

新世纪高职高专规划教材

# SEMICONDUCTOR DEVICES

Physics  
and  
Technology  
(Foundation Edition)

# 半导体器件 物理与工艺

[美]施敏 著

赵鹤鸣 钱敏 黄秋萍 译

赵鹤鸣 王子欧 改编

基础版



苏州大学出版社

新世纪高职高专规划教材


# 半导体器件 物理与工艺

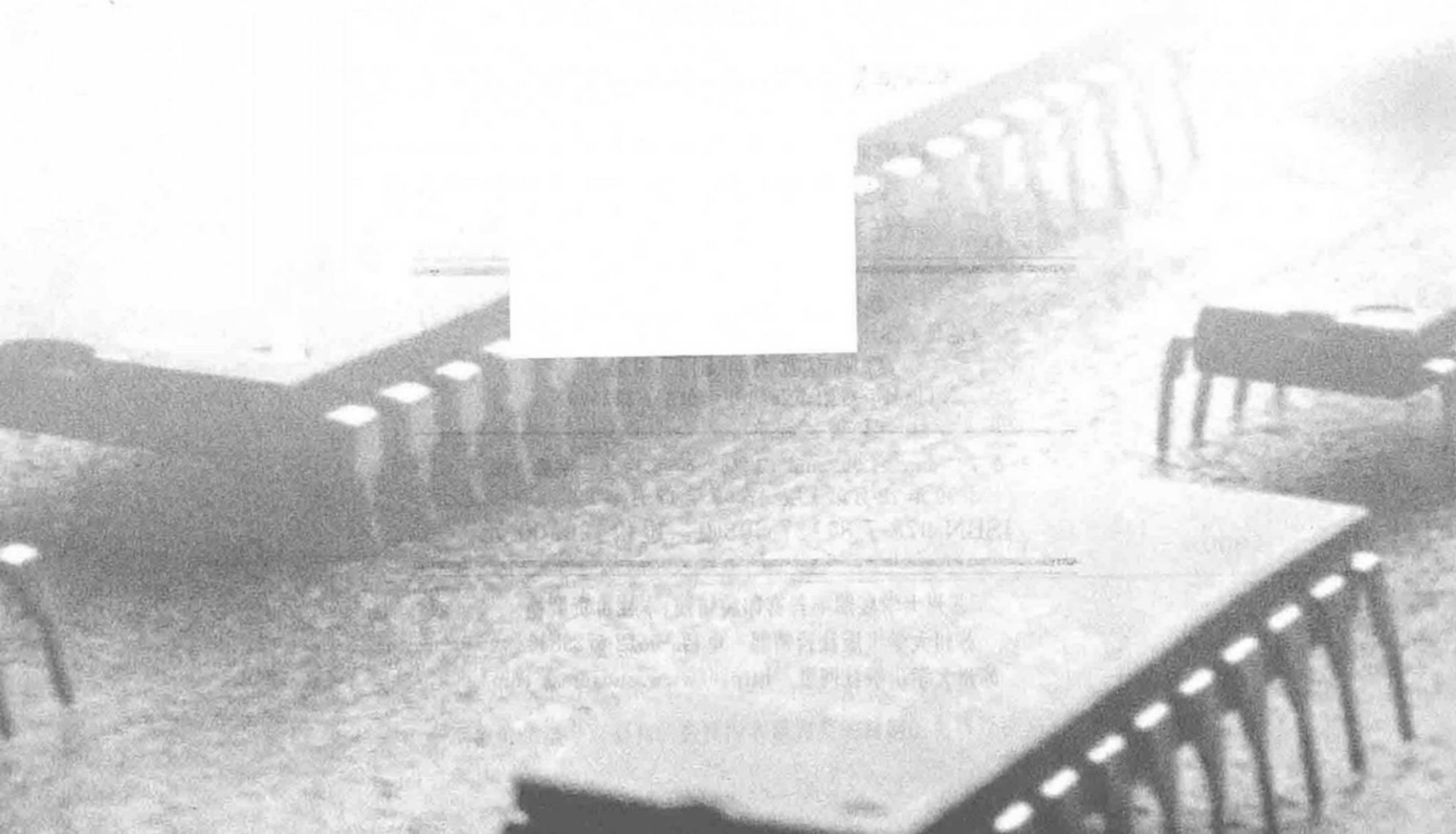
**基础版**

---

[美]施敏 著  
赵鹤鸣 钱敏 黄秋萍 译  
赵鹤鸣 王子欧 改编

---

 苏州大学出版社



## 图书在版编目(CIP)数据

半导体器件物理与工艺:基础版/(美)施敏著;赵鹤鸣,王子欧改编;赵鹤鸣,钱敏,黄秋萍译.—苏州:苏州大学出版社,2009.12  
ISBN 978-7-81137-308-0

I. 半… II. ①施…②赵…③王…④赵…⑤钱…⑥黄…  
III. ①半导体器件—半导体物理②半导体器件—半导体工艺 IV. TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 219751 号

## 半导体器件物理与工艺(基础版)

[美]施 敏 著

赵鹤鸣 钱 敏 黄秋萍 译

赵鹤鸣 王子欧 改编

责任编辑 苏 秦 陈兴昌

---

苏州大学出版社出版发行

(地址:苏州市干将东路 200 号 邮编:215021)

丹阳市教育印刷厂印装

(地址:丹阳市西门外 邮编:212300)

---

开本 787 mm×1 092 mm 1/16 印张 14.5 字数 362 千

2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81137-308-0 定价:29.00 元

---

苏州大学版图书若有印装错误,本社负责调换

苏州大学出版社营销部 电话:0512-67258802

苏州大学出版社网址 <http://www.sudapress.com>

# 前 言

微电子学及其相关技术的迅速发展,现已成为整个信息时代的标志与基础。以半导体器件为核心的电子工业,已发展成为世界上规模最大的工业。培养该专业及相关的专业人才相当重要。施敏教授所著《半导体器件物理与工艺(第二版)》的简体中文版自出版以来,被多所院校相关专业选为本科生和研究生教材,深受使用者的喜爱,得到使用院校极高的评价,现已四次重印。随着职业教育的发展,不少职业院校也开设了半导体、微电子技术、集成电路应用等专业。本书就是在《半导体器件物理与工艺(第二版)》的基础上,为了适应职业教育的培养目标和职业院校学生实际知识水平而修订改编的。

全书分为三个部分:第1部分半导体物理,描述半导体的基本特性和它的传导过程,尤其着重在硅和砷化镓两种最重要的半导体材料上。第2部分半导体器件,讨论主要半导体器件的物理过程和特性。由对大部分半导体器件而言最关键的 p-n 结开始,介绍双极型和场效应器件、热电子和光电子器件、微波及量子器件等。第3部分半导体工艺,介绍从晶体生长到掺杂等工艺技术的各个主要步骤,并特别强调其在集成电路上的应用。

在修订编写过程中,本着突出重点、通俗易懂的原则,叙述的重点放在了基本概念、基本工作原理和实际应用上,尽可能地用浅显易懂的语言表述复杂的道理,而又不失其精髓。同时,省略了繁琐的数学推导,从而使内容更精练、重点更突出。书中为教学实际提供了极大的弹性,各章内容可以单独选择或根据需要组合使用,以满足不同的教学需求。本书参考教学时数为 90 学时。

本书可作为高职高专微电子技术、集成电路应用、电子信息与工程等专业的必修教材,也可作为本科院校相关专业的选修教材,同时也可供半导体器件设计、制造和应用等信息技术领域的科研与工程技术人员阅读与参考。

本书由国际知名微电子技术和半导体器件专家施敏教授所著,苏州大学赵鹤鸣教授、王子欧博士改编,王明湘老师对书中若干错漏之处做了修改。在修订改编过程中得到了施敏教授的授权和具体的指导;苏州工业园区职业技术学院、苏州职业大学、苏州工业职业技术学院、江苏信息职业技术学院、南京信息职业技术学院、常州信息职业技术学院、淮安信息职业技术学院等的一线老师、专家为该书的改编提出了许多宝贵的意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些不足、不妥或有误之处,恳请有关专家和读者批评指正。

# 目 录

## 第 1 章 简介

- 1.1 半导体器件 ..... (1)
- 1.2 半导体工艺技术 ..... (6)
- 总结 ..... (10)
- 参考文献 ..... (11)

## 第 1 部分 半导体物理

---

### 第 2 章 热平衡时的能带和载流子浓度

- 2.1 半导体材料 ..... (14)
- 2.2 基本晶体结构 ..... (17)
- 2.3 基本晶体生长技术 ..... (20)
- 2.4 共价键 ..... (22)
- 2.5 能带 ..... (23)
- 2.6 本征载流子浓度 ..... (26)
- 2.7 施主与受主 ..... (28)
- 总结 ..... (33)
- 参考文献 ..... (34)
- 习题 ..... (34)

### 第 3 章 载流子输运现象

- 3.1 载流子漂移 ..... (37)
- 3.2 载流子扩散 ..... (44)
- 3.3 产生与复合过程 ..... (46)
- 3.4 连续性方程式 ..... (50)
- 3.5 热电子发射过程 ..... (52)
- 3.6 隧穿过程 ..... (53)
- 3.7 强电场效应 ..... (54)
- 总结 ..... (57)
- 参考文献 ..... (57)
- 习题 ..... (58)

## 第 2 部分 半导体器件

---

### 第 4 章 p-n 结

- 4.1 基本工艺步骤 ..... (61)
- 4.2 热平衡状态 ..... (63)
- 4.3 耗尽区 ..... (65)
- 4.4 耗尽层势垒电容 ..... (69)
- 4.5 电流-电压特性 ..... (70)

4.6	电荷储存与暂态响应.....	(76)
4.7	结击穿.....	(78)
	总结.....	(81)
	参考文献.....	(82)
	习题.....	(82)
<b>第5章 双极型晶体管及相关器件</b>		
5.1	晶体管的工作原理.....	(85)
5.2	双极型晶体管的静态特性.....	(90)
5.3	双极型晶体管的频率响应与开关特性.....	(97)
5.4	异质结及相关器件.....	(101)
5.5	可控硅器件及相关功率器件.....	(103)
	总结.....	(105)
	参考文献.....	(106)
	习题.....	(106)
<b>第6章 MOSFET 及相关器件</b>		
6.1	MOS 二极管.....	(109)
6.2	MOSFET 基本原理.....	(118)
6.3	小尺寸 MOSFET.....	(126)
6.4	CMOS 与双极型 CMOS (BiCMOS).....	(127)
6.5	绝缘层上 MOSFET(SOI).....	(129)
6.6	MOS 存储器结构.....	(130)
6.7	功率 MOSFET.....	(133)
	总结.....	(134)
	参考文献.....	(135)
	习题.....	(135)
<b>第7章 光电器件</b>		
7.1	辐射跃迁与光的吸收.....	(137)
7.2	发光二极管.....	(139)
7.3	半导体激光.....	(142)
7.4	光探测器.....	(143)
7.5	太阳能电池.....	(145)
	总结.....	(151)
	参考文献.....	(152)
	习题.....	(152)
<b>第8章 其他半导体器件</b>		
8.1	金半接触.....	(155)
8.2	MESFET.....	(162)
8.3	MODFET 的基本原理.....	(168)

# 目 录

8.4 微波二极管、量子效应和热电子器件·····	(168)
总结·····	(176)
参考文献·····	(177)
习题·····	(178)

## 第 3 部分 半导体工艺

### 第 9 章 集成电路工艺

9.1 基本半导体工艺技术·····	(180)
9.2 集成工艺·····	(186)
9.3 微机电系统·····	(204)
9.4 微电子器件的挑战·····	(208)
总结·····	(212)
参考文献·····	(213)
习题·····	(214)

习题参考答案·····	(216)
-------------	-------

附录 A 符号表·····	(218)
附录 B 国际单位制(SI Units)·····	(220)
附录 C 单位词头·····	(221)
附录 D 物理常数·····	(222)
附录 E 300 K 时重要半导体材料的特性·····	(223)
附录 F 300 K 时硅和砷化镓的特性·····	(224)

# 目 录

# 第1章

## 简介

- ▶ 1.1 半导体器件
- ▶ 1.2 半导体工艺技术
- ▶ 总结

身为一个电机工程、电子工程或材料科学领域的学生,你可能会自问为什么要学习半导体器件? 理由很简单: 因为自从 1998 年以来,电子工业是世界上规模最大的工业,其全球销售量超过 10 万亿美元,而半导体器件正是此工业的基础. 另外,要更深入地了解电子学的相关课程,拥有半导体器件的最基本的知识是必要的,它也可以使你对现代这个由电子技术发展而来的信息时代有所贡献.

本章将包括以下主题:

- 半导体器件中最基础的结构(building block)
- 重要的半导体器件以及它们在电子应用上所扮演的角色
- 重要的半导体技术以及它们在器件制造工艺中所扮演的角色
- 半导体器件有向高密集度、快速、低功率损耗和非挥发性(nonvolatility)发展的技术趋势

### 1.1 半导体器件

图 1.1 显示了半导体电子工业过去 20 年的销售额以及到 2010 年为止的预期销售额,全球国民生产总值(gross world product,GWP)以及汽车、钢铁和半导体工业的销售额也一并列在图中<sup>[1,2]</sup>. 从图中可看出从 1998 年开始,电子工业的销售额已超过汽车工业的销售额. 如果这种趋势持续下去,电子工业的销售额将于 2010 年达到 3 万亿美元,并占全球国民生产总值的 10%. 半导体工业作为电子工业的核心工业,将会以更高的速度成长,并在 21 世纪初超越钢铁工业,且于 2010 年时约占电子工业销售额的 25%.



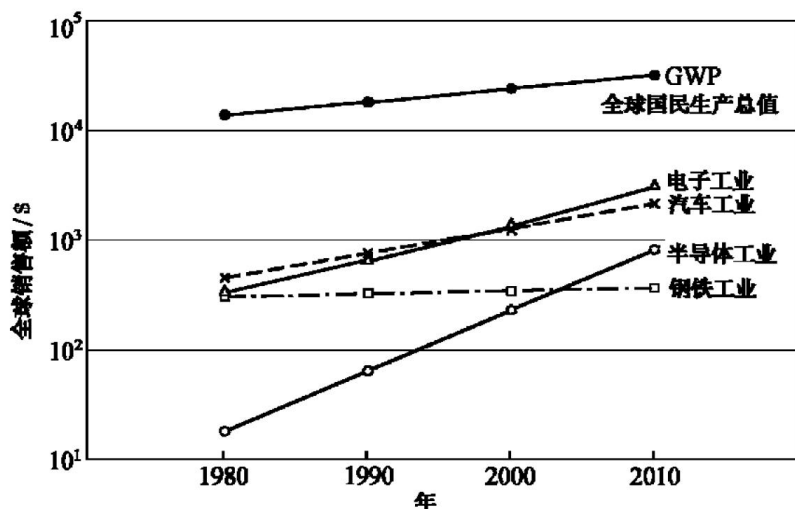


图 1.1 1980~2000 年的全球国民生产总值(GWP)及电子、汽车、半导体和钢铁工业的销售量<sup>[1,2]</sup>

### ► 1.1.1 器件的基础结构

人类研究半导体器件已经超过 125 年<sup>[3]</sup>,迄今大约有 60 种主要的器件以及 100 种和主要器件相关的变异器件<sup>[4]</sup>,但所有这些器件均可由几种基本器件结构所组成。

图 1.2(a)是金属-半导体(metal-semiconductor)接触界面(interface)的示意图,此种界面由金属和半导体两种材料紧密接触所形成.早在公元 1874 年即有人研究这种基础结构,可以说,它开创了半导体器件研究的先河。

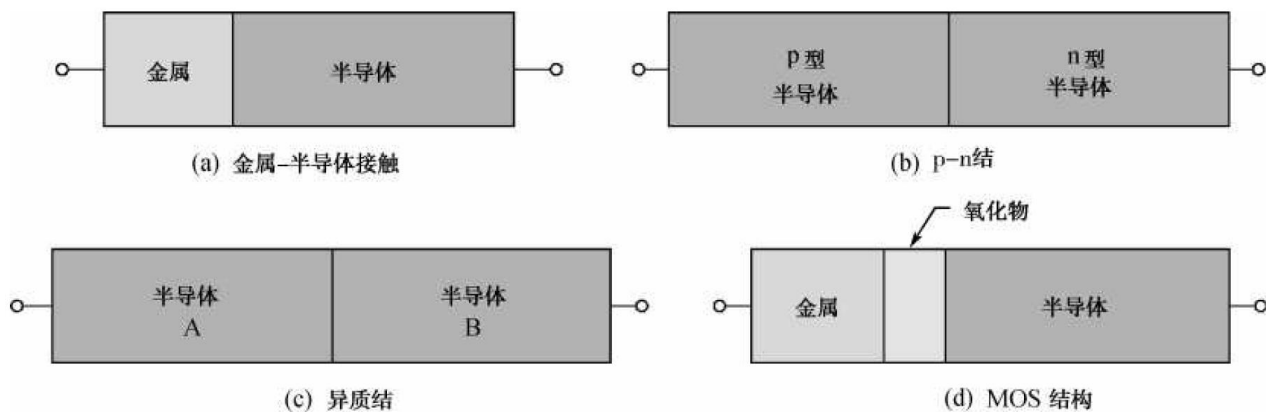


图 1.2 基础器件结构

金属-半导体可以用来做整流接触(rectifying contact),使电流只能由单一方向流过;或者也可以用来做欧姆接触(ohmic contact),使电流可以双向通过,且落在接触上的电压降很小,甚至可以忽略.此种界面可以用来形成很多有用的器件.例如,利用整流接触当做栅极(gate)、利用欧姆接触当做漏极(drain)和源极(source),即形成一个金属-半导体场效应晶体管(metal-semiconductor field-effect transistor, MESFET),这种晶体管是一种很重要的微波器件(microwave device)。

第二种基础结构是 p-n 结(junction),如图 1.2(b)所示,是一种由 p 型(有带正电的载流子)和 n 型(有带负电的载流子)半导体接触形成的结. p-n 结是大部分半导体器件的关键基础结构,其理论也可说是半导体器件物理的基础.如果我们结合两个 p-n 结,再加上另一个 p 型半导体,就可以形成一个 p-n-p 双极型晶体管(p-n-p bipolar transistor).这是一种在

1947年发明的晶体管,它为半导体工业带来了空前的冲击.而如果我们结合三个 p-n 结就可以形成 p-n-p-n 结构,这是一种开关器件(switching device),叫做**可控硅器件**(thyristor).

第三种基础结构是异质结(heterojunction interface),如图 1.2(c)所示,这是由两种不同材料的半导体接触形成的结.例如,我们可以用砷化镓和砷化铝接触来形成一个异质结.异质结是快速器件和光电器件的关键构成要素.

图 1.2(d)显示的是金属-氧化物-半导体(metal-oxide-semiconductor, MOS)结构,这种结构可以视为是金属-氧化物界面和氧化物-半导体界面的结合.用 MOS 结构当做栅极,再用两个 p-n 结分别当做漏极和源极,就可以制作出**金氧半场效应晶体管**(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET).对先进的集成电路而言,要将上万个器件整合在一个集成电路芯片(chip,或译晶粒)中, MOSFET 是最重要的器件.

### ► 1.1.2 主要的半导体器件

表 1.1 依时间先后顺序,列出了一些主要的半导体器件.最早系统地研究半导体器件(金属-半导体接触)的是布朗(Braun)<sup>[5]</sup>,他在 1874 年发现金属和金属硫化物(如铜铁矿, copper pyrite)接触的阻值和外加电压的大小及方向有关.之后在 1907 年,朗德(Round)发现了电致发光效应(即**发光二极管**, light-emitting diode, LED),他观察到当他在碳化硅晶体两端外加 10V 的电压时,晶体会发出淡黄色的光<sup>[6]</sup>.

表 1.1 主要半导体器件

公元	半导体器件 <sup>a</sup>	作者/发明者	参考资料
1874	金属-半导体接触 <sup>b</sup>	Braun	5
1907	发光二极管(LED) <sup>b</sup>	Round	6
1947	双极型晶体管(BJT)	Bardeen, Brattain 及 Shockley	7
1949	p-n 结 <sup>b</sup>	Shockley	8
1952	可控硅器件(thyristor)	Ebers	9
1954	太阳能电池 <sup>b</sup>	Chapin, Fuller 及 Pearson	10
1957	异质结双极型晶体管(HBT)	Kroemer	11
1958	隧道二极管(tunnel diode) <sup>b</sup>	Esaki	12
1960	金氧半场效应晶体管(MOSFET)	Kahng 及 Atalla	13
1962	激光 <sup>b</sup>	Hall 等	15
1963	异质结激光 <sup>b</sup>	Kroemer, Alferov 及 Kazarinov	16, 17
1963	转移电子二极管(TED) <sup>b</sup>	Gunn	18
1965	碰撞电离雪崩渡越时间二极管(IMPATT diode) <sup>b</sup>	Johnston, Deloach 及 Cohen	19
1966	金半场效应晶体管(MESFET)	Mead	20
1967	非挥发性半导体存储器(NVSM)	Kahng 及施敏	21
1970	电荷耦合元件(CCD)	Boyle 及 Smith	23
1974	共振隧道二极管 <sup>b</sup>	张立纲, Esaki 及 Tsu	24
1980	调制掺杂场效应晶体管(MODFET)	Mimura 等	25
1994	室温单电子存储器(SEMC)	Yano 等	22
2001	15nm 金氧半场效应晶体管	Yu 等	14

注:上标 a 表示 MOSFET; metal-oxide-semiconductor field-effect transistor.

MESFET; metal-semiconductor field-effect transistor.

MODEFET; modulation-doped-semiconductor field-effect transistor.

上标 b 表示的是两端点(two-terminal)器件,其他的是三端点或四端点器件<sup>[3]</sup>.

1947年巴丁(Bardeen)和布莱登(Brattain)<sup>[7]</sup>发明了点接触(point-contact)晶体管.接着在1949年肖克莱(Shockley)<sup>[8]</sup>发表了关于p-n结和双极型晶体管的经典论文.图1.3就是有史以来的第一个晶体管,在三角形石英晶体底部的两个点接触是由相隔 $50\mu\text{m}$ 的金箔线压到半导体表面做成的,所用的半导体材料为锗;当一个接触正偏(forward biased,即相对于第三个端点加正电压),而另一个接触反偏(reverse biased)时,可以观察到把输入信号放大的晶体管行为(transistor action).双极型晶体管是一个关键的半导体器件,它把人类文明带进了现代电子时代.

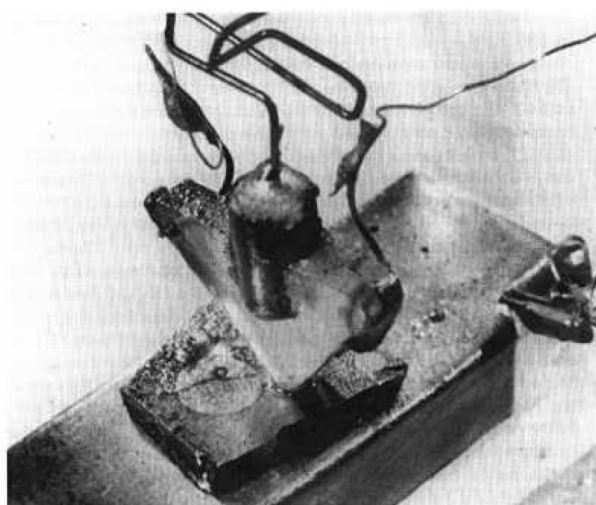


图 1.3 历史上第一个晶体管<sup>[7]</sup>  
(由贝尔实验室提供照片)

1952年伊伯斯(Ebers)<sup>[9]</sup>为极端复杂的开关器件——可控硅器件(thyristor)提出了一个基本的模型.以硅p-n结制成的太阳能电池(solar cell)则在1954年被阙平(Chapin)等人<sup>[10]</sup>发明.太阳能电池是目前获得太阳能最主要的技术之一,因为它可以将太阳光直接转换成电能.1957年,克罗默(Kroemer)<sup>[11]</sup>提出了用异质结双极型晶体管(heterojunction bipolar transistor, HBT)来改善晶体管的特性,这种器件成为更快速的半导体器件.1958年江崎(Esaki)<sup>[12]</sup>则观察到重掺杂(heavily doped)的p-n结具有负电阻的特性,此发现促成了隧道二极管(tunnel diode,或译穿透二极管)的问世.隧道二极管以及所谓的隧穿现象(tunneling phenomenon,或译穿透现象)对薄膜间的欧姆接触或载流子穿透理论有很大的贡献.

对先进的集成电路而言,最重要的器件是1960年由姜(Kahng)及亚特拉(Atalla)<sup>[13]</sup>发明的MOSFET.图1.4就是第一个用高温氧化硅衬底(substrate)做成的器件,它的栅极长度(gate length)是 $25\mu\text{m}$ ,栅极氧化层(gate oxide)厚度是 $100\text{nm}$ ,两个小洞是源极和漏极的接触孔(contact hole),而最上面瘦长形的区域是由金属掩蔽层(metal mask)定义出来的铝栅极(aluminum gate).虽然目前MOSFET已经缩小(scaled down)到深亚微米(deep-submicron)的范围,但是当初第一个MOSFET所采用的硅衬底和高温氧化层,仍然是目前最常用的最佳组合.

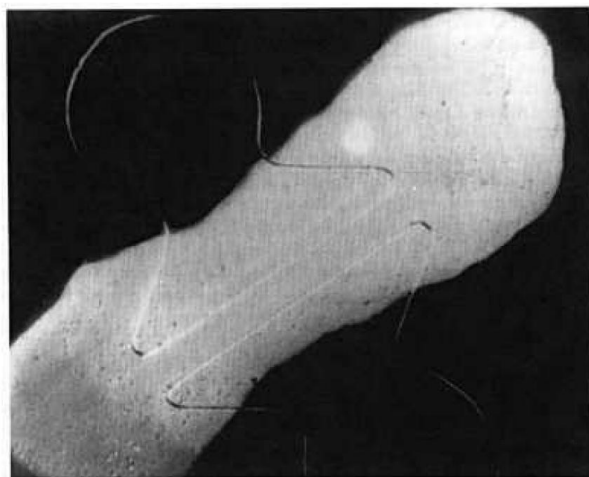


图 1.4 历史上第一个 MOSFET<sup>[13]</sup>  
(由贝尔实验室提供照片)

MOSFET和与其相关的集成电路更占有半导体市场的90%的份额.最近,一个沟道长度只有 $15\text{nm}$ 的超小型MOSFET已经被制造出来了<sup>[14]</sup>,它将可以被应用在最先进的、含有超过1兆个器件的集成电路芯片上.

1962年霍尔(Hall)等人<sup>[15]</sup>第一次用半导体做出了激光(laser),到1963年克罗默(Kroemer)<sup>[16]</sup>、阿法罗(Alferov)和卡查雷挪(Kazarinov)<sup>[17]</sup>发现了异质结激光(heterostructure

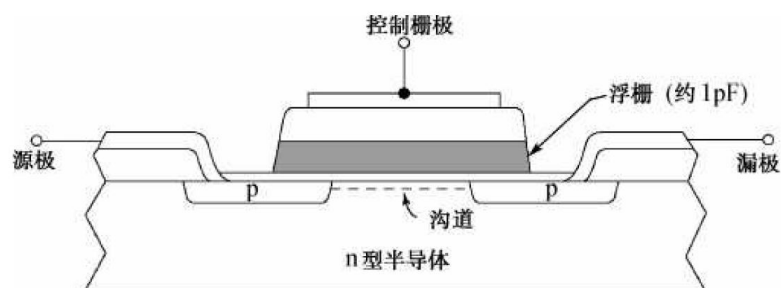
laser). 这些发现、发明奠定了现代激光二极管的基础,使激光可以在室温下连续工作. 激光二极管后来被广泛地应用到数字光碟、光纤通信、激光影印和空气污染侦测等方面.

接下来三年中,三种重要的微波器件相继被发明制造出来. 第一种是冈(Gunn)<sup>[18]</sup>在1963年提出的**转移电子二极管**(transferred-electron diode, TED),又称为冈二极管(Gunn diode),这种器件被广泛应用到侦测系统(detection system)、远程控制(remote control)和微波测试仪器(microwave test instrument)等毫米波应用上. 第二种器件是姜士敦(Johnston)<sup>[19]</sup>等人发明的**碰撞电离雪崩渡越时间二极管**(IMPATT diode),它是目前可以在毫米波频率下产生最高的连续波(continuous wave, CW)功率的器件,被应用到雷达系统和警报系统上. 第三种器件就是**金半场效应晶体管(MESFET)**<sup>[20]</sup>,它在1966年由密德(Mead)发明,并成为单片微波集成电路(monolithic microwave integrated circuit, MMIC)的关键器件.

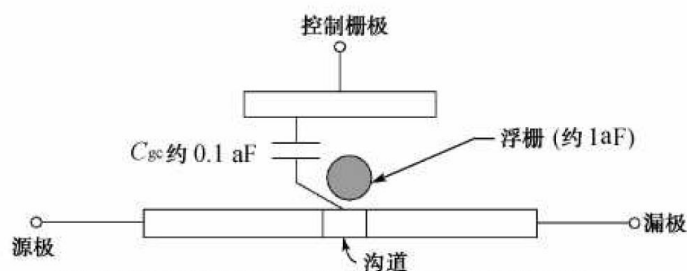
1967年姜(Kahng)和施敏<sup>[21]</sup>发明了一个重要的半导体存储器件,它是一种**非挥发性半导体存储器**(nonvolatile semiconductor memory, NVSM),可以在电源关掉以后,仍然保持其储存的信息. 图1.5(a)是第一个非挥发性半导体存储器的示意图,虽然它跟MOSFET很相似,但是最大的区别在于它多了一个**浮栅极**(floating gate,或译**浮动栅极**,**悬浮栅极**),可以用来半永久性地存储电荷. 因为非挥发性半导体存储器具有非挥发性、高器件密度、低功率损耗和可电重写性(electrical rewritability,即存储电荷可通过控制栅极外加电压移除)等特点,它成为应用于便携式电子系统如手机、笔记本电脑、数码相机和智能卡方面最主要的存储器.

另一个使用浮栅极非挥发性存储器的例子是**单电子存储器**(single-electron memory cell, SEMC),如图1.5(b)所示. 它其实就是将浮栅极的长度缩小到极小的尺寸(如10nm)所产生的器件. 在这种尺寸下,只要一个电子移到浮栅极,浮栅极的电压就会改变,并且排斥另一个电子的进入. 这可以说是浮栅极存储器的极限,因为只需一个电子就可以存储信息. 1994年,Yano等人<sup>[22]</sup>第一次发明了可在室温下工作的单电子存储器,相信单电子存储器可以成为存储1Tb( $10^{12}$  bits)最先进的半导体存储器的基础.

**电荷耦合器件**(charge-coupled device, CCD)是波意尔(Boyle)和史密斯(Smith)<sup>[23]</sup>在1970年发明的,它被大量地用于手提式摄像机(video camera)和光检测系统上. 1974年张立



(a) 第一个具有浮栅极的非挥发性半导体存储器<sup>[21]</sup>



(b) 非挥发性半导体存储器的极限-单电子存储单元<sup>[22]</sup>

图 1.5 非挥发性存储器

纲等人<sup>[24]</sup>发明了共振式隧道二极管(resonant tunneling diode, RTD)<sup>[24]</sup>,它是大部分量子效应(quantum-effect)器件的基础.量子效应器件因为可以在特定电路功能下,大量地减少器件数量,所以具有超高密集度、超高速及更强的功能.1980年,Minura<sup>[25]</sup>等人发明了调制掺杂场效应晶体管(modulation-doped field-effect transistor, MODFET),如果选择适当的异质结材料,这将会是更快速的场效应晶体管.

从1947年发明双极型晶体管以来,各式各样的新型半导体器件凭着更先进的技术、更新的材料和更深入的理论被发明或提出.在本书的第2部分,我们将详述列在表1.1中的器件,也希望根据本书,读者能对其他没有包括进来或甚至目前尚未发明的器件有所了解.

## 1.2 半导体工艺技术

### ► 1.2.1 一些关键的半导体技术

很多重要的半导体技术其实是由好几个世纪以前就发明的工艺技术延伸而来的.例如,1798年就已经发明了图形曝光(lithography)工艺<sup>[26]</sup>,只是当初影像图形是从石片转移过来的.在这一节里,我们将叙述各种首次被应用到半导体工艺中或是为制作半导体器件而被研发出来的具有里程碑意义的技术.

一些关键的半导体技术依其问世时间的先后顺序列在表1.2之中.

表 1.2 一些关键的半导体技术

公元	技 术	作者/发明者	参考资料
1918	柴可拉斯基晶体生长	Czochralski	27
1925	布理吉曼晶体生长	Bridgman	28
1952	III-V族化合物	Welker	29
1952	扩散	Pfann	31
1957	图形曝光抗蚀剂	Andrus	32
1957	氧化物掩蔽层	Frosch 及 Derrick	33
1957	化学气相淀积(CVD)外延生长	Sheftal、Kokorish 及 Krasilov	34
1958	离子注入	Shockley	35
1958	混合型集成电路	Kilby	36
1959	单片集成电路	Noyce	37
1960	平面化工艺	Hoerni	38
1963	互补式金氧半场效应晶体管(CMOS)	Wanlass 及 Sah	39
1967	动态随机存储器(DRAM)	Dennard	40
1969	多晶硅自对准栅极	Kerwin、Klein 及 Sarace	41
1969	金属有机化学气相淀积(MOCVD)	Manasevit 及 Simpson	42
1971	干法刻蚀	Irving、Lemons 及 Bobos	43
1971	分子束外延	Cho	44
1971	微处理器(4004)	Hoff 等	45
1982	沟槽隔离	Rung、Momose 及 Nagakubo	46
1989	化学机械抛光	Davari 等	47
1993	铜布线	Paraszczak 等	48

注: CVD: chemical vapor deposition. DRAM: dynamic random access memory. MOCVD: metal organic CVD.

CMOS: complementary metal-oxide-semiconductor field-effect transistor.

1918年柴可拉斯基(Czochralski)<sup>[27]</sup>发明了一种液态-固态单晶生长的技术,柴可拉斯基法到如今仍广泛应用于大部分硅晶片(silicon wafer,或译硅晶圆)晶体的生长.另一种生长技术是在1925年由布理吉曼(Bridgman)<sup>[28]</sup>发明的,它被大量用于砷化镓和一些化合物半导体的晶体生长.虽然早在20世纪40年代起,硅半导体的材料特性就已引起广泛的研究,但有关化合物半导体特性的研究却被忽略了很久,直到1952年魏可(Welker)<sup>[29]</sup>发现砷化镓和其他的Ⅲ-V族元素(Ⅲ-V compound)也是半导体材料,并以实验证明这些材料的半导体特性之后,相关这些化合物半导体的技术和器件才陆续被深入研究.

对半导体工艺而言,杂质原子(dopant)的扩散(diffusion)是一种很重要的现象.1855年飞克(Fick)<sup>[30]</sup>提出了基本扩散理论.1952年范恩(Pfann)<sup>[31]</sup>在其专利中提及利用扩散技术来改变硅的电导率的想法.1957年安卓斯(Andrus)<sup>[32]</sup>把古老的图形曝光技术应用在半导体器件的制作上,他利用一些感光而且抗刻蚀的聚合物(即光阻)来做图形的转移.图形曝光是半导体工业中的一个关键性的技术.半导体工业之所以能够持续地快速成长,要归功于不断改善的图形曝光技术.就经济层面来考虑,图形曝光也扮演着一个很重要的角色,因为在目前集成电路的制造成本中,图形曝光的成本就占了35%以上.

1957年弗洛区(Frosch)和德利克(Derrick)<sup>[33]</sup>提出氧化物掩蔽层方式(oxide masking method),他们发现氧化层可以防止大部分杂质的扩散穿透.同年,雪弗塔(Sheftal)<sup>[34]</sup>等人提出化学气相淀积(chemical vapor deposition, CVD)外延生长(epitaxial growth)技术.外延生长的字源来自于希腊字EPI(即on,上方)和TAXIS(即arrangement,安排),它被用来描述一种可以在具有晶格结构的晶体表面上,生长出一层半导体晶体薄膜的技术,这种技术对改善器件特性或制造新颖结构器件而言非常重要.

1958年肖克莱(Shockley)<sup>[35]</sup>提出了用离子注入(ion implantation)技术来掺杂半导体,这种技术可以精确地控制掺杂原子的数目.从此扩散和离子注入两种技术可以相辅相成,用来产生杂质的掺杂.例如,扩散可以用在高温的深结(deep-junction)工艺中,而离子注入则可以在低温工艺中,形成浅结(shallow-junction)的掺杂区域.

1959年科比(Kilby)<sup>[36]</sup>提出集成电路的雏型,它包含了一个BJT、三个电阻和一个电容,所有的器件都由锗做成,而且由接线相连成一个混合的电路.1959年诺依斯(Noyce)<sup>[37]</sup>提出一个在单一半导体衬底上做成的集成电路,如图1.6所示,这是有史以来的第一个单片(monolithic)集成电路,它包含了六个器件组成的触发器(flip-flop)电路.其中铝导线是利用图形曝光技术将整个氧化层表面上的蒸镀铝刻蚀而形成的.这项发明奠定了微电子工业快速成长的基础.

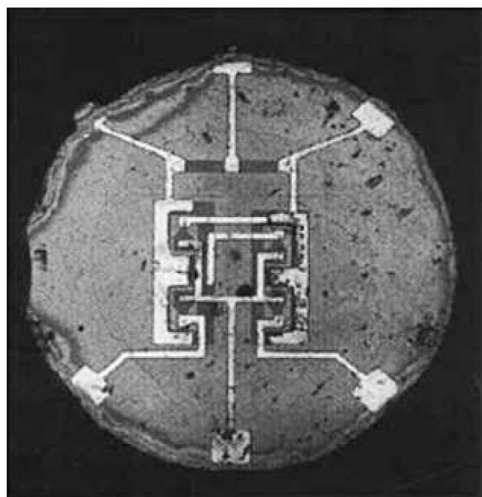


图 1.6 第一个单片集成电路<sup>[37]</sup>(照片由 G. Moore 博士提供)

平面(planar)工艺则在1960年由荷尼(Hoerni)<sup>[38]</sup>提出,在这项技术中,整个半导体表面先生成一层氧化层,再用图形曝光刻蚀工艺,将部分的氧化层移除,并留下一个窗口(window),然后将杂质透过窗口掺杂到半导体表面后形成了p-n结.

随着集成电路复杂度的增加,我们由NMOS(n沟道MOSFET)技术转移到CMOS(CMOSFET)技术,亦即将NMOS和PMOS(p沟道MOSFET)组合,形成逻辑器件(logic

device). CMOS 的观念在 1963 年由万雷斯(Wanlass)和萨支唐(Sah)<sup>[39]</sup>提出,它的优点是 CMOS 只有在逻辑状态转换时(如从 0 到 1)才会产生大电流,而在稳定状态时只有极小的电流流过,所以当应用在逻辑电路上面时,逻辑电路的功率耗损可以大幅度减少.对先进集成电路而言,CMOS 技术是最主要的技术.

1967 年丹纳(Dennard)<sup>[40]</sup>发明了一项由两个器件组成的极重要的电路,即**动态随机存储器**(dynamic random access memory, DRAM). 这种存储单元器件包含了一个 MOSFET 和一个存储电荷的电容,其中 MOSFET 作为使电容充电或放电的开关.虽然动态随机存储器是挥发性的,而且会消耗相当大的功率,但在可预见的未来,它仍然会是各式各样存储器应用在非便携式(non-portable)电子系统中的第一选择.

为了改善器件的特性,柯文(Kerwin)<sup>[41]</sup>等人在 1969 年提出了多晶硅自对准栅极工艺,这个工艺不但改善了器件的可靠性,还降低了寄生电容.同年,门纳赛维(Manasevit)和辛浦生(Simpson)<sup>[42]</sup>提出了金属有机化学气相淀积技术(metal organic chemical vapor deposition, MOCVD).对化合物半导体(如砷化镓)而言,这是一种非常重要的外延技术.

当器件的尺寸变小,为了增加图形转移的可靠度,干法刻蚀(dry etching)技术取代了湿法腐蚀技术.1971 年尔文(Irving)等人<sup>[43]</sup>提出,利用  $CF_4-O_2$  的混合气体来刻蚀硅晶片.同年,卓以和(Cho)<sup>[44]</sup>提出了另一项重要的技术,即分子束外延(molecular beam epitaxy, MBE)技术,这种技术可以近乎完美地控制原子的排列,所以也可以控制外延层在垂直方向的组成和掺杂浓度.这项技术也带来了许多光器件和量子器件的发明.

1971 年第一个微处理器(microprocessor)被霍夫(Hoff)等人<sup>[45]</sup>制造出来,他们将一个简单电脑的中央处理单元(central processing unit, CPU)放在一个芯片上,这就是如图 1.7 所示的四位微处理器(Intel 4004),其芯片大小是  $3\text{mm} \times 4\text{mm}$ ,并且包含了 2 300 个 MOSFET.它由 p 型沟道多晶硅栅极工艺做成,设计规范(design rule)是  $8\ \mu\text{m}$ .这个微处理器的功能可与 20 世纪 60 年代早期 IBM 价值 300 000 美元的计算机的功能相提并论,而这些早期计算机需要一个书桌大小的中央处理单元.这是半导体工业上一个重大的突破.

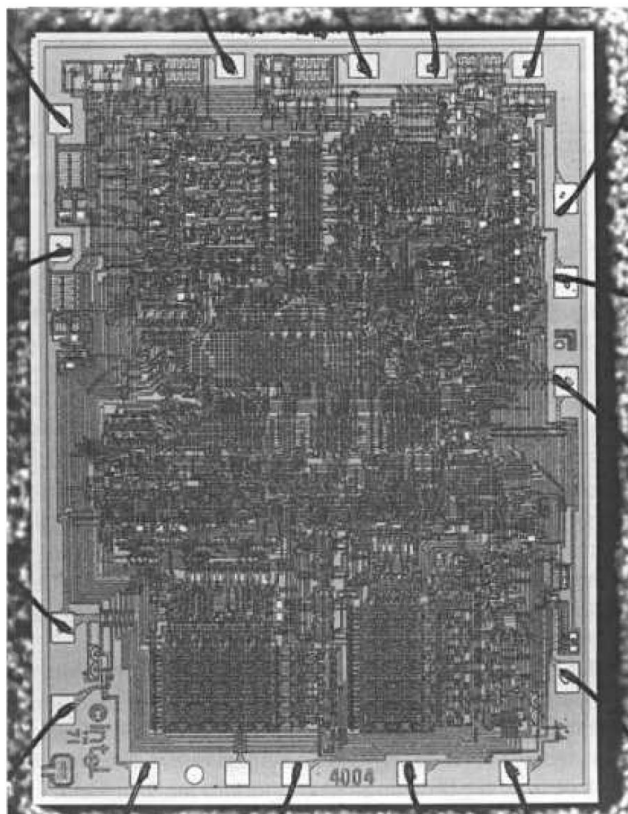


图 1.7 第一个微处理器<sup>[45]</sup>(照片由 Intel 公司提供)

从 20 世纪 80 年代早期起,很多新的技术陆续产生以跟上器件尺寸缩小后的要求,我们认为三个关键的技术是:沟槽式隔离(trench isolation)、化学机械抛光(chemical-mechanical polishing, CMP)和铜布线.沟槽式绝缘技术是在 1982 年由朗(Rung)等人<sup>[46]</sup>提出,用以隔绝 CMOS 器件.目前这种方法几乎已取代所有其他的绝缘技术.而 1989 年达阔利(Davari)等人<sup>[47]</sup>提出了化学机械抛光方法,以得到各层介电层的全面平坦化(global planarization),这

是多层金属布线(multi-level metallization)的关键技术. 在亚微米器件中, 有一种很有名的故障机制即电致迁移(electromigration)——当电流通过导线时使导线的金属离子迁移; 虽然铝自 20 世纪 60 年代早期起就已经被用做导线材料, 但它在大电流下却有很严重的电致迁移情形. 1993 年帕拉查克(Paraszcak)等人<sup>[48]</sup>提出了在尺寸长度小到 100 nm 时, 以铜导线取代铝导线的想法. 在本书的后续部分, 我们将陆续介绍列在表 1.2 中的技术.

### ► 1.2.2 技术趋势

自从进入微电子时代之后, 集成电路的最小线宽或最小特征尺寸(feature length)就以每年 13% 的速度缩小<sup>[49]</sup>. 在这一速度下, 2010 年时最小特征尺寸会缩小到 50 nm. 器件微小化可以降低每种电路功能的单位成本(unit cost). 例如, 对持续推进的新一代的动态随机存储器而言, 每个存储器位的成本每两年就减少了一半. 当器件的尺寸缩小时, 本征开关时间(intrinsic switching time)也随之减少. 器件速度从 1959 年以来, 加快了四个量级, 变快的速度也扩展了集成电路的功能性生产速度(functional throughput rate). 未来数字集成电路将可以以每秒一兆位的速率进行信息处理和数值分析. 器件变得越小, 其所消耗的功率也越少, 所以器件微小化也可以降低每次开关操作所需的能量. 从 1959 年至今, 每个数字栅极的能量耗损已经减少了超过 100 万倍.

图 1.8 显示, 从 1978 年动态随机存储器初次批量生产到 1999 年止, 实际动态随机存储器的密度呈指数上升, 每 18 个月密度就增加为两倍. 照这个速度下去, 可以预期在 2012 年时, 动态随机存储器的密度会达 640 亿位. 图 1.9 显示微处理器运算能力随时间按指数增加, 同样也是每 18 个月增加为两倍的速率. 目前一个奔腾(Pentium)系列的个人计算机和 20

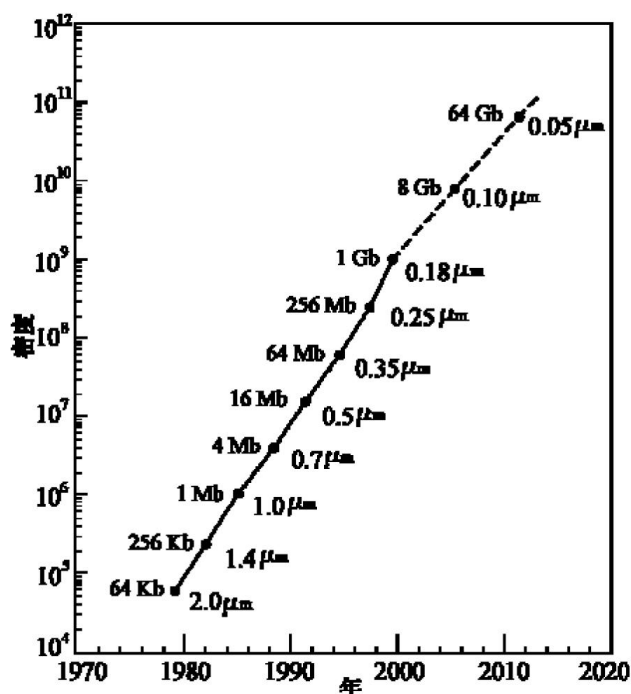


图 1.8 动态随机存储器密度在 SIA (Semiconductor Industry Association) Roadmap 上呈现指数上升<sup>[49]</sup>



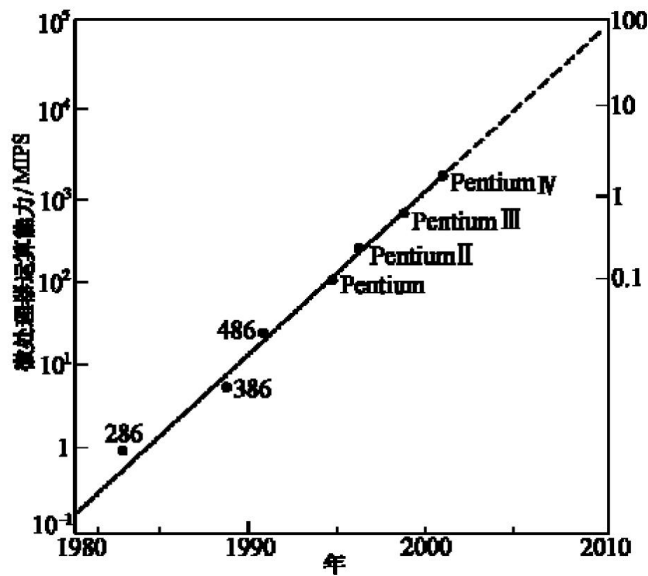
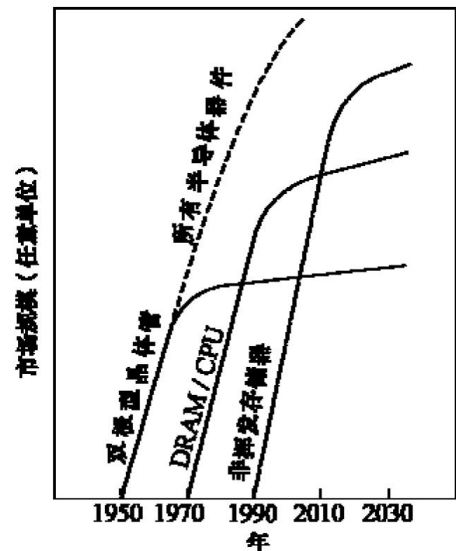


图 1.9 微处理器运算能力每年呈指数增加

世纪 60 年代晚期的超级计算机克莱一型(CRAY 1)有相同的运算能力,但它的体积却为原先的千分之一。

图 1.10 绘出了不同技术的市场成长曲线<sup>[50]</sup>。在现代电子时代初期(1950~1970 年),双极型晶体管是技术的驱动力;1970~1990 年,因为个人计算机和先进电子系统的快速成长,动态随机存储器和以 MOSFET 为主的微处理器扮演了技术驱动力的角色;1990 年以后,因便携式电子系统的快速成长,非挥发性半导体存储器已成为技术的驱动力。

图 1.10 不同技术的成长曲线<sup>[50]</sup>

## 总 结

虽然半导体器件领域是较新的研究领域\*,它对我们的社会和全球的经济却有巨大的影响,这是因为半导体器件构成了世界上最大的工业——电子工业。

在本章中,我们已经介绍了几个主要半导体器件的历史回顾:从 1874 年第一个金属-半导体接触的研究,到 2001 年 15 nm 超小 MOSFET 的制造.其中最重要的是 1947 年双极型晶体管的发明,它将人类带进了现代电子时代;1960 年提出的 MOSFET 则成为集成电路中最重要的器件;还有 1967 年发明的非挥发性存储器,它从 1990 年以后就成为电子工业的技术驱动力。

我们也描述了关键的半导体技术,许多技术的起源可以追溯到 18 世纪末和 19 世纪初.其中最重要的是 1957 年发展的图形曝光抗蚀剂,建立了半导体器件图形转移工艺的基础;

\* 从 19 世纪早期开始,人们就已经开始研究半导体器件和材料,但是其实很多相关传统器件材料的研究开始得更早.例如,在公元前 1200 年(即距今超过 3 000 年前)人类就已经开始研究钢了。