

WEIDIANZI JISHU GAILUN

# 微电子技术概论

常青 陶华敏 肖山竹 卢焕章 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 微电子技术概论

常青 陶华敏 肖山竹 卢焕章 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书从微电子技术的发展历程与发展特点入手,系统地介绍了作为信息社会基石的微电子技术的基本概念与关键技术。内容涵盖集成器件物理基础、集成电路制造工艺、集成电路设计方法、IC-CAD 技术和集成电路的测试与封装等多个方面。

本书内容系统,选材先进。既有对微电子器件与工艺的一般介绍,又有对微电子设计技术的深入论述。本书可作为非微电子专业电子与电气类本科生的教材与参考书,也可以作为各类高级技术和管理人士学习微电子技术的入门参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

微电子技术概论 / 常青等编著. —北京:国防工业出版社, 2006.3

ISBN 7-118-04373-7

I. 微... II. 常... III. 微电子技术 - 概论  
IV. TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 014662 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 12 字数 271 千字

2006 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 20.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

从 1958 年美国得州仪器公司的杰克·基尔比(Jack Kilby)发明世界上第一块集成电路以来,微电子技术以令人震惊的速度飞速发展。它推动着计算机、通信和消费类电子产品的不断更新换代,给各行各业带来了革命性的变化。微电子技术作为现代信息技术革命的基础,其发展对整个信息产业乃至国家经济、国防安全都具有极其重要的影响。

微电子技术经过 40 多年的发展,目前已进入巨大规模(GSI)集成时代。技术的进步使我们完全可以将一个复杂的系统集成在一块芯片上(System On a Chip,SOC)。这种芯片通常是针对特定应用而专门设计与制作的,是一种专用集成电路(Application Specific Integrated Circuits,ASIC)。采用专用集成电路来实现系统集成具有如下几个方面的优点:(1)可以提高系统的性能与可靠性;(2)可使系统更加小型化和低功耗;(3)可以增强保密性——电子产品中的 ASIC 芯片对用户来说相当于一个“黑盒子”,难于仿造;(4)用一块 ASIC 可替代多块标准通用 IC,因而可大大降低系统成本。由于具有上述优点,近年来许多电子设备和系统公司纷纷投入大量人力和物力设计自己的 ASIC,用于公司的新产品,形成了一股应用专用集成电路提升产品竞争力的技术进步潮流。在这种形势下,集成电路的研制不再是少数几个半导体厂家的专利,越来越多的电路与系统设计工程师正在参与到 ASIC 的设计与开发中去。这就要求他们除了掌握原有的电路与系统方面的知识外,还需要了解关于集成电路中的器件特性、工艺过程、设计原则和设计方法等方面的知识。本书正是针对这种需求而专门编写的。

作者所在的国防科技大学电子科学与工程学院从 1999 年开始在非微电子专业的本科生中开设“微电子学概论”课,受到广大学生的普遍欢迎,收到了很好的效果。经过多年的教学实践,针对非微电子专业本科生的知识背景和兴趣特点,我们编写了本教材。全书共分为 6 章,分别介绍集成器件物理基础、集成电路制造工艺、集成电路设计、IC-CAD 技术和集成电路的测试与封装。在内容的组织上,既考虑到微电子学学科知识的完整与系统性,又考虑到电子与电气类学生整个课程体系结构的特点,避免与前面学过的课程重复。力求使学生通过本教材的学习,对微电子技术有一个比较全面的了解,同时为他们走向社会,参与先进电子系统设计和电子产品开发打下良好的基础。

本书由常青、陶华敏、肖山竹、卢焕章编写。常青教授任主编并编写了第 1、4、5 章,陶华敏副教授编写第 2、3 章,肖山竹讲师编写第 6 章,卢焕章教授负责全书的审定。在本书

的编写过程中,得到了国防工业出版社郑廷编辑和其他同志的大力帮助,课题组的研究生陈尚锋、商凯、赵泽才、王鸿兴、张志民、张春生、张望等也帮助整理了许多资料,在此作者一并向他们表示衷心感谢。

本书的编写参考和引用了大量同行专家的著作及研究成果(见各章后的参考资料),作者在此特向他们致以深深的谢意。

微电子技术是一门正在蓬勃发展的高技术,内容十分广泛,技术更新迅速。由于作者学识水平有限,加之时间仓促,书中难免存在错误与不足,恳请读者批评指正。

作 者

2005年12月于国防科技大学

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 微电子技术的发展历程 .....	1
1.2 集成电路的分类 .....	3
1.3 微电子技术的发展特点与发展趋势 .....	5
参考文献 .....	10
<b>第 2 章 集成电路中的半导体器件</b> .....	11
2.1 半导体的特性.....	11
2.1.1 半导体及其能带模型.....	11
2.1.2 半导体的导电性.....	14
2.2 PN 结和晶体二极管 .....	20
2.2.1 平衡状态下的 PN 结 .....	20
2.2.2 PN 结及晶体二极管的特性 .....	22
2.2.3 金属-半导体结.....	27
2.3 双极型晶体管.....	28
2.3.1 双极型晶体管的结构.....	29
2.3.2 双极型晶体管的工作原理.....	29
2.3.3 双极型晶体管的工作特性.....	31
2.3.4 异质结双极型晶体管(HBT) .....	36
2.4 MOS 场效应晶体管 .....	36
2.4.1 MOS 场效应晶体管的结构 .....	37
2.4.2 MOS 场效应晶体管的工作原理 .....	38
2.4.3 MOS 场效应晶体管的工作特性 .....	40
2.4.4 MOS 场效应管(MOSFET)与双极型晶体管(BJT)的比较 .....	43
2.5 集成电路中的无源元件.....	43
2.5.1 集成电路中的电阻.....	43
2.5.2 集成电路中的电容.....	45
参考文献 .....	46
<b>第 3 章 集成电路制造技术</b> .....	47
3.1 集成电路的制造过程.....	47

3.1.1	晶片制备	47
3.1.2	掩模板制备	49
3.1.3	晶片加工	51
3.2	硅平面工艺的基础工艺	52
3.2.1	氧化工艺	52
3.2.2	扩散掺杂工艺	54
3.2.3	离子注入技术	58
3.2.4	光刻工艺	60
3.2.5	薄膜淀积技术	64
3.3	集成电路的制造工艺	67
3.3.1	集成电路的隔离	67
3.3.2	双极型集成电路的工艺集成	70
3.3.3	CMOS 集成电路的工艺集成	72
3.3.4	BiCMOS 的工艺集成	75
3.3.5	金属化与多层互连	76
	参考文献	79
<b>第4章</b>	<b>IC 基本单元电路与版图设计</b>	<b>80</b>
4.1	数字 IC 的基本电路	80
4.1.1	TTL 电路	80
4.1.2	ECL 电路	83
4.1.3	MOS 电路	84
4.2	CMOS 基本逻辑电路	85
4.2.1	CMOS 反相器	85
4.2.2	CMOS 传输门	90
4.2.3	CMOS 与非门、或非门	92
4.2.4	复合门、异或门	93
4.2.5	锁存器与触发器	94
4.3	CMOS 版图设计	96
4.3.1	设计规则	97
4.3.2	基本单元的版图	101
4.3.3	层次化版图设计方法	106
4.4	等比例缩小规则	108
	参考文献	111
<b>第5章</b>	<b>VLSI 设计与 CAD</b>	<b>112</b>
5.1	VLSI 设计流程	112

5.2 ASIC 设计方法 .....	114
5.2.1 ASIC 设计的一般概念 .....	114
5.2.2 门阵列 ASIC 设计 .....	115
5.2.3 标准单元设计法 .....	119
5.2.4 可编程 ASIC 设计 .....	121
5.3 IC - CAD 技术 .....	132
5.3.1 采用 CAD 技术的必要性 .....	132
5.3.2 IC - CAD 系统 .....	133
5.4 硬件描述语言 .....	134
5.4.1 Verilog HDL 的基本结构 .....	134
5.4.2 数据流描述方式 .....	136
5.4.3 行为描述方式 .....	137
5.4.4 结构描述方式 .....	139
5.4.5 Verilog HDL 仿真与综合 .....	141
5.5 逻辑综合 .....	143
5.5.1 逻辑综合流程 .....	144
5.5.2 逻辑综合示例 .....	146
5.5.3 可综合描述 .....	148
5.6 逻辑模拟与电路模拟 .....	152
5.6.1 逻辑模拟的基本概念 .....	152
5.6.2 逻辑模拟模型 .....	153
5.6.3 逻辑模拟算法 .....	155
5.6.4 电路模拟 .....	157
参考文献 .....	160
<b>第 6 章 集成电路的测试与封装</b> .....	<b>162</b>
6.1 集成电路测试的一般概念 .....	162
6.1.1 集成电路测试的主要类型 .....	162
6.1.2 集成电路制造中的测试过程 .....	163
6.2 故障模型与测试向量的设计 .....	165
6.2.1 故障模型 .....	165
6.2.2 测试向量的生成 .....	166
6.3 可测性设计 .....	168
6.3.1 扫描路径法 .....	168
6.3.2 内建自测试 .....	169
6.3.3 边界扫描测试 .....	169



6.4 集成电路的封装 .....	171
6.4.1 集成电路封装的作用 .....	171
6.4.2 封装的工艺流程 .....	172
6.4.3 集成电路封装的主要类型 .....	175
6.4.4 集成电路封装的发展趋势 .....	177
6.5 MCM——未来集成电路封装的重要发展方向 .....	178
6.5.1 MCM 的特性 .....	178
6.5.2 MCM 的封装技术 .....	179
6.5.3 MCM 的应用 .....	180
6.6 集成电路封装的选择 .....	181
6.6.1 选择封装形式的主要依据 .....	181
6.6.2 封装的热学问题 .....	182
参考文献 .....	183

# 第 1 章 绪 论

人们常说的“微电子”是“微型电子线路”的简称。而微电子学则是研究在固体(主要是半导体)材料上构成微型化电路与系统的电子学分支,其主要研究对象是集成电路(Integrated Circuit)与集成系统。在微电子学中,空间尺度通常是以微米( $\mu\text{m}$ ,  $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$ )和纳米( $\text{nm}$ ,  $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ )为单位的。

微电子学是信息科学的重要基础学科。它研究信息获取、传输、存储与处理的微型化实现,是研究信息载体的科学,构成信息科学的基石。微电子技术的发展水平直接影响整个信息技术的发展,其产业规模是一个国家经济实力的重要标志。

微电子学又是一门综合性很强的学科。其研究内容包括半导体器件物理、集成电路制造工艺、集成电路及系统的设计与测试等多个方面。涉及固体物理学、量子力学、热力学与统计物理学、材料科学、电子线路、信号处理、计算机辅助设计、测试与加工、图论、化学等多个领域。

本章介绍微电子技术的发展简况、基本概念与发展趋势,以使读者对微电子技术有一个基本而全面的了解。

## 1.1 微电子技术的发展历程

现代微电子技术的伟大成就,来源于 20 世纪 40 年代对半导体导电理论的深入认识,40 年代末半导体晶体管的发明,50 年代末硅平面工艺的发展与成熟,以及 60 年代 MOS 工艺走向实用化等一系列微电子技术的重要基础。

早在 1900 年前后,人们就发现了一类具有整流性能的半导体材料,并且成功地用金属丝与这些自然晶体的矿石接触作为检波器。但是由于性能不够稳定,到 1904 年真空三极管出现后,矿石检波器很快被淘汰。直到 20 世纪 30 年代,由于微波技术的发展,为了适应超高频波段的检波要求,半导体材料又重新引起人们的注意,并制造出了锗、硅微波二极管。

第二次世界大战以后,在美国贝尔实验室,由威廉·肖克莱(William Shockley)领导的一个小组开展了对固体学的研究。1947 年 12 月,研究小组的约翰·巴丁(John Bardeen)和沃尔特·布拉顿(Walter Brattain)在研究半导体材料锗的表面态过程中,“偶然”地发现了“晶体管效应”,并发明了第一个点接触型晶体管。由于当时工艺条件的限制,这种点接触型晶体管的性能较差,且不稳定。1948 年初,威廉·肖克莱提出了结型晶体管理论,并于 1950 年成功地制造出了结型晶体管。与点接触型晶体管相比,结型晶体管具有结构简单、性能好、可靠性高等优点,并且特别适合于大批量生产,因此很快得到广泛应用。在此后的发展过程中,虽然出现了各种不同结构形式的晶体管,但双极晶体管的理论并未发生根本变化。

巴丁、布拉顿和肖克莱由于在晶体管研究中的突出贡献,共同荣获了 1956 年诺贝尔物理学奖。

晶体管发明以后不到 5 年,英国皇家雷达研究所的 G. W. A. Dummer,于 1952 年 5 月在美国工程师协会举办的一次座谈会上发表的论文中第一次提出了关于集成电路的设想。文中说到:“可以想象,随着晶体管和一般半导体工业的发展,电子设备可以在一个固体块上实现,而不需要连线。这种固体块可以由绝缘体、导体、整流、放大等材料层组成。”又经过 5 年多的实践,随着工艺水平的提高,美国德克萨斯仪器公司的杰克·基尔比(Jack Kilby)于 1958 年 9 月发明了世界上第一块集成电路,并于 1959 年公布了这一成果。图 1.1 是基尔比申请的集成电路专利,它包括 2 个晶体管和 8 个电阻。

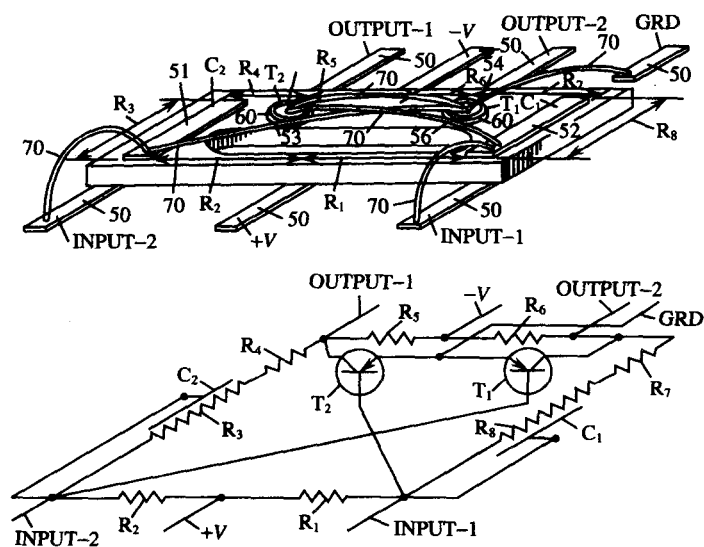


图 1.1 Kilby 的专利(美国专利号 3138743)

集成电路的发明开创了集有源器件与某些元件于一体的新局面,使传统的电子器件概念发生了质的变化。这种新型的封装好的器件不仅体积和功耗都很小,且具有独立的电路功能。集成电路的发明使电子学进入微电子学时代,是电子学发展的一次重大飞跃。

集成电路的发明者杰克·基尔比于 2000 年获得诺贝尔物理学奖。

早期研制的集成电路都是双极型的。1960 年以后出现了采用 MOS(Metal-Oxide-Semiconductor)结构和工艺的集成电路。实际上,早在 1930 年,德国科学家就提出了关于 MOS 场效应晶体管的概念和具体实现方案,但由于材料和工艺水平的限制,直到 1960 年才制成实用的 MOS 场效应晶体管,从此 MOS 集成电路得到了迅速发展。

双极和 MOS 集成电路一直处于相互竞争、相互促进、共同发展的状态。但由于 MOS 集成电路具有功耗低、适合于大规模集成等优点,它在整个集成电路领域占的份额越来越大,现在已成为集成电路领域的主流。虽然双极集成电路在总份额当中占的比例在减小,但它的绝对份额依然在增加,它在一些应用中也不会被 MOS 集成电路所替代。

在集成电路界,人们常用半导体存储器电路来反映集成电路的发展水平。表 1.1 给出 1970 年—2001 年半导体动态存储器(DRAM)的发展年表。由表可以看出,随着工艺

水平的进步,集成电路的特征尺寸——在设计和生产中可达到的最小线宽在逐年减小,与此相对应,单个芯片上集成的元件数迅速增加。一般认为,1969年美国英特尔公司研制成1024位(简称1Kb)随机存储器(RAM),标志着大规模集成电路的出现。1978年64Kb RAM的研制成功则标志着IC的发展已进入了超大规模集成的时代。

表 1.1 DRAM 发展年表

发布年代	存储容量	元件数/个	特征尺寸/ $\mu\text{m}$
1970	1Kb	$5.2 \times 10^3$	8.0
1973	4Kb	$1.8 \times 10^4$	5.0
1975	16Kb	$3.6 \times 10^4$	3.0
1979	64Kb	$1.4 \times 10^5$	2.0
1982	256Kb	$5.4 \times 10^5$	1.5
1985	1Mb	$2.3 \times 10^6$	1.0
1988	4Mb	$8.5 \times 10^6$	0.8
1990	16Mb	$3.4 \times 10^7$	0.6
1994	64Mb	$1.4 \times 10^8$	0.35
1996	256Mb	$5.6 \times 10^8$	0.25
1999	1Gb	$2.2 \times 10^9$	0.18
2001	2Gb	$4.4 \times 10^9$	0.15

## 1.2 集成电路的分类

集成电路应用范围广泛,门类繁多,其分类方法也多种多样。本节介绍几种常见的集成电路分类方法。

### 1. 按有源器件的类型分类

根据集成电路中有源器件的结构类型和工艺技术可将集成电路分为3类,它们分别是双极型集成电路、MOS集成电路和BiMOS集成电路。

(1) 双极型集成电路。它是半导体集成电路中最早出现的电路形式。1958年诞生的世界上第一块集成电路就是双极型的。这种集成电路采用的有源器件是双极晶体管,而双极晶体管中有两类载流子(电子和空穴)参与导电,因此这类电路被称做双极电路。在双极集成电路中,根据晶体管类型的不同还可以进一步细分为NPN型和PNP型。

双极集成电路的优点是速度高,驱动能力强;缺点是功耗较大,集成度相对较低。

(2) MOS集成电路。MOS是金属—氧化物—半导体的英文缩写。MOS集成电路中采用场效应晶体管作为有源器件。MOS晶体管主要靠半导体表面电场感应产生的沟道来导电,工作时只有一种载流子(电子或空穴)起主导作用。根据MOS晶体管类型的不同,MOS集成电路又可以分为NMOS、PMOS和CMOS(互补MOS)集成电路。

与双极集成电路相比,MOS集成电路的主要优点是:功耗小、集成度高、输入阻抗高、抗干扰能力强。因此,进入超大规模集成电路时代后,MOS,特别是CMOS集成电路成为

集成电路的主流。

(3) BiMOS 集成电路。芯片上同时包含双极晶体管和 MOS 晶体管两种有源器件。BiMOS 集成电路综合了双极和 MOS 集成电路的优点,但其制造工艺比较复杂,成本较高。

## 2. 按集成电路规模分类

一个集成电路芯片中包含的元器件数目称集成度。在最近的 40 多年里,集成电路的集成度迅速提高,经历了小规模 (SSI)、中规模 (MSI)、大规模 (LSI)、超大规模 (VLSI)、特大规模 (ULSI) 阶段,目前正开始进入巨大规模 (GSI) 阶段。各阶段的集成度见表 1.2。注意,对不同类型的集成电路,划分的标准有所不同。此外,不同国家采用的标准并不一致。表 1.2 给出的是一种常被采用的标准。

表 1.2 集成电路按规模分类

类别	数字集成电路		模拟集成电路	类别	数字集成电路		模拟集成电路
	MOS IC	双极 IC			MOS IC	双极 IC	
SSI	$< 10^2$	$< 100$	$< 30$	VLSI	$10^5 \sim 10^7$	$> 2000$	$> 300$
MSI	$10^2 \sim 10^3$	$100 \sim 500$	$30 \sim 100$	ULSI	$10^7 \sim 10^9$		
LSI	$10^3 \sim 10^5$	$500 \sim 2000$	$100 \sim 300$	GSI	$> 10^9$		

## 3. 按电路功能分类

根据集成电路的功能不同可将它分为 3 类,即数字集成电路、模拟集成电路和数模混合集成电路。

(1) 数字集成电路。是处理数字信号的集成电路,即采用二进制方式进行数字计算和逻辑函数运算的一类集成电路。由于这些电路都具有某种特定的逻辑功能,因此它也被称为逻辑电路。例如各种门电路、触发器、计数器、存储器等。

(2) 模拟集成电路。指对模拟信号(即连续变化的信号)进行放大、转换、调制运算等处理的一类集成电路。由于早期的模拟集成电路主要是用于线性放大的电路,因此当时又称其为线性集成电路。但目前许多模拟集成电路已用于非线性情况。常见的模拟集成电路有各种运算放大器、集成稳压电源、各种模/数(A/D)和数/模(D/A)转换电路等。

(3) 数模混合集成电路。指在一个芯片上同时包含数字电路和模拟电路的集成电路。

## 4. 按结构形式分类

按照集成电路的结构形式可将其分为半导体单片集成电路和混合集成电路。

(1) 单片集成电路。是指电路中所有的元器件都制作在同一块半导体基片上的集成电路。这是最常见的一种集成电路。通常,在不加任何修饰词的情况下提到的集成电路就是指这类集成电路。在半导体集成电路中最常用的半导体材料是硅。到 20 世纪 80 年代中期,以砷化镓(GaAs)为材料的集成电路开始成熟,这类集成电路可工作在微波频段,常称为单片微波集成电路(MMIC)。

(2) 混合集成电路。是指将多个半导体集成电路芯片或半导体集成电路芯片与各种分立元器件通过一定的工艺进行二次集成,最后封装在一个管壳中的集成电路。在混合集成电路中,主要由片式无源元件(电阻、电容、电感、电位器等)、半导体芯片(集成电路、

晶体管等)、带有互连金属化层的绝缘基板(玻璃、陶瓷等)以及封装管壳组成。

根据制作混合集成电路时所采用的工艺,还可以将它分为厚膜和薄膜混合集成电路。

在厚膜集成电路中,需要采用厚膜工艺在陶瓷板上制作电阻和互连线。厚膜工艺采用的主要材料是各种浆料,如氧化钡—银等电阻浆料、金或铜等金属浆料以及作为隔离介质的玻璃浆料等。各种浆料通过丝网印刷的方法涂敷到基板上,形成电阻或互连线图形。图形的形状、尺寸和精度主要由丝网掩膜决定。每次完成浆料印刷后要进行干燥和烧结。

薄膜集成电路是指利用薄膜工艺(薄膜的厚度一般小于 $1\mu\text{m}$ )制作电阻、电容元件和金属互连线。它采用的工艺主要有真空蒸发、溅射等。各种薄膜的图形通常采用光刻、腐蚀等工序实现。

### 5. 按应用性质分类

按应用性质可把集成电路分为通用集成电路和专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)。通用集成电路主要指各种标准逻辑电路、通用存储器和微处理器等;专用集成电路则是指面向专门用途的集成电路。

专用集成电路 ASIC 是 20 世纪 80 年代中期出现的一个术语。按字面意义来理解,凡是用于某一类专用系统的电路都可以称为 ASIC,而不管它卖给单个用户还是多个用户。但目前对 ASIC 有一种狭义的理解,即 ASIC 被认为是针对特定用户专门研制的集成电路(Customer Specific IC)。且这类集成电路通常是由用户参与设计的。

在世界集成电路供应商可提供的标准产品多达成千上万个品种的情况下,为什么还要去开发 ASIC 电路呢?原因主要有以下两个方面:

(1) 虽然通用的、标准的集成电路很多,但它们并不能完全满足电子系统日新月异的变化要求。各个电子产品的开发商都希望推出具有特色、个性的产品,加快产品更新,维护产品的保密性,使产品具有竞争力,而专门研制的 ASIC 正好能达到这种要求。

(2) 对某一具体应用来讲,采用一块 ASIC 可能替代多块标准 IC,因而可大大降低电子系统的成本。与此同时还可以使系统更加小型化和低功耗。

正是由于以上两个方面的原因,很多电子设备和系统公司投入大量人力、物力设计自己的 ASIC 来用于公司的新产品。这就是为什么现在有如此多的人对集成电路设计感兴趣的原因之一。

ASIC 的设计方法可以有多种,主要包括门阵列法、标准单元法和可编程逻辑器件设计法等,这些方法将在第 5 章中详细介绍。

## 1.3 微电子技术的发展特点与发展趋势

从 1959 年第一块半导体集成电路问世到现在的 40 多年里,微电子技术得到了迅速发展。今天,人们已能把数以亿计的晶体管集成在一个芯片上,半导体集成电路也由早期的单元集成、部件电路集成,发展到子系统、系统集成。回顾过去 40 年的发展历程,我们发现微电子技术的发展具有如下特点。

### 1. 微电子技术是一门高速发展的技术

1965 年,美国英特尔公司的戈顿·摩尔(Gordon Moore)通过对过去数年来集成电路发展情况的总结,提出了著名的摩尔定律,即集成电路芯片的集成度每 3 年提高 4 倍,加

工的特征尺寸缩小为  $1/\sqrt{2}$ 。摩尔定律的提出虽然已有 40 年了,但目前集成电路的发展仍然基本符合这一规律。表 1.3 给出了 1971 年—2002 年微处理器的发展年表。由该表可以看出其集成度几十年来一直按指数规律增长。由于集成度的提高,单片 IC 的功能不断增加,芯片上单位功能成本下降,推动了电子产品更新换代,进而进一步推动了整个电子工业的发展。几十年来,世界集成电路产业的产值一直以大于 13% 的年增长率持续增长,它是现代工业史上唯一有如此高速增长的行业。集成电路工业创造了现代工业史上的一个奇迹。

表 1.3 微处理器发展年表

发布年代	型 号	晶体管数/个	特征尺寸/ $\mu\text{m}$
1971	4004	2250	8.0
1972	8008	3000	8.0
1974	8080	4500	6.0
1976	8085	7000	4.0
1978	8086	29000	4.0
1982	80286	134000	1.5
1985	80386	275000	1.5
1989	80486	1200000	1.0
1993	Pentium	3100000	0.8
1995	Pentium Pro	5500000	0.6
1997	Pentium II	7500000	0.35
1999	Pentium III	24000000	0.25
2000	Pentium IV	42000000	0.18
2002	Pentium IV	55000000	0.13

## 2. 集成电路产品沿着“标准化”与“定制化”方向交替发展

20 世纪 80 年代末,日本人牧本次生(Tsugio Makimoto)在研究半导体产业技术特征时发现,半导体产业有一个循环往复的变化规律,即在“定制化”和“标准化”之间大约每 10 年周期性轮换一次,如图 1.2 所示。这一规律被英国《电子学周刊》称为牧本浪潮(Makimoto's Wave)。

如图 1.2 所示,1957 年—1967 年是晶体管时代,由于绝大多数晶体管分立器件是标准化和可以互换的,出现了第一个标准化周期。此后的 1967 年—1977 年为定制 LSI 时代。集成电路自 1959 年问世后,经过几年的培育,于 1967 年开始发力占领市场。这期间的集成电路是为专门的应用,如电子计算器量身定制的,从而开启了第一个“定制化”周期。1977 年—1987 年是存储器与微处理器时代。英特尔公司发明了微处理器并于 1971 年上市,把微处理器与存储器的特性相结合带来了系统设计的灵活性,开创了第二个标准化周期。1987 年—1997 年为 ASIC 时代。在此期间专用集成电路产品开始兴起,成为集成电路市场的重要组成部分,引发了第二个定制化周期。再往后的 10 年,也即 1997 年—2007 年被称为现场可编程时代。这一时期市场上的主导电子产品逐渐从 PC 转向数字消费类产品,市场结构发生变化,特别要求缩短产品的上市时间。现场可编程产品(如现场

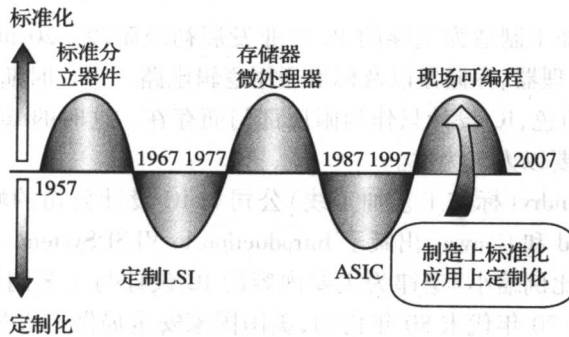


图 1.2 牧本浪潮

可编程门阵列 (FPGA) 正是适应这样要求而出现的产物。它经过了大约 10 年的市场培育期,终于超过了门阵列电路,开始了新一轮的“标准化”周期。从 2007 年开始的下一波浪潮,图中虽未给出,但牧本认为,它将是 SOC (System On a Chip) 和 SIP (Silicon In Package) 时代,但现场可编程特性仍是其中关键的一环。

集成电路产业在“标准化”和“定制化”之间来回摆动的原因是存在各种相互制约的因素。可以设想有一个如图 1.3 所示的“半导体之摆”(Semiconduction Pendulem),它在两类不同力推动下来回摆动。当摆向着“标准化”摆得过大时,就会有些反作用力产生,如产品的差别化要求、附加值需求、供需不平衡造成的市场混乱等将摆推回来;当摆向着“定制化”摆得过大时,也会有一些反作用力产生,包括更佳经营效率、改进成本效益、更快上市时间等力量再把摆推回来。

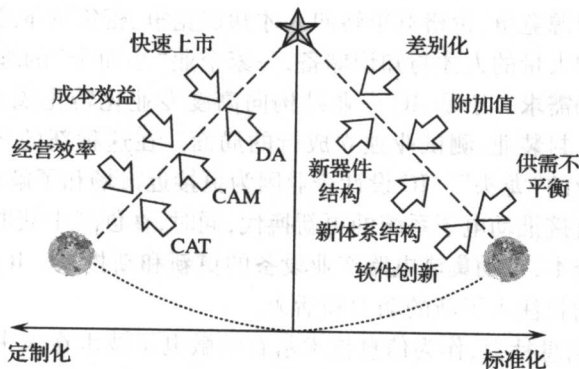


图 1.3 半导体之摆

不同的半导体技术也会对摆发生作用。例如,微处理器发明自 1977 年将摆推向“标准化”,其力量源泉来自器件结构的发明和软件的开发。又如,1987 年设计自动化技术的进步,又把摆推回到“定制化”。当前,还是现场可编程技术这种器件结构的革新,自 1997 年开始,又一次将摆推向“标准化”。这样来回的摆动,促进了集成电路产业循环往复,不断发展进步。

### 3. 集成电路产业结构向高度专业化转化

在 40 年的发展过程中,世界 IC 产业为了适应技术的发展和市场需求,其产业结构经



历了3个主要阶段。

第一个阶段:以加工制造为主导的 IC 产业发展初级阶段。20 世纪 70 年代,集成电路的主流产品是微处理器、存储器以及标准通用逻辑电路。这一时期 IC 制造商(IDM)在 IC 市场中充当主要角色,IC 设计只作为附属部门而存在。这时的 IC 设计和半导体工艺密切相关,IC 设计主要以人工为主。

第二个阶段:Foundry(标准工艺加工线)公司与 IC 设计公司的崛起。1980 年,美国加州理工学院的 Mead 和 Conway 出版了 Introduction to VLSI System 一书。书中提出了以“ $\lambda$  设计规则”和“等比例缩小”定律为主要内容的 IC 设计与工艺制作相对独立的思想。与此同时,在 20 世纪 70 年代末 80 年代初,美国国家安全局做了大量工作,对 MOS 工艺制定了统一标准,为独立于工艺加工进行 IC 设计提供了工艺支持。此外,这一时期 IC CAD 技术也发展到一个新的阶段,能为设计提供方便的原理图编辑、仿真验证和版图自动布局布线等功能,大大提高了 IC 设计效率。在市场需求方面,由于标准化功能的 IC 已难以满足整机客户对系统成本、可靠性、保密性等多方面的要求,他们纷纷要求设计、制作自己的专用集成电路(ASIC)。有远见的整机厂商和自主创业者,包括风险投资基金看到了 ASIC 市场的发展前景,纷纷开始成立设计公司和 IC 设计部门。一种无生产线的集成电路公司(Fabless)或设计部门纷纷建立起来并得到迅速发展。它同时也带动了标准工艺加工线(Foundry)的崛起,形成了无生产线 IC 设计与标准工艺加工线相结合的集成电路产业发展新模式。

第三阶段:IC 产业由分散走向联合,形成垂直分工发展局面,设计业、制造业、封装业、测试业各自拥有自己的市场空间。

进入 20 世纪 90 年代,随着 Internet 的兴起,IC 产业跨入以竞争为导向的高级阶段。国际竞争由原来的资源竞争、价格竞争转向人才知识竞争、密集资本竞争。技术飞速发展需要巨额资金投入和大量的人才与知识储备,一家企业“小而全”的综合发展策略已不能适应技术发展和市场需求。于是,IC 产业结构向高度专业化转化成为一种趋势,开始形成了设计业、制造业、封装业、测试业独立成行的局面。在这种新的产业结构中,IC 设计业成为集成电路产业的“龙头”。IC 设计企业因为更接近市场和了解市场,可通过创新开发高附加值的产品直接推动电子系统的更新换代,同时,在创新中获取利润,在快速、协调发展的基础上积累资本,带动集成电路产业设备的更新和新投入。IC 设计业的崛起为整个集成电路产业的增长注入了新的动力和活力。

21 世纪是一个信息社会,作为信息技术基石的微电子技术在未来的几十年里仍将继续保持高速发展,且其发展呈现以下几个方面的趋势。

### 1. 继续缩小器件的特征尺寸

微电子技术的发展目标是不断提高集成电路和集成系统的性能及性能价格比。为了达到这一目标,人们不断缩小半导体器件的特征尺寸。因为随着器件结构尺寸的缩小,会使工作速度提高、功耗降低;同时,可以把更多的元器件做在一个芯片上,从而提高集成度,降低单元功能的平均价格。目前,集成电路特征尺寸已达深亚微米( $0.09\mu\text{m} \sim 0.13\mu\text{m}$ ),根据 2001 年国际半导体协会发布的预测,世界集成电路的生产水平在 2015 年左右特征尺寸将达到  $0.03\mu\text{m}$ 。随着整个制造水平向  $0.1\mu\text{m}$  逼近,人类的加工能力将进入一个空前的高度,整个微电子领域的前沿热点从制造技术、器件物理、工艺物理到材料