路研制工作的经验,在系统集成研究方面有坚实的理论和工艺基础。

3. 有专业配套、力量雄厚的科技队伍,并有很强的学科带头人,如李志坚和徐葭生教授。承担项目的总人数 33 人,其中高级人员 6 人,中级人员 17 人,初级人员 2 人,博士研究生 4 人,硕士研究生 4 人,包含系统、电路、工艺和测试等各方面的人才。

4. 在集成传感技术方面,清华大学擅长于新型压力传感器(硅片直接键合压力传感器)和 MOS 型传感器;而北京大学则在氧化锌传感器方面较有经验。两家联合工作可以取长补短,发挥各自长处。

三

“系统集成技术的基础研究”项目共分 4 个子项目:(1)硅集成传感器及器件物理基础研究;(2)兼容工艺技术;(3)阵列信息处理技术;(4)系统集成应用研究。至 1989 年底,各子项目的进展情况如下:

1. 硅集成传感器技术

(1) 成功地研制了新型硅盒结构单晶硅压力传感器,它全部采用单面加工,而且在完成了压力膜之后再行进行电子元件工艺加工,其工艺大大优于传统结构传感器,制造效率、精度和成品率相当高。该项成果申请了我国发明专利。

(2) 全面测定了金属氧化物半导体(MOS)型磁场传感器的特性,提出了优化的电流输出工作模式,这对在集成传感器中方便地实现 A/D 转换或频率输出是很有益的。

(3) 研制成了利用多晶硅压阻元件的多晶硅膜压力传感器,这种传感器结构在国内尚未见报道。所制成的压力传感器测到了一定的压敏特性。

(4) 完成了互补型金属氧化物半导体(CMOS)型温度传感器、 4×4 触觉传感器阵列、频率输出的集成硅压力传感器和集成阵列式磁场等四种传感器的设计。在这些设计中包含了片内自动调零、校准、阵列式传感及电流/频率变换等信号处理新技术。这些技术对未来的集成传感器或集成传感子系统都是重要的信息处理加工技术。

(5) 北京大学进行了反应溅射氧化锌(ZnO)薄膜特性研究。为了获得优质的氧化锌薄膜以制备氧化锌压力传感器,着重研究了氧化锌薄膜特性及其与制备工艺的关系,采用改装的磁控 S 枪溅射系统,以高纯金属锌为靶,能较好地获得优质氧化锌薄膜。

2. 器件物理基础研究

按照任务书的要求,器件物理基础研究包括传感器机理和基本的 MOS 物理两个方面。侧重提高传感器性能为开辟新的传感方式服务;弄清基本的物理现象与规律。至 1989 年底,已完成的工作有:

(1) 研究并评价了 MOS 晶体管的压敏特性;

(2) 全面测定了 MOS 型磁敏晶体管的特性,解释了分裂漏极横向电导的机理;

(3) 研究了不同结构下硅膜中的热应力;

(4) 研究了低温下界面态对 MOS 晶体管特性的影响;

(5) 用电荷法研究了极低温(20mK)强磁场下 MOS 反型层中朗道能级的态密度、迁移率以及局域化等问题。

根据以上所列,可以认为,已经提前完成了项目中器件物理部分的研究任务。

3. 兼容工艺研究

CMOS 电路以其高密度、低功耗等优点成为当前超大规模集成技术的主流。但与双极电路的某些性能相比,有失调大、噪音大、电流驱动差等不足。若将 CMOS 和双极电路集成在同一芯片上,成为双极-互补金属氧化物半导体(BiCMOS),无疑是比较理想的,也是当前公认比较有前途的先进工艺方案。

根据系统集成的需要,确定 BiCMOS 有两个主要应用目标:(1)高速数字处理。用双极来弥补 MOS 器件对大负载电容驱动能力的不足;(2)数字和模拟混合电路。系统集成中有不少模拟电路,用双极电路有较好的模拟特性(跨导大、失调小、噪声低)来实现优化的数模混合。

本工作分为两个方案:(1)清华大学微电子所针对高速数字电路,采用双阱、双埋层、外延纵向双极方案。1988 年进行工艺模拟设计得到了工艺流程,接着在版图设计后制得的掩膜版基础上进行了投片流水,共投两批,均流水到底。制出了性能良好的 CMOS 器件和双极器件,以及 BiCMOS 门电路,所得结果显示了 BiCMOS 工艺的优越性。(2)采用 P 阱横向双极方案,与瑞士电子学及微电子中心(CSEM)合作进行。该方案的计算机模拟结果与实验结果吻合较好。利用这种横向双极器件,只需要 CMOS 工艺而无需专门的 BiCMOS 工艺,比较适合我国工艺相对落后的状况。

4. 阵列信息处理技术

两年来完成了智能机器人的手臂自动控制中正向运动学运算(DKS)及雅可比算法的信息处理器结构设计,利用行为功能模拟语言软件以及手工模拟,完成了三种结构方案的对比,最后选择了一维脉动阵列信息处理器结构,并对部分结构进行了行为功能级模拟。为配合上述算法的信息处理的三角函数处理器及排序逻辑电路,对其进行了全部逻辑设计及时序逻辑模拟。逻辑时序模拟结果达到了预期的设计指标;完成了图象识别中大量使用的卷积处理器的结构设计,进行了部分行为功能级模拟。初步证明该方案是可行的,可以使用硬件实现实时图象处理。

对乘法器进行了较深入的探讨,针对累加器中的超前进位加法器(CLA)的设计方法,进行了较深入的探索,为今后改进 CLA 设计打下了一定基础。

为配合快速阵列信息处理器的设计研究,开展了易测性及容错研究,开发了相应的软件,并在硬件上进行了仿真,提出了初步的容错设计方案。

5. 系统集成应用研究

(1) 探空仪专用集成电路。已做出的探空仪芯片包括信号采集、处理、发送(执行)等部分,是一个实用的子系统。用此集成电路配以热敏和湿敏传感器,能完成高空温度和湿度测量。经试用表明,电性能好,工作可靠,功耗低,而且使探空仪简化,成本降低,完全可以替代我国气象部门目前仍沿用的 50 年代研制的机械变型式探空仪,具有重大的经济意义。用该集成电路装配出的实用批量样机(TC-1 型集成气象探空仪)参加了 1989 年在苏联举办的国际探空仪评比,获得好评,其主要性能已超过美苏产品,仅次于芬兰。

(2) 一度假肢控制系统集成化研究。这是实时处理系统集成中的一个示范性应用,集成片采用 CMOS 工艺。1988 年开展可行性论证、初步方案选择、具体设计和制版。1989 年的第一阶段进行基本单元电路元件的实验及选择,工艺流程的设定探索;第二阶段改进基本单元电路,实测功能电路可行性,进一步完善工艺流程;第三阶段为集成电路的试用性模拟测试,版图设计、工艺流程再度完善、工艺流水。因部分工艺出现故障,估计 1990 年上半年方可完成。这项工作对改善残疾人生活和工作能力很有意义。

(3) CMOS 电流型多值逻辑电路。集成多值逻辑电路具有封装密度高、布线简单等突出特点,而且其逻辑更接近于人类的思维逻辑,所以在智能系统、机器人控制等方面的应用具有很大潜力。清华大学微电子研究所从多值组合逻辑出发,组成各种完备的功能电路和系统,结构简单、功耗低、逻辑数高(10 值),在国际上处于领先地位,已向国家专利局申请发明专利。

完成了一个 8 值 3 位,等价于 2 值 9 位包括 $2 \rightarrow 8$ 和 $8 \rightarrow 2$ 变换的乘法器的设计及部分单元电路试制,并对各单元电路进行模拟。以此为基础对 11×11 位八值乘法器(相当于二值 33×33 位)的乘法时延进行估算,其乘法时间为 68ns,与最快的 32×32 位二值乘法器 56ns 时延相比,两者基本相当,而电路所需管子数仅为二值的 $1/4$ 左右。

另外,还设计出了一个用于实验机械手实时控制的模糊系统芯片,经过模拟取得满意的结果。与此同时,多值逻辑用的器件及单元电路和工艺研究也取得了进展。

四

当前我国半导体工业处于比较困难的境地,面对国际上集成电路技术日新月异的发展,差距越来越大。系统集成技术的研究与发展,有可能为我国半导体工业提供一个转机,扭转被动局面。如国家继续给予重视和支持很有可能在某些方面走出有中国特色的路子,较快地赶上或超过国际先进水平。

BASIC RESEARCH OF SYSTEM-INTEGRATION TECHNOLOGY

Qian Shengsi and Liu Ende

(Institute 706 of Ministry of Aerospace Industry)

Abstract

This paper describes the basic concepts, main contents and applications of System-Integration Technology which have been considered as one of main directions in modern development of microelectronic technology. Authors point out it is very correct and necessary that the basic research of system-integration technology was subsidized as a major project by the National Natural Science Foundation, and especially its significance in the development of microelectronic industry in our country. The next half parts mainly reports the advances and the first fruits in each sub-projects of this basic research.