



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
电子科学与技术类专业精品教材

# 微电子概论

(第2版)

Introduction to Microelectronics

Second Edition

◎ 郝 跃 贾新章 编著  
◎ 董 刚 史江义  
◎ 吴玉广 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子科学与技术类专业精品教材

# 微电子概论

(第2版)

郝 跃 贾新章 董 刚 史江义 编著

吴玉广 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书系普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共6章,以硅集成电路为中心,重点介绍半导体集成器件物理基础、集成电路制造基本工艺及其发展、集成电路设计和微电子系统设计、集成电路计算机辅助设计(CAD)。

本书适用于非微电子专业的电子信息科学类和电气信息类的本科生和研究生的教材,也可供从事线路和系统集成化工作的技术人员参考,特别是对于将要从事集成化工作的非微电子专业毕业的工程技术人员,本书更是一本合适的入门教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

微电子概论/郝跃等编著. —2版. —北京:电子工业出版社,2011.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-121-13785-3

I. ①微… II. ①郝… III. ①微电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN4

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第106132号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印刷:北京市顺义兴华印刷厂

装订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开本:787×1092 1/16 印张:16.75 字数:429千字

版次:2011年6月第1次印刷

印数:5000册 定价:32.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

# 前 言

微电子(Microelectronics)技术和集成电路(Integrated Circuit, IC)是 20 世纪的产物,是人类智慧的结晶和文明进步的体现。信息社会的发展,使得作为信息社会粮食的集成电路得到迅速发展。国民经济信息化、对传统产业的改造、国家信息安全、国民消费电子和军事电子等领域的强烈需求,使微电子技术继续呈现高的增长势头。未来若干年,微电子技术仍然是发展最活跃和技术增长最快的高新科技领域之一,也是国家重点支持发展的重大项目之一。在这种情况下,越来越多的线路和系统设计人员参与到微电子系统的研制中,或者需要将其已开发的线路和系统实现集成化。微电子技术已成为非微电子专业的电子信息科学类和电气信息类的本科生和研究生应该掌握的专业基础知识,越来越多的大学为非微电子专业的同学开设了关于微电子基础教育的课程,需要有相关的合适教材。本书编者曾在 1995 年出版了“八五”统编教材“微电子技术概论”。为了适应微电子技术的发展,于 2003 年又编写出版了“普通高等教育‘十五’国家级规划教材”《微电子概论》,至今已有 8 年。为了紧跟微电子技术的发展步伐,反映微电子的最新发展趋势,现对该教材进行全面的补充、修订,作为《微电子概论》(第 2 版)出版。本书列入“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。

考虑到未来相当一段时期硅微电子技术仍然是微电子技术的主体,本教材以硅集成电路为中心,分 6 章,重点介绍半导体集成器件物理基础、集成电路制造基本工艺及其发展、集成电路设计和微电子系统设计、集成电路计算机辅助设计(CAD)。本教材的参考学时为 46 学时。

本教材在编写中注意体现下述特点:

全书总的编写指导思想是从物理概念入手,结合工程实例,介绍半导体集成器件物理、集成工艺原理,以及集成电路和系统的设计特点与方法,对学生进行微电子技术方面的全方位教育,为以后参与微电子系统研制工作奠定必要的基础。

介绍半导体集成器件物理原理时,突出物理概念,重点分析物理过程,同时给出定量结论,使同学们在理解器件原理时不至于感到太抽象。

在分析几种基本半导体器件工作原理的基础上,还进一步介绍了电路模拟软件 Spice 中采用的器件模型、主要模型参数的含义,有助于读者更有效地应用电路级模拟仿真软件。

介绍集成电路工艺原理时,同时介绍双极和 CMOS 工艺过程,以 CMOS 为主。在介绍基本工艺原理基础上同时介绍微电子工艺技术的最新发展情况。

介绍集成电路和系统设计时,一方面结合集成电路设计实例,分别介绍模拟集成电路和数字集成电路底层设计中主要元器件的图形结构设计,使同学们能“看懂”基本的集成电路版图。同时介绍专用集成电路(ASIC)基本设计方法,为从事集成化工作打下基础。

结合实例介绍 CAD 设计系统时,一方面介绍微机级软件系统,使同学们在了解 CAD 方法和基本软件使用的基础上,能结合学校具有的微机级 CAD 软件进行上机练习。同时也介绍工作站 CAD 软件系统概况,这样到工作时,不致对工作站软件感到太陌生。

主要章节后面有思考题和练习题,便于同学检查学习效果。

本教材由西安电子科技大学郝跃任主编并编写第 1 章,贾新章编写第 2、3 章,董刚编写第

4、5 章,史江义编写第 6 章,最后由郝跃统稿。

吴玉广教授任本教材主审,对本教材提出了许多有益的修改意见和评论,在此表示衷心的感谢。同时向本教材所引用的论文、图表和书籍的作者致以深切的谢意。

本教材适用于非微电子专业的电子信息科学类和电气信息类的本科生和研究生相关课程教材,也可供从事线路和系统集成化工作的技术人员参考。特别是对于将要从事集成化工作的非微电子专业毕业的工程技术人员,本书更是一本合适的入门教材。

由于本教材涉及面广,内容发展更新快,教材中难免有不妥和不足之处,敬请读者和老师批评指正。

编著者

2011 年 5 月 26 日

# 目 录

第 1 章 概论 .....	1
1.1 微电子技术和集成电路的发展历程 .....	2
1.1.1 微电子技术与半导体集成电路 .....	2
1.1.2 发展历程 .....	2
1.1.3 发展特点和技术经济规律 .....	5
1.2 集成电路的分类 .....	9
1.2.1 按电路功能分类 .....	9
1.2.2 按电路结构分类 .....	9
1.2.3 按有源器件结构和工艺分类 .....	10
1.2.4 按电路的规模分类 .....	11
1.3 集成电路制造特点和本书学习要点 .....	11
1.3.1 电路系统设计 .....	11
1.3.2 版图设计和优化 .....	12
1.3.3 集成电路的加工制造 .....	13
1.3.4 集成电路的封装 .....	13
1.3.5 集成电路的测试和分析 .....	14
第 2 章 集成器件物理基础 .....	15
2.1 半导体及其能带模型 .....	15
2.1.1 半导体及其共价键结构 .....	15
2.1.2 半导体的能带模型 .....	19
2.1.3 费米分布函数 .....	21
2.2 半导体导电性与半导体方程 .....	22
2.2.1 本征半导体 .....	22
2.2.2 非本征载流子 .....	24
2.2.3 半导体中的电流 .....	27
2.2.4 非平衡载流子与载流子寿命 .....	31
2.2.5 半导体基本方程 .....	33
2.3 pn 结和 pn 结二极管 .....	34
2.3.1 平衡状态下的 pn 结 .....	34
2.3.2 pn 结的单向导电性 .....	39
2.3.3 pn 结直流伏安特性 .....	41
2.3.4 pn 结二极管的交流小信号特性 .....	45
2.3.5 pn 结击穿 .....	48
2.3.6 二极管等效电路模型和二极管应用 .....	51
2.3.7 pn 结应用 .....	53
2.3.8 其他半导体二极管 .....	54

2.4 双极型晶体管 .....	55
2.4.1 双极晶体管的直流放大原理 .....	55
2.4.2 影响晶体管直流特性的其他因素 .....	61
2.4.3 晶体管的击穿电压 .....	64
2.4.4 晶体管的频率特性 .....	65
2.4.5 晶体管的功率特性 .....	67
2.4.6 晶体管模型和模型参数 .....	69
2.5 JFET 与 MESFET 器件基础 .....	71
2.5.1 器件结构与电流控制原理 .....	71
2.5.2 JFET 直流输出特性的定性分析 .....	72
2.5.3 JFET 的直流转移特性 .....	75
2.5.4 JFET 直流特性定量表达式 .....	75
2.5.5 JFET 的器件类型和电路符号 .....	76
2.5.6 JFET 等效电路和模型参数 .....	77
2.6 MOS 场效应晶体管 .....	78
2.6.1 MOS 晶体管结构 .....	78
2.6.2 MOS 晶体管工作原理 .....	79
2.6.3 MOS 晶体管直流伏安特性定量结果 .....	81
2.6.4 MOS 晶体管的阈值电压 .....	82
2.6.5 4 种类型 MOS 晶体管的对比分析 .....	83
2.6.6 MOS 晶体管模型和模型参数 .....	86
2.6.7 影响 MOSFET 器件特性的非理想因素 .....	88
2.6.8 CMOS 晶体管 .....	91
2.6.9 现代 IC 中的先进 MOS 结构 .....	93
2.7 异质结半导体器件 .....	98
2.7.1 异质结 .....	98
2.7.2 异质结双极晶体管(HBT) .....	99
2.7.3 高电子迁移率晶体管(HEMT) .....	100
练习及思考题 .....	101
<b>第 3 章 集成电路制造工艺</b> .....	<b>102</b>
3.1 硅平面工艺基本流程 .....	102
3.1.1 平面工艺的基本概念 .....	102
3.1.2 pn 结隔离双极 IC 工艺基本流程 .....	105
3.1.3 平面工艺中的基本工艺 .....	109
3.2 氧化工艺 .....	110
3.2.1 SiO <sub>2</sub> 薄膜在集成电路中的作用 .....	110
3.2.2 SiO <sub>2</sub> 生长方法 .....	111
3.2.3 氮化硅薄膜的制备 .....	113
3.2.4 SiO <sub>2</sub> 膜质量要求和检验方法 .....	113
3.2.5 氧化技术面临的挑战 .....	114
3.3 掺杂方法之一——扩散工艺 .....	114
3.3.1 扩散原理 .....	114

3.3.2	常用扩散方法简介	115
3.3.3	扩散层质量检测	116
3.3.4	扩散工艺与集成电路设计的关系	119
3.4	掺杂方法之二——离子注入技术	120
3.4.1	离子注入技术的特点	120
3.4.2	离子注入设备	120
3.4.3	离子注入退火	121
3.4.4	离子注入杂质分布	121
3.5	光刻和刻蚀工艺	122
3.5.1	光刻工艺的特征尺寸——工艺水平的标志	122
3.5.2	光刻和刻蚀工艺基本过程	123
3.5.3	超微细图形的光刻技术	126
3.6	制版工艺	128
3.6.1	集成电路生产对光刻版的质量要求	129
3.6.2	制版工艺过程	129
3.6.3	光刻掩膜版的检查	129
3.7	外延工艺	130
3.7.1	外延生长原理	130
3.7.2	外延层质量要求	131
3.7.3	分子束外延生长技术	131
3.8	金属化工艺	131
3.8.1	金属材料的选用	132
3.8.2	金属化互连系统结构	133
3.8.3	金属层淀积工艺	134
3.8.4	平面化	136
3.8.5	合金化	137
3.9	引线封装	137
3.9.1	后工序加工流程	137
3.9.2	超声键合	137
3.9.2	封装	138
3.10	隔离技术	140
3.10.1	MOS IC 的隔离	140
3.10.2	双极 IC 中的基本隔离技术	142
3.11	绝缘物上硅	145
3.11.1	SOI 技术	145
3.11.2	注氧隔离技术(Seperation by Implantation of Oxygen SIMOX)	145
3.11.3	硅片粘合技术(Wafer Bonding Technique)	146
3.12	CMOS 集成电路工艺流程	146
3.12.1	CMOS 工艺	146
3.12.2	典型 N 阱 CMOS 工艺流程	147
	练习及思考题	151



<b>第 4 章 集成电路设计</b> .....	152
4.1 集成电路版图设计规则 .....	152
4.1.1 $\lambda$ 设计规则 .....	152
4.1.2 微米设计规则 .....	153
4.2 集成电路中的无源元件 .....	154
4.2.1 集成电阻 .....	154
4.2.2 集成电容 .....	158
4.2.3 片上电感 .....	159
4.2.4 互连线 .....	160
4.3 双极集成器件和电路设计 .....	162
4.3.1 双极晶体管结构 .....	162
4.3.2 双极晶体管的寄生参数 .....	163
4.3.3 NPN 晶体管纵向结构设计 .....	164
4.3.4 NPN 晶体管横向结构设计 .....	165
4.3.5 双极集成电路版图设计 .....	165
4.3.6 版图设计实例 .....	166
4.4 CMOS 集成器件和电路设计 .....	169
4.4.1 硅栅 CMOS 器件 .....	169
4.4.2 CMOS 电路中的寄生效应 .....	170
4.4.3 CMOS 版图设计实例 .....	172
4.5 双极和 CMOS 集成电路比较 .....	174
练习及思考题 .....	175
<b>第 5 章 微电子系统设计</b> .....	176
5.1 双极数字电路单元电路设计 .....	176
5.1.1 TTL 电路 .....	176
5.1.2 ECL 电路和 $I^2L$ 电路 .....	177
5.2 CMOS 数字电路单元电路设计 .....	178
5.2.1 静态 CMOS 电路 .....	179
5.2.2 CMOS 有比电路和动态电路 .....	180
5.3 半导体存储器电路 .....	181
5.3.1 只读存储器 .....	181
5.3.2 随机存取存储器 .....	184
5.4 专用集成电路(ASIC)设计方法 .....	186
5.4.1 全定制设计方法 .....	186
5.4.2 半定制设计方法 .....	187
5.4.3 可编程逻辑设计方法 .....	191
5.5 SoC 设计方法 .....	197
5.5.1 SoC 的设计过程 .....	198
5.5.2 SoC 的设计问题 .....	199
练习及思考题 .....	201

<b>第 6 章 电子设计自动化</b> .....	202
6.1 EDA 的基本概念 .....	202
6.1.1 电子设计自动化 .....	202
6.1.2 EDA 技术的优点 .....	204
6.1.3 现代集成电路设计方法 .....	205
6.2 数字系统 EDA 技术 .....	206
6.2.1 传统 ASIC 设计流程 .....	206
6.2.2 并行交互式数字集成电路设计流程 .....	208
6.2.3 IP 核 .....	211
6.3 数字集成电路设计平台 .....	214
6.3.1 EDA 工具软硬件平台 .....	214
6.3.2 数字集成电路设计关键工具简介 .....	216
6.3.3 版图数据文件生成 .....	224
6.4 数字集成电路设计实例 .....	225
6.4.1 UART IP 功能规划 .....	225
6.4.2 系统规划 .....	226
6.4.3 UART IP 核工作过程 .....	227
6.4.4 代码设计 .....	228
6.4.5 仿真验证 .....	229
6.4.6 电路综合 .....	232
6.4.7 可测性设计 .....	233
6.5 模拟与射频集成电路 CAD 技术 .....	235
6.5.1 模拟集成电路和系统的特点 .....	235
6.5.2 模拟集成电路设计流程 .....	235
6.5.3 模拟电路和系统设计平台 .....	236
6.5.4 模拟集成电路的模拟仿真 .....	236
6.5.5 模拟 CAD 技术研究方向 .....	238
6.5.6 射频集成电路设计工具简介 .....	239
6.6 模拟集成电路设计实例 .....	242
6.6.1 电路图设计与参数估算 .....	242
6.6.2 电路仿真 .....	245
6.6.3 版图设计 .....	247
6.7 工艺和器件模拟以及统计分析 .....	251
6.7.1 工艺模拟 .....	252
6.7.2 器件模拟 .....	254
6.7.3 集成电路的统计模拟 .....	255
6.7.4 集成电路的统计设计 .....	255
<b>练习及思考题</b> .....	256
<b>参考文献</b> .....	257

# 第1章 概 论

微电子(Microelectronics)技术和集成电路(Integrated Circuit, IC)是20世纪的产物,是人类智慧的结晶和文明进步的体现。信息社会的发展,使得作为信息社会粮食的集成电路得到迅速发展。国民经济信息化、对传统产业的改造、国家信息安全、国民消费电子和军事电子等领域的强烈需求,使微电子技术继续呈现高速增长势头。未来若干年,微电子技术仍然是发展最活跃的技术和增长最快的高新科技领域。其中硅微电子技术仍然是微电子技术的主体,至少20~30年内是这样。微电子技术的发展开辟了新的科学领域,带动了一系列相关高新科学的发展。其发展趋势呈现下述一系列特点:

微电子与机械工程结合使微机电系统(MEMS)得到快速发展,与光学工程的结合促使了微光学和集成光学的发展,与生物工程结合正导致生物微电子技术的发展,等等;

微电子器件的特征尺寸沿着微米、亚微米(小于1微米)、深亚微米(小于0.5微米)、超深亚微米(小于0.18微米)到纳米的方向发展,正逐步进入微观(量子态)态;

IC系统正进入系统集成(System on a Chip, SoC),单个芯片上汇聚传感、信息处理和驱动系统为一体将是发展方向,SoC和单片的多功能化将是未来相当长时期微电子发展的方向和热点;

化合物半导体随着通信的发展,其需求将进一步发展;

宽禁带半导体是未来新的技术生长点;

.....

总之,微电子技术仍将保持不断进步和持续发展的势头。

微电子技术的发展改变了人类社会生产和生活方式,甚至影响着世界经济和政治格局,这在科学技术史上是空前的。

目前,微电子技术已经广泛应用于国民经济、国防建设、乃至家庭生活的各个方面。近30年来,以微电子技术为支撑的微电子产业的平均发展速度一直保持在15%以上,近年来的发展速度更为迅速,并成为整个信息产业的基础。集成电路已经广泛地应用到国民经济和社会的一切领域,成为影响世界各国经济发展和国家安全的重要因素。目前国际上把VLSI技术称为“掌握世界的钥匙”,谁掌握了它,谁就掌握了世界,其产业规模和科学技术已成为衡量一个国家综合实力的标志之一。

20世纪70年代,集成电路产业初步形成,1975年,世界GDP总量与集成电路产业规模的关系约为1000:1,其后,由于集成电路产业以远高于GDP的增长速度发展,其产业规模急剧扩大,该比例以平均每年约6%的速度递减。预计到2020年,GDP、电子工业、集成电路产业规模的关系为100:10:1。随着电子信息产品的广泛应用,集成电路的需求量一直呈大幅上升势头。据美国半导体工业协会(SIA)分析,2000年以来世界集成电路市场得到快速发展,销售总额已经突破2500亿美元。根据SIA和Nikkei Business的预测,到2020年世界GDP和电子工业产值分别为60万亿美元和5万~6万亿美元,世界集成电路工业总产值为5000亿~6000亿美元。

近十年,中国集成电路市场平均增长率为 40%,约为世界集成电路市场增长率的 3 倍。2005 年,中国集成电路市场总额为 3803 亿元,占世界市场 24%,成为世界第一大市场;预计未来 5~10 年,该市场将扩大到 5000 亿元以上,占世界集成电路市场将大于 31%。在当前集成电路技术及产业的发展态势下,我国集成电路产业将实现大的发展,随着集成电路产业国际大转移的时机到来,中国将成为集成电路产业大国。在这种情况下,就要求电路与系统设计人员在掌握微电子基本概念和技术的基础上,和微电子专业技术人员一道,共同进行集成电路的设计和研制。我们希望能从 IC 设计开始,真正实现我国的 IC 产业腾飞。

## 1.1 微电子技术和集成电路的发展历程

### 1.1.1 微电子技术与半导体集成电路

微电子技术是利用微细加工技术,基于固体物理、器件物理和电子学理论和方法,在半导体材料上实现微小型固体电子器件和集成电路的一门技术。其核心是半导体集成电路及其相关技术。

集成电路包括半导体集成电路和混合集成电路两类。

半导体集成电路是用半导体工艺技术将电子电路的元件(电阻、电容、电感等)和器件(晶体管、传感器等)在同一半导体材料上“不可分割地”制造完成,并互连在一起,形成完整的有独立功能的电路和系统。

混合集成电路是将不同的半导体集成电路和分立电子元器件通过混合集成电路工艺和微细加工方法,将它们分别固化到同一基板(陶瓷材料、半导体材料等)上,用互连的方式将它们集成为完整的有独立功能的电路和系统。

本书主要介绍半导体集成电路的理论基础、制造工艺、元件和器件结构与原理、设计方法等相关知识和技术。

### 1.1.2 发展历程

实际上,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,并成功地用它们制出了检波器。但这些早期的晶体检波器性能不稳定,很快被淘汰了。到了 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,半导体材料又引起了人们的注意,并制出了锗和硅微波二极管。为了改善这些器件的稳定性和可靠性,第二次世界大战后,在美国的 Bell 实验室,由 W. Shockley、J. Bardeen 和 W. Brattain 组成的研究小组展开了对固体表面的研究。1947 年 12 月 23 日,该小组在对半导体特性研究的过程中发明了点接触三极管,这是世界上第一只晶体三极管,它标志着电子技术从电子管时代进入晶体管时代迈开了第一步。在此基础上,W. Shockley 提出了 pn 结和面接型晶体管的基本理论,接着发明了具有实用价值的面结型晶体管。为此这三位科学家于 1956 年荣获诺贝尔奖。图 1.1 为三人研究小组和世界上第一只晶体管的照片。

晶体管发明后不到 5 年,英国皇家研究所的塔姆于 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第一次提出了关于 IC 的设想。文中说到:“可以想象,随着晶体管和

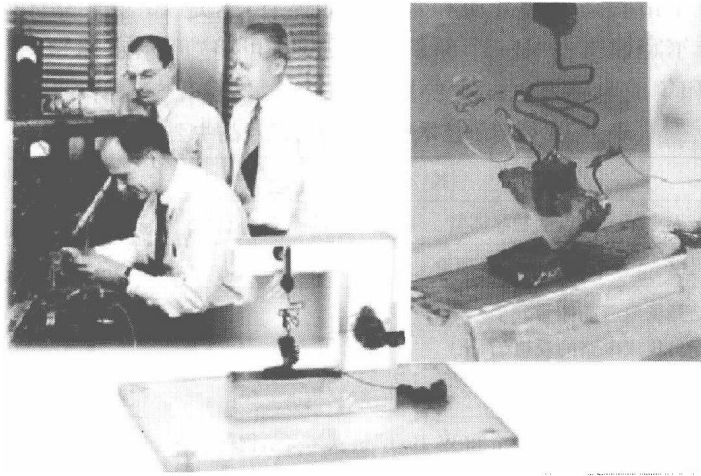


图 1.1 Shockley 三人小组和世界上第一只晶体管  
(三人中坐着的为 Shockley, 后面从左分别为 Bardeen 和 Brattain)

一般半导体工业的发展,电子设备可以在固体上实现,而不需要连接线。这块电路可以由绝缘、导体、整流放大等材料层组成”。在此后几年,随着工艺水平的提高,美国得克萨斯仪器公司(TI)公司的 J. S. Kilby 于 1958 年宣布研制出了第一块 IC(当时该电路实际上是一个仅包含 12 个元件的混合集成电路)。从此,微电子技术进入了 IC 时代。J. S. Kilby 于 2000 年获得诺贝尔奖。图 1.2 为 J. S. Kilby 和世界上第一块集成电路。

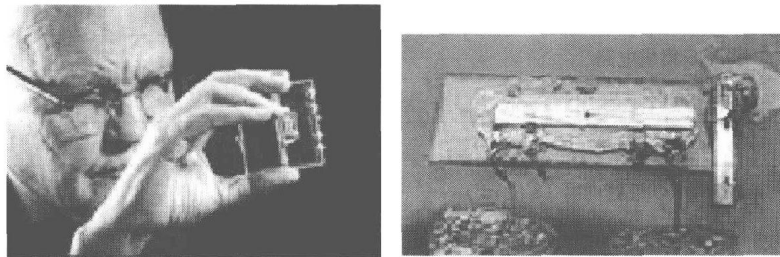


图 1.2 Kilby 和世界上第一块集成电路

1947 年晶体管的发明并没有引起人们过多的注意,仅仅是在当时的《纽约时报》上有一条短消息。由于工艺和结构问题,最初发明的点接触晶体管达不到实用的要求。真正引起了一次新的技术革命,是人们对半导体器件及其制造工艺的研究不断深入。首先是在 20 世纪 50 年代初,面结型晶体管达到实用程度,开始工业化生产。在随后的几年中,通过对半导体表面效应的深入掌握,1958 年制造出了金属-氧化物-半导体场效应晶体管(MOSFET)。尽管 MOS 晶体管的诞生比双极晶体管晚了近 10 年,但是由于它体积小、功耗低、制造工艺简单,为集成化提供了有利条件。随着硅平面工艺技术的发展,1965 年英特尔公司主要创始人摩尔提出了著名的“摩尔(Moore)定律”,他预言:集成电路的晶体管密度每 18~24 个月翻一番。每个芯片的成本将会每年下降一半。确实,MOS 集成电路基本遵循 Moore 定律(见图 1-3)飞速地发展。现在已经可以把几亿乃至几十亿个 MOS 晶体管集成在一个芯片里。以 CMOS 集成电路为代表的微电子技术及其产业突飞猛进,日新月异,给人类的工作和生活带来了巨大变革。根据预测,直至 21 世纪上半叶,它仍将是主流技术。2007 年,英特尔公司推出 45nm 处理

器,革命性地采用基于钨的高-k 栅介质和金属栅晶体管,这是 40 年来晶体管材料和工艺的又一次重大革新,将摩尔定律推向又一个新的发展阶段,可将“摩尔定律”再延长 10 年。表 1.1 给出了微电子技术和集成电路发展的主要里程碑。

表 1.1 微电子技术和集成电路发展的主要里程碑

年 份	技术 进 展	领先企业和代表
1947. 12	世界上第一个点接触晶体管	Bell Lab.
1949	提出 pn 结和双极晶体管理论	Bell Lab.
1952	结型场效应晶体管 提出集成电路的设想(Tam)	Bell Lab. 英·皇家研究所
1954	第一只硅晶体管	TI
1956	W. Shockley, J. Bardeen 和 W. Brattain 获诺贝尔物理学奖 中国第一只晶体管	Bell Lab.
1958	TI 公司研制世界上第一块集成电路 FairChild 公司用平面工艺研制出第一块实用化的集成电路 MOSFET 研制成功	TI FairChild Bell Lab.
1962	TTL 逻辑集成电路 P-MOS 集成电路	Sylvania 通用微电子
1963	中国第一块集成电路 N-MOS 集成电路 MESFET	FairChild Mead
1965	英特尔主要创始人摩尔提出了著名的“摩尔定律”	Intel
1968	CMOS 集成电路	RCA
1969	硅栅 MOS 工艺	Intel
1971	第一块微处理器 (Intel 4004)	Intel
1972	Intel 8008 微处理器 (8 位 uP) 数字信号处理器 (DSP: Digital Signal Processor)	Intel Westinghouse
1978	16 位微处理器 Intel 8086	Intel
1981	32 位单片微处理器 Z80000	Zilog
1982	第一块 256K DRAM	Bell Lab.
1983	电可改写的程序存储器 (EEPROM) 问世	Toshiba
1985	1Mb DRAM 商用的 Flash 存储器问世 (256Kbit 的 FLASH 存储器) Intel 80386	IBM/AT&T Toshiba Intel
1986	BiCMOS 技术	日立
1988	4Mb DRAM	日立/TI
1989	Intel 80486 (RISC)	Intel
1990	16Mb DRAM	Samsung
1991	64M DRAM	Fuji/National
1992	256M DRAM	IBM/Ximens/NEC

(续表)

年份	技术进展	领先企业和代表
1993	Intel Pentium 微处理器 (P5 or 80586)	Intel
1994	1Gb DRAM	NEC/IBM
1995	Intel Pentium Pro	Intel
1997	4Gb DRAM Intel Pentium MMX Intel Pentium II	NEC Intel Intel
2000	16Gb DRAM J. S. Kilby 获诺贝尔物理学奖	NEC/IBM TI
2001	Intel NetBurst Pentium 4 (1.7GHz 主频)	Intel
2002	开始使用 12 英寸晶圆, 引入 90nm 工艺	Intel
2004	引入 65nm 工艺	TI
2006	16Gb 的 Flash memory, 可代替固态硬盘	Samsung
2007	45nm 工艺的 CPU 进入批量生产 成功采用铪的高-k 栅介质和金属栅晶体管	Intel

### 1.1.3 发展特点和技术经济规律

集成电路从诞生到现在仅仅 50 余年的时间,它的发展带动信息社会的发展,成为国民经济发展强大的倍增器。其发展规律和主要特点为:

(1) 集成度不断提高。集成电路的发展基本按照摩尔定律,即每隔 3 年,特征尺寸缩小 30%,集成度(每个芯片上集成的晶体管和元件的数目)提高 4 倍。其中专用集成电路(ASIC)和存储器每 1~2 年其集成度和性能均翻番。图 1.3 给出了集成电路典型代表产品微处理器(MPU)和存储器集成度逐年发展的曲线,说明按摩尔定律发展的规律。

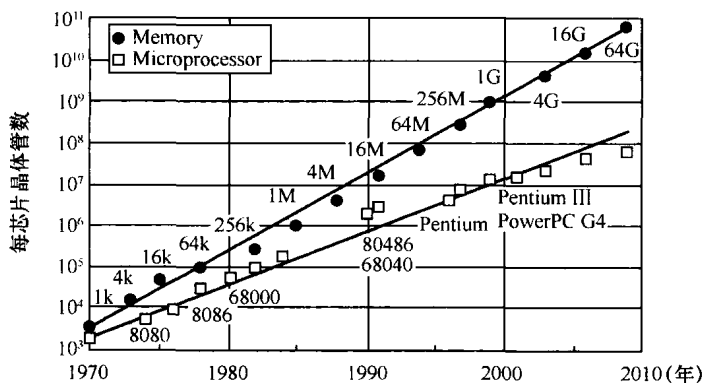


图 1.3 集成电路发展曲线

1971 年制造出的第一块 4 位的微处理器芯片, 单个芯片上集成有 2.3k 个晶体管。1981 年生产的 16 位微处理器芯片集成度达到 29k。图 1.4 分别给出了 20 世纪 70 年代 Intel 公司第一块微处理器芯片 4004 和 90 年代末的“奔腾”PIV 微处理器芯片的版图, 其集成的晶体管数从 4004 的 2300 个发展到 PIV 的 4200 多万个, 足以说明微电子技术日新月异的变化和发展。同样, 在 70 年代存储器的集成度为 Kbit( $10^3$ ) 规模, 到 80 年代中期发展到 Mbit( $10^6$ ) 规模, 1994 年已研制出 Gbit( $10^9$ ) 规模的 DRAM 芯片。预计到 2031 年左右将达到 1Tbit 的集成度。随机逻辑电路由于结构复杂其集成度增长不像存储器那样快, 大约每 5 年增长 10 倍。但是其发展速度也是相当惊人的。

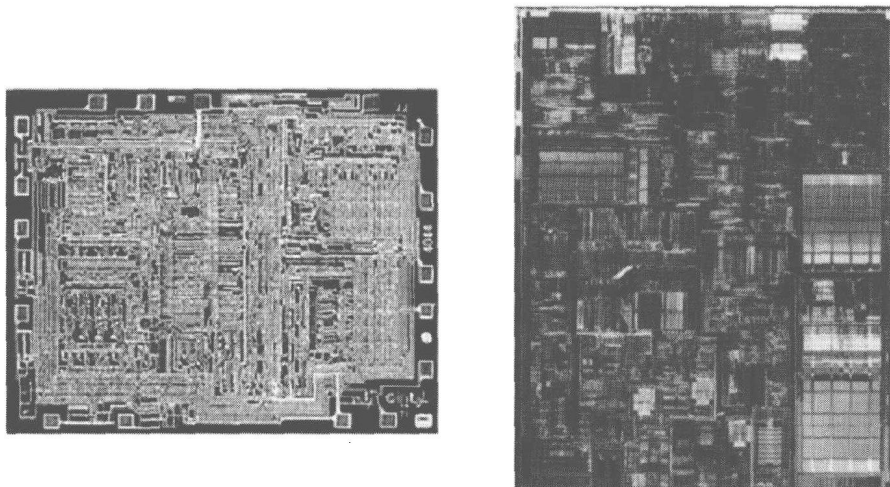


图 1.4 Intel 4004 MUP(左)和 Intel PIV(右)芯片

(2) 小特征尺寸和大圆片技术不断适应发展需要。目前直径为 300mm 圆片、特征尺寸为 65~90nm 的集成电路已经批量生产。表 1.2 给出了近年特征尺寸预测变化情况, 说明在 2000 年前后技术发展明显有超前的趋势, 但在 2005 年以后, 技术发展基本与预期是一致的。伴随微细加工和大圆片技术发展, 集成电路的技术发展如表 1.3 所示。

表 1.2 特征尺寸变化趋势 (nm)

预计进入生产时间	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2016	2016	2022
特征尺寸	SIA 99 版		100			70			50			35		
	ITRS 2001	100				70			50			35		
	ITRS 2002				70	65		45			32			
	ITRS 2005				65			45			32		22	16
	ITRS 2008							45			32		22	16

注: 表中 SIA 代表 Semiconductor Industry Association, 即美国半导体工业协会;

ITRS 代表 International Technology Roadmap for Semiconductors, 即国际半导体技术发展趋势



表 1.3 集成电路技术发展趋势

最小线宽( $\mu\text{m}$ )	0.35	0.25	0.18	0.13	0.09	0.065
晶体管数/ $\text{cm}^2$	4M	7M	13M	25M	50M	90M
成本/晶体管(毫美分)	1	0.5	0.2	0.1	0.05	0.02
最大互连线层数	4~5	5	5~6	6	6~7	7~8
电学缺陷数/ $\text{m}^2$	240	160	140	120	100	25
最大掩膜版数	18	20	20	22	22	24
芯片尺寸( $\text{mm}^2$ )	450	660	750	900	1100	1400
电源电压(V)	3.3	2.5	1.8	1.5	1.2	0.9
芯片 I/O 数	900	1350	2000	2600	3600	4800
芯片性能(MHz)	150	200	250	300	375	475

(3) 半导体产品的高性能化和多样化。这些表现为容量、集成度和速度性能的迅速提高,以及功耗和工作电压性能的明显改善。

半导体存储器正继续围绕大容量、高密度和低压工作方向不断推进。4G DRAM 采用了  $0.15\mu\text{m}$  微细加工技术,集成 44 亿个元器件,工作电压仅为  $2\sim 2.5\text{V}$ 。为了适应 MPU 高速化和多媒体应用的需要,除工艺方面进行改进外,还开发了同步 DRAM(SDRAM)等新的结构技术,使其速度性能可与 SRAM 相当。

微处理器(MPU)是 IC 产品技术与市场竞争的焦点。随着系统性能要求的提高,开发高性能 MPU 是必然的发展趋势和任务,尤其高速度已成为其发展的重点和方向。新型微处理器芯片主频可达  $3\text{GHz}$ ,集成晶体管数达到  $2000\sim 5000$  万个。从 2005 年以后,为了进一步提高芯片的处理能力和降低功耗,出现了多核的处理器并有了产品,其目的是克服仅仅依靠提高工作频率提高芯片处理速度(这样会增加芯片功耗,同时对芯片的功率有更高的要求)。目前,双核和四核的 CPU 已有产品,更新的多核处理器也有重大进展。图 1.5 是 Intel 公司的 80 核的 CPU,浮点运算能力  $1.01\text{T FloFs}$ (每秒万亿次),相当于 1 万颗 Pentium Pro 运算能力。

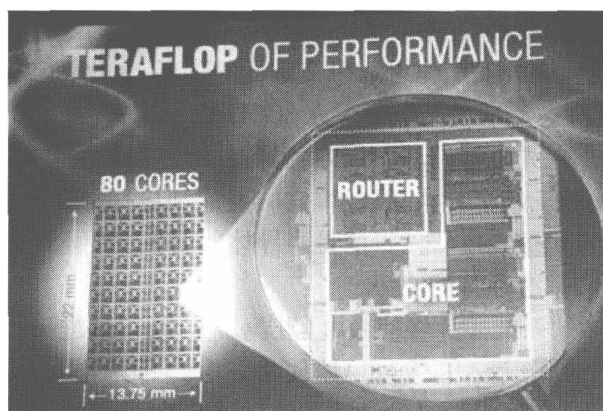


图 1.5 Intel 公司的 80 核 CPU Tera-Scale 80