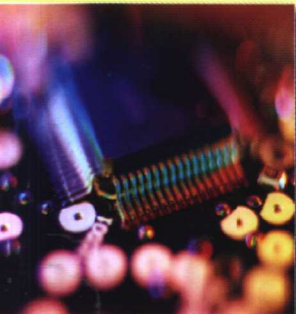
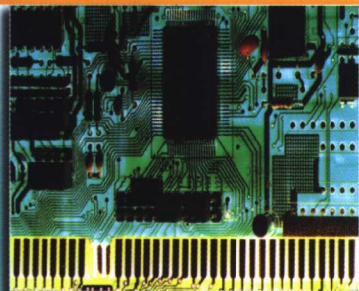




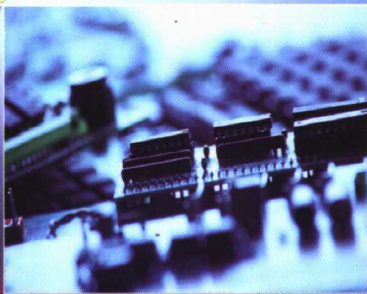
普通高等教育“十五”国家级规划教材



# 微电子概论



郝跃 贾新章 吴玉广 编著



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 微电子概论

郝 跃 贾新章 吴玉广 编著

高等教育出版社

## 内容简介

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材。全书共7章,以硅集成电路为中心,重点介绍集成器件物理基础、集成电路制造工艺、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,也可从事线路和系统集成化工作的技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

微电子概论 / 郝跃,贾新章,吴玉广编著. —北京:  
高等教育出版社, 2003.12  
ISBN 7-04-013044-0

I. 微... II. ①郝...②贾...③吴... III. 微  
电子技术 - 高等学校 - 教材 IV. TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 084188 号

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-82028899		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>

经 销 新华书店北京发行所  
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本	787×960 1/16	版 次	2003年12月第1版
印 张	18.25	印 次	2003年12月第1次印刷
字 数	340 000	定 价	23.00元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

**版权所有 侵权必究**

# 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,使得作为信息社会食粮的集成电路得到迅速发展。国民经济信息化、传统产业改造、国家信息安全、民用电子和军用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。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。本书编者于 1995 年出版了“八五”统编教材《微电子技术概论》,多次加印,使用至今。为了适应微电子技术的发展,现对该教材进行全面的补充、修订,列入普通高等教育“十五”国家级规划教材,由高等教育出版社正式出版。

考虑到未来 20~30 年内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 7 章,重点介绍集成器件物理基础、集成电路制造工艺、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:

(1) 从物理概念入手,结合工程实例,介绍集成器件物理基础、集成工艺原理、集成电路和系统的设计特点和方法,对学生进行微电子基础知识的教育,为以后参与微电子系统研制工作奠定基础。

(2) 以物理概念为重点,介绍集成器件物理原理,同时给出定量结论,使同学们在理解器件原理时不致感到太抽象。

(3) 介绍工艺原理时,同时介绍双极和 CMOS 工艺过程,以 CMOS 为主。在介绍工艺基本原理基础上同时介绍微电子工艺技术的最新发展情况。

(4) 介绍集成电路设计时,一方面介绍底层设计中各种元器件图形结构设计,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。

(5) 介绍 CAD 设计系统时,重点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。

(6) 结合课程学习,介绍中小规模集成电路设计练习。

(7) 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教授任主编并编写第 1 章,贾新章教授编写第 2、3、6 章,吴玉广教授编写第 4、5、7 章,最后由郝跃教授统稿。

张义门教授任本教材主审,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,也可供从事线路和系统集成化工作的技术人员参考。

由于本教材涉及面广,内容发展更新快,教材中难免有不妥甚至错误之处,请读者和老师批评指正。

编者

2003 年 6 月

策划编辑	李	慧
责任编辑	李	刚
封面设计	于	涛
责任绘图	朱	静
版式设计	胡志	萍
责任校对	王	雨
责任印制	韩	刚

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

**反盗版举报电话：**(010) 58581897/58581698/58581879/58581877

**传 真：**(010) 82086060

**E - mail：**dd@hep.com.cn 或 chenrong@hep.com.cn

**通信地址：**北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社法律事务部

**邮 编：**100011

**购书请拨打电话：**(010)64014089 64054601 64054588

# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	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 .....	3
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 .....	10
1.2.3 按有源器件结构和工艺分类 .....	11
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 .....	12
1.3.1 电路系统设计 .....	12
1.3.2 版图设计和优化 .....	13
1.3.3 集成电路的加工制造 .....	14
1.3.4 集成电路的封装 .....	15
1.3.5 集成电路的测试和分析 .....	15
<b>第 2 章 集成器件物理基础</b> .....	17
2.1 半导体及其能带模型 .....	17
2.1.1 半导体及其共价键结构 .....	17
2.1.2 半导体的能带模型 .....	21
2.1.3 费米分布函数 .....	23
2.2 半导体的导电性 .....	24
2.2.1 本征半导体 .....	24
2.2.2 非本征载流子 .....	26
2.2.3 半导体中的漂移电流 .....	29
2.2.4 半导体中的扩散电流 .....	31
2.2.5 半导体中的电流 .....	34
2.2.6 半导体基本方程 .....	34
2.3 PN 结和晶体二极管 .....	36



2.3.1	平衡状态下的 PN 结	36
2.3.2	PN 结的单向导电性	38
2.3.3	理想 PN 结模型及其伏 - 安特性	40
2.3.4	PN 结电容	43
2.3.5	PN 结击穿	47
2.3.6	二极管等效电路模型和二极管应用	49
2.3.7	PN 结应用	51
2.3.8	其他半导体二极管	51
2.4	双极型晶体管	53
2.4.1	双极晶体管的直流放大原理	53
2.4.2	影响晶体管直流特性的其他因素	60
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	晶体管模型和模型参数	69
2.4.6	异质结双极晶体管(HBT)	71
2.5	JFET 与 MESFET 器件基础	72
2.5.1	器件结构与电流控制原理	72
2.5.2	JFET 直流输出特性的定性分析	73
2.5.3	JFET 的直流转移特性	76
2.5.4	JFET 的器件类型和电路符号	76
2.5.5	JFET 直流特性定量表达式	77
2.5.6	JFET 等效电路和模型参数	78
2.6	MOS 场效应晶体管	79
2.6.1	MOS 晶体管结构	80
2.6.2	MOS 晶体管工作原理	81
2.6.3	MOS 晶体管直流伏安特性定量结果	85
2.6.4	MOS 晶体管的阈值电压	86
2.6.5	MOS 晶体管特点	87
2.6.6	MOS 晶体管模型和模型参数	88
2.6.7	硅栅 MOS 结构和自对准技术	90
2.6.8	高电子迁移率晶体管(HEMT)	91
	习题	91
	<b>第 3 章 集成电路制造工艺</b>	<b>93</b>
3.1	硅平面工艺基本流程	93

3.1.1	平面工艺的基本概念	93
3.1.2	PN结隔离双极 IC 工艺基本流程	97
3.1.3	平面工艺中的基本工艺	102
3.2	氧化工艺	103
3.2.1	SiO <sub>2</sub> 薄膜在集成电路中的作用	103
3.2.2	SiO <sub>2</sub> 生长方法	103
3.2.3	氮化硅薄膜的制备	106
3.2.4	SiO <sub>2</sub> 膜质量要求和检验方法	106
3.2.5	氧化技术面临的挑战	107
3.3	掺杂方法之一——扩散工艺	107
3.3.1	扩散原理	107
3.3.2	常用扩散方法简介	109
3.3.3	扩散层质量检测	110
3.3.4	扩散工艺与集成电路设计的关系	112
3.4	掺杂方法之二——离子注入技术	113
3.4.1	离子注入技术的特点	113
3.4.2	离子注入设备	114
3.4.3	离子注入杂质分布	115
3.5	光刻工艺	115
3.5.1	光刻工艺的特征尺寸——工艺水平的标志	115
3.5.2	光刻工艺过程	116
3.5.3	超微细图形曝光技术	118
3.6	制版工艺	120
3.6.1	集成电路生产对光刻版的质量要求	120
3.6.2	制版工艺过程	120
3.6.3	光刻掩模版的检查	121
3.7	外延工艺	121
3.7.1	外延生长原理	121
3.7.2	外延层质量要求	122
3.7.3	外延新技术	123
3.8	金属化工艺	123
3.8.1	金属材料的选用	123
3.8.2	金属层淀积工艺	125
3.8.3	金属化互连系统结构	126

3.8.4 合金化 .....	127
3.9 引线封装 .....	127
3.9.1 键合 .....	127
3.9.2 封装 .....	128
3.10 隔离技术 .....	131
3.10.1 双极 IC 中的基本隔离技术——PN 结隔离 .....	131
3.10.2 双极 IC 中的介质 - PN 结混合隔离 .....	132
3.10.3 双极 IC 中的介质隔离 .....	133
3.10.4 MOS IC 的隔离 .....	135
3.11 绝缘物上硅 .....	136
3.11.1 SOI 技术 .....	136
3.11.2 注氧隔离技术(SIMOX) .....	137
3.11.3 硅片粘合技术(Wafer Bonding Technique) .....	138
3.12 CMOS 集成电路工艺流程 .....	138
3.12.1 CMOS 工艺 .....	138
3.12.2 典型 N 阱 CMOS 工艺流程 .....	139
<b>第 4 章 集成电路设计 .....</b>	<b>144</b>
4.1 集成电路中的无源元件与互连线 .....	144
4.1.1 电容器 .....	144
4.1.2 电阻器 .....	146
4.1.3 集成电路中的电阻模型 .....	149
4.1.4 集成电路互连线 .....	150
4.2 双极集成器件和电路设计 .....	151
4.2.1 双极晶体管的寄生参数 .....	151
4.2.2 纵向结构设计 .....	153
4.2.3 横向结构设计 .....	155
4.2.4 按比例缩小原则 .....	156
4.2.5 双极 PNP 晶体管及设计 .....	157
4.2.6 双极集成电路版图设计 .....	159
4.2.7 版图设计实例 .....	160
4.3 MOS 集成器件和电路设计 .....	163
4.3.1 硅栅 CMOS 器件 .....	163
4.3.2 寄生电阻 .....	168
4.3.3 寄生电容 .....	168

---

4.3.4 版图设计实例	168
4.4 双极和 MOS 集成电路比较	171
4.4.1 制造工艺	171
4.4.2 互连	172
4.4.3 集成度	172
4.4.4 性能比较	172
习题	173
<b>第 5 章 微电子系统设计</b>	<b>174</b>
5.1 双极数字电路单元电路设计	174
5.1.1 TTL 电路	175
5.1.2 ECL 电路	176
5.1.3 $I^2L$ 电路	176
5.2 MOS 数字电路单元电路设计	178
5.2.1 NMOS 电路	178
5.2.2 CMOS 逻辑电路	178
5.3 半导体存储器电路	180
5.3.1 随机存取存储器	181
5.3.2 掩模编程 ROM	183
5.3.3 半导体存储器的比较	187
5.4 专用集成电路(ASIC)设计方法	188
5.4.1 专用集成电路设计目的和分类	188
5.4.2 版图符号布图方法	190
5.4.3 门阵列设计方法	192
5.4.4 可编程逻辑器件设计方法	194
5.4.5 标准单元设计方法	196
5.4.6 PLD 和 LCA	198
习题	204
<b>第 6 章 集成电路计算机辅助设计</b>	<b>205</b>
6.1 计算机辅助设计的基本概念	205
6.1.1 计算机辅助设计(CAD)和设计自动化(DA)	205
6.1.2 CAD 技术的优点	206
6.1.3 集成电路正向 CAD 过程	207
6.1.4 ICCAD 系统	209
6.1.5 集成电路的逆向设计	211

6.2	电路和系统设计描述	211
6.2.1	电路和系统设计的描述	212
6.2.2	OrCAD/Capture CIS 软件	213
6.2.3	电路图绘制模块 Page Editor	214
6.2.4	电路设计的后处理	216
6.2.5	元器件符号库和建库模块 (Part Editor)	217
6.2.6	元器件符号标准	218
6.3	电路模拟	222
6.3.1	电路模拟程序的作用和基本结构	222
6.3.2	PSpice 软件的基本电路特性分析功能	227
6.3.3	PSpice 软件的参数扫描分析功能	230
6.3.4	PSpice 软件的统计模拟功能	231
6.3.5	PSpice 软件的逻辑模拟和数模混合模拟功能	233
6.3.6	电路优化设计	235
6.3.7	模拟结果的分析处理——Probe 模块	238
6.4	计算机辅助版图设计	241
6.4.1	版图图形生成	241
6.4.2	版图验证和分析	243
6.4.3	版图数据文件生成	243
6.4.4	微机用版图设计软件 L-EDIT	244
6.4.5	版图数据中间格式 CIF	248
6.5	工艺模拟和器件模拟	253
6.5.1	工艺模拟	253
6.5.2	器件模拟	255
6.6	数字集成电路和系统的 CAD	257
6.6.1	硬件描述语言 HDL(Hardware Description Language)	257
6.6.2	系统级综合	257
6.6.3	逻辑综合	258
6.6.4	硅编译器(Silicon Compiler)	258
6.7	模拟集成电路的 CAD	258
6.7.1	模拟集成电路和系统的特点	259
6.7.2	研究方向	259
6.8	统计模拟和优化设计	261
6.8.1	集成电路的统计模拟	261

---

6.8.2 集成电路的统计设计 .....	261
<b>第 7 章 IC 设计举例与设计实践</b> .....	<b>263</b>
7.1 双极模拟电路设计实例 .....	263
7.1.1 $\mu$ A741 直流工作状态分析 .....	263
7.1.2 $\mu$ A741 运算放大器版图设计分析 .....	266
7.2 CMOS 数字电路设计实例 .....	272
<b>参考文献</b> .....	<b>277</b>

# 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,使得作为信息社会食粮的集成电路得到迅速发展。国民经济信息化、传统产业改造、国家信息安全、民用电子和军用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技的发展。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( $<1\mu\text{m}$ )、深亚微米( $<0.5\mu\text{m}$ )、超深亚微米( $<0.18\mu\text{m}$ )到纳米的方向发展,正逐步进入微观(量子态)态;IC 系统已进入系统集成(System on a Chip, SoC),汇聚传感、信息处理和驱动系统为一体的单个芯片将是发展方向。SoC 和单片的多功能化将是未来相当长的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,微电子技术将不断进步和发展。

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。微电子技术已经广泛地应用于国民经济、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平均每年增长 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。

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 年世界集成电路市场的增幅高达 37%,销售总额已经突破 2 000 亿美元,达到 2 050 亿美元。世界集成电路市场

将在今后几年继续增长,并且会很快突破3 000亿美元,在下一个10年有望突破万亿美元。

1999年国内共生产集成电路41亿块,销售额超过100亿元人民币,仅占世界市场总额的0.8%,在GDP中的比重只达到0.07%,而同期世界半导体销售额占世界GDP总额的3.5%。我国对集成电路的需求近几年来每年以20%的速度上升,国产集成电路只能满足一成的国内需求,大量依靠进口。到2005年需求量和销售额将分别达到360亿块电路和1 000亿元人民币,届时约占世界市场份额的2%。在2005年到2010年之间,预计这种需求增长率还将进一步提高,到2010年中国将成为世界第二大半导体集成电路市场,其需求量和销售额将分别达到700亿块电路和2 500亿元人民币,将占世界市场份额的4%左右,相当于中国目前的生产能力总和的近20倍。

总之,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设计产业大国。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。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。

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版(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。

集成电路包括半导体集成电路和混合集成电路两类。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。为了解决这些器件的稳定性和可靠性问题,第二次世界大战后,在美国的Bell实验室,由W.Shockley、J.Bardeen和W.Brattain研究小组展开了对固体表面的研究。1947年12月23日,该小组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到晶体管时代迈开了第一步。在此基础上,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。

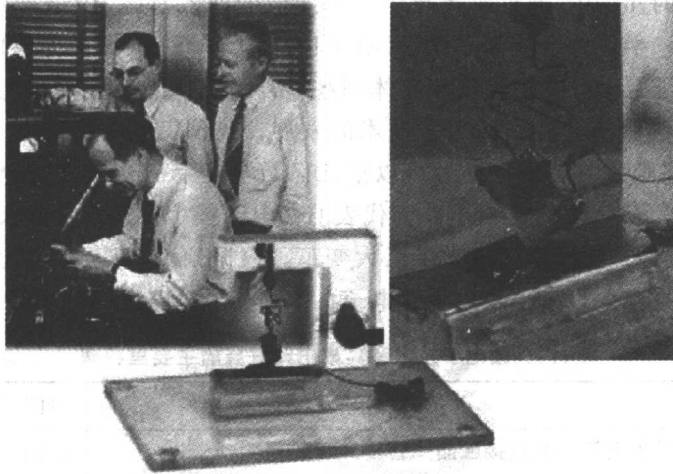


图 1.1 Shockley 三人小组和世界上第一只晶体管  
(三人坐着为 Shockley,后面从左分别为 Bardeen 和 Brattain)

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TI(得州仪器)公司的J. S. Kilby于1958年宣布研制出了第一块IC(当时该电路仅为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。