

全国高等职业教育规划教材

# 微电子技术概论

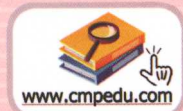
孟祥忠 主编



WEIDIANZI JISHU GAILUN



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

赠电子课件

全国高等职业教育规划教材

# 微电子技术概论

主 编 孟祥忠  
副主编 赵丽芳 夏江华 王 静  
参 编 李宁宁 王晓袁 袁 涛  
主 审 殷建国



机械工业出版社

本书为微电子技术专业的入门教材。主要内容包括微电子科学技术的发展历程及微电子学的特点, 半导体物理与器件基础, 集成电路基础, 集成电路制造工艺, 集成电路的设计, 集成电路设计的 CAD 系统以及系统芯片设计。

本书内容安排合理, 坚持“实用为主, 够用为度”的原则, 结构清晰, 语言通俗易懂。通过本书的学习, 既对微电子学有一个全面的、概要的了解, 学习后又不觉得肤浅, 并把微电子学领域的一些最新观点、最新成果涵盖其中。

本书可作为高职高专电子信息类、电气类各专业的教材, 也可供微电子技术专业人员参考。

为方便教学, 本书配有免费电子课件, 凡选用本书作为教材的学校, 均可来电索取, 咨询电话: 010-88379375; E-mail: cmpgaozhi@sina.com。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

微电子技术概论/孟祥忠主编. —北京: 机械工业出版社, 2009. 9  
全国高等职业教育规划教材  
ISBN 978-7-111- 27805- 4

I. 微… II. 孟… III. 微电子技术—高等学校: 技术学校—教材  
IV. TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 124371 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
策划编辑: 于宁 责任编辑: 曹雪伟 版式设计: 霍永明  
责任校对: 刘志文 封面设计: 马精明 责任印制: 杨曦  
北京中兴印刷有限公司印刷  
2009 年 9 月第 1 版第 1 次印刷  
184mm × 260mm · 10 印张 · 243 千字  
0 001—4 000 册  
标准书号: ISBN 978-7-111- 27805- 4  
定价: 18.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
销售服务热线电话: (010)68326294  
购书热线电话: (010)88379639 88379641 88379643  
编辑热线电话: (010)88379758  
封面无防伪标均为盗版

# 前 言

自 20 世纪 50 年代晶体管诞生以来，微电子技术发展异常迅速，目前已进入超大规模集成电路和系统集成时代，微电子已经成了整个信息时代的标志和基础。可以毫不夸张地说，没有微电子技术就没有今天的信息社会。

各种电子系统都需要大量的集成电路芯片，这样，除了从事微电子专业的人员之外，其他相关专业如计算机、电子学、自动控制、通信等领域的人员都非常需要和渴望了解微电子知识。该课程的主要目的是使学生对微电子学的基本知识有一个比较系统、全面的了解和认识。这对于培养新型信息领域的人才是非常重要的。该课程的另一个目的是使刚入校不久的微电子专业的学生了解什么是微电子、微电子的研究领域是什么，通过该课程对微电子有一个全面的、概要的了解，培养对微电子的兴趣。在编写这本教材时，我们依据两个原则：第一是通过本书的学习，能够对微电子学有一个全面的、概要的了解；第二是即使是让业内人士读完之后也不觉得肤浅，要能体现出微电子学发展极为迅速的特点，并把微电子学领域的一些最新观点、最新成果涵盖其中。

本教材由大连职业技术学院的孟祥忠任主编并统稿，其中：第 1 章、第 2 章由赵丽芳（南京信息职业技术学院）、孟祥忠编写，第 3 章由袁涛（四川工程职业技术学院）编写，第 4 章由夏江华（四川航天职业技术学院）、孟祥忠编写，第 5 章及第 7 章由王晓袁（大连东软信息学院）、王静（大连职业技术学院）编写，第 6 章由李宁宁（大连东软信息学院）编写，附录由王静编写。

本书在编写过程中得到了北京大学软件与微电子学院院长张兴的热情指导和帮助，在此表示感谢。

编 者

# 目 录

|                        |    |                                 |    |
|------------------------|----|---------------------------------|----|
| 前言                     |    | 习题二                             | 35 |
| <b>第1章 绪论</b>          | 1  | <b>第3章 集成电路基础</b>               | 36 |
| 1.1 微电子科学技术的发展历程       | 1  | 3.1 概述                          | 36 |
| 1.1.1 晶体管的发明           | 1  | 3.1.1 集成电路的分类                   | 36 |
| 1.1.2 集成电路的发展历史及规律     | 3  | 3.1.2 集成电路的发展史                  | 37 |
| 1.1.3 我国微电子技术的发展概况     | 5  | 3.1.3 集成电路制造简介                  | 39 |
| 1.2 微电子学的特点            | 7  | 3.2 双极型晶体管集成电路基础                | 39 |
| 习题一                    | 8  | 3.2.1 平面双极型晶体管的结构               | 40 |
| <b>第2章 半导体物理与器件基础</b>  | 9  | 3.2.2 双极型晶体管模拟集成电路              | 41 |
| 2.1 半导体的特性             | 9  | 3.2.3 双极型晶体管数字集成电路              | 42 |
| 2.1.1 半导体材料            | 9  | 3.3 场效应晶体管集成电路基础                | 45 |
| 2.1.2 半导体的晶格结构         | 10 | 3.3.1 集成电路中的场效应晶体管              | 45 |
| 2.1.3 半导体能带结构          | 12 | 3.3.2 MOS集成电路                   | 46 |
| 2.1.4 半导体的导电性          | 14 | 3.3.3 CMOS集成电路                  | 49 |
| 2.2 半导体中的载流子           | 16 | 3.3.4 BiCMOS集成电路                | 51 |
| 2.2.1 本征半导体            | 16 | 习题三                             | 52 |
| 2.2.2 杂质半导体            | 16 | <b>第4章 集成电路制造工艺</b>             | 53 |
| 2.2.3 半导体中载流子的统计分布     | 18 | 4.1 工艺技术                        | 53 |
| 2.3 PN结                | 20 | 4.2 基本工艺步骤                      | 53 |
| 2.3.1 平衡状态下的PN结        | 21 | 4.3 CMOS集成电路的工艺流程               | 56 |
| 2.3.2 PN结的单向导电性        | 23 | 4.4 氧化                          | 57 |
| 2.3.3 PN结的伏-安特性        | 24 | 4.4.1 SiO <sub>2</sub> 的性质及其作用  | 57 |
| 2.3.4 PN结的击穿           | 24 | 4.4.2 热氧化形成SiO <sub>2</sub> 的机理 | 58 |
| 2.3.5 PN结电容            | 26 | 4.4.3 SiO <sub>2</sub> 的制备方法    | 58 |
| 2.3.6 异质PN结            | 27 | 4.4.4 高温炉设备                     | 60 |
| 2.4 双极型晶体管             | 27 | 4.4.5 热氧化工艺                     | 60 |
| 2.4.1 双极型晶体管的基本结构      | 27 | 4.5 光刻                          | 60 |
| 2.4.2 双极型晶体管的直流放大原理    | 28 | 4.5.1 光刻工艺简介                    | 61 |
| 2.4.3 双极型晶体管的直流特性      | 30 | 4.5.2 几种常见的光刻方法                 | 61 |
| 2.4.4 双极型晶体管的反向电流和击穿电压 | 30 | 4.5.3 超细线条光刻技术                  | 62 |
| 2.4.5 双极型晶体管的频率特性      | 31 | 4.6 刻蚀                          | 63 |
| 2.5 MOS场效应晶体管          | 31 | 4.7 扩散                          | 64 |
| 2.5.1 MOS场效应晶体管的基本结构   | 32 | 4.7.1 扩散的基本原理                   | 64 |
| 2.5.2 MOS场效应晶体管的工作原理   | 32 | 4.7.2 扩散工艺                      | 65 |
| 2.5.3 MOS场效应晶体管的直流特性曲线 | 34 | 4.8 离子注入                        | 66 |
|                        |    | 4.8.1 离子注入简介                    | 66 |
|                        |    | 4.8.2 离子注入的原理                   | 67 |

|                                   |           |                                  |            |
|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|------------|
| 4.9 化学气相淀积 .....                  | 68        | 6.4.2 逻辑模拟的建模机理 .....            | 102        |
| 4.9.1 化学气相淀积的方法 .....             | 68        | 6.4.3 逻辑模拟的算法 .....              | 104        |
| 4.9.2 单晶硅的化学气相淀积(外延) .....        | 69        | 6.5 电路模拟 .....                   | 105        |
| 4.9.3 二氧化硅的化学气相淀积 .....           | 70        | 6.5.1 电路模拟概述 .....               | 105        |
| 4.9.4 多晶硅的化学气相淀积 .....            | 70        | 6.5.2 电路模拟的基本功能 .....            | 106        |
| 4.9.5 氮化硅的化学气相淀积 .....            | 70        | 6.5.3 电路模拟软件的基本结构 .....          | 107        |
| 4.10 接触与互连 .....                  | 71        | 6.5.4 电路描述 .....                 | 110        |
| 4.10.1 金属膜的形成方法 .....             | 71        | 6.5.5 开关级模拟 .....                | 112        |
| 4.10.2 多层互连 .....                 | 72        | 6.6 时序分析和混合模拟 .....              | 112        |
| 4.11 隔离技术 .....                   | 73        | 6.6.1 时序分析的基本原理 .....            | 113        |
| 4.12 封装技术 .....                   | 74        | 6.6.2 混合模拟 .....                 | 115        |
| 习题四 .....                         | 75        | 6.7 版图设计的 EDA 工具 .....           | 115        |
| <b>第 5 章 集成电路设计</b> .....         | <b>76</b> | 6.7.1 版图设计的基本概念 .....            | 115        |
| 5.1 集成电路设计概述 .....                | 76        | 6.7.2 版图的自动设计 .....              | 116        |
| 5.2 集成电路设计流程 .....                | 78        | 6.7.3 版图的半自动设计 .....             | 121        |
| 5.2.1 功能设计 .....                  | 79        | 6.7.4 版图的人工设计 .....              | 121        |
| 5.2.2 逻辑与电路设计 .....               | 79        | 6.7.5 版图检查与验证 .....              | 122        |
| 5.2.3 版图设计 .....                  | 80        | 6.7.6 制版技术 .....                 | 124        |
| 5.3 集成电路设计方法 .....                | 82        | 6.8 器件模拟 .....                   | 124        |
| 5.3.1 全定制设计方法 .....               | 82        | 6.8.1 器件模拟的基本概念 .....            | 124        |
| 5.3.2 半定制设计方法 .....               | 83        | 6.8.2 器件模拟的基本原理 .....            | 125        |
| 5.4 专用集成电路设计方法 .....              | 84        | 6.8.3 器件模拟的功能及模型 .....           | 126        |
| 5.4.1 标准单元设计方法 .....              | 84        | 6.8.4 器件模拟的输入文件 .....            | 127        |
| 5.4.2 门阵列设计方法 .....               | 85        | 6.9 工艺模拟 .....                   | 130        |
| 5.4.3 可编程逻辑电路设计方法 .....           | 86        | 6.9.1 工艺模拟的基本概念 .....            | 130        |
| 5.5 可测性设计 .....                   | 89        | 6.9.2 工艺模拟的基本内容 .....            | 130        |
| 5.5.1 可测性设计的重要性 .....             | 89        | 6.9.3 工艺模拟的输入文件 .....            | 131        |
| 5.5.2 可测性设计简介 .....               | 90        | 6.10 计算机辅助测试技术 .....             | 133        |
| 5.6 集成电路设计举例:二进制并行<br>加法器 .....   | 90        | 习题六 .....                        | 136        |
| 习题五 .....                         | 92        | <b>第 7 章 系统芯片设计</b> .....        | <b>137</b> |
| <b>第 6 章 集成电路设计的 EDA 系统</b> ..... | <b>93</b> | 7.1 SOC 基本概念 .....               | 137        |
| 6.1 集成电路设计的 EDA 系统概述 .....        | 93        | 7.2 SOC 关键技术及目前面临的<br>主要问题 ..... | 138        |
| 6.2 VHDL 及模拟 .....                | 94        | 7.2.1 软硬件协同设计 .....              | 138        |
| 6.2.1 VHDL 概述 .....               | 94        | 7.2.2 IP 复用技术 .....              | 139        |
| 6.2.2 VHDL 的建模机理 .....            | 95        | 7.2.3 SOC 的验证 .....              | 140        |
| 6.2.3 VHDL 的模拟算法 .....            | 98        | 7.2.4 SOC 的测试 .....              | 143        |
| 6.2.4 VHDL 的模拟环境 .....            | 99        | 习题七 .....                        | 145        |
| 6.3 综合 .....                      | 100       | <b>附录</b> .....                  | <b>146</b> |
| 6.3.1 高级综合 .....                  | 100       | 附录 A 微电子学领域大事记 .....             | 146        |
| 6.3.2 逻辑综合 .....                  | 101       | 附录 B 微电子学常用缩略语 .....             | 149        |
| 6.4 逻辑模拟 .....                    | 101       | <b>参考文献</b> .....                | <b>153</b> |
| 6.4.1 逻辑模拟概述 .....                | 101       |                                  |            |

# 第 1 章 绪 论

自然界和人类社会的一切活动都在产生信息。信息是客观事物状态和运动特征的一种普遍形式，是人类社会、经济活动的重要资源。如今的社会是个信息化、网络化和数字化的社会。实现社会信息化的网络及其关键部件，不管是各种计算机还是通信设备，它们的基础都是微电子技术。

人类已经进入信息化社会，而微电子技术是信息社会发展的基石。可以说没有微电子技术就没有今天大家所熟悉的计算机、手机、数码相机、摄像机、MP3、MP4 等电子产品，所以我们每个人基本上都随身携带有几十亿个晶体管，而每个家庭平均就拥有约 100 个芯片。由于集成电路的原材料主要是硅，因此有人认为，我们已经进入到了硅器时代。

微电子技术的高速发展不仅影响到我们的生活质量，还影响到我国的国民经济、国防建设。一个日本经济学家认为，谁控制了超大规模集成电路技术谁就控制了世界产业；英国有人则认为，如果哪个国家不掌握半导体技术，哪个国家就会立刻加入不发达国家行列。

微电子技术具有极强的渗透性，几乎所有传统产业都与微电子技术相结合，用集成电路芯片进行智能化改造，使传统产业升级换代，重新焕发青春。微电子技术已经成了整个信息时代的标志，各种电子信息系统都离不开集成电路芯片。所以除了微电子专业人员之外，其他相关专业如计算机、电子学、自动化、通信等领域的人员都非常需要了解微电子技术知识。

基于此考虑，本书主要介绍微电子学领域的一些基本概念、集成电路制造的工艺、集成电路设计等，努力使大家对微电子技术有个比较全面的认识；同时还就微电子技术领域的最新动态及发展情况做些简单介绍，让大家能了解一些最新的技术发展趋势。

通过本章的学习，你将能够：

- 1) 描述现在的经济状态和半导体产业的技术根基。
- 2) 解释什么是集成电路。
- 3) 解释什么是特征尺寸，并理解摩尔定律如何预测未来硅片制造发展。
- 4) 描述自晶体管发明到现代硅片制造的不同电子时代。

## 1.1 微电子科学技术的发展历程

### 1.1.1 晶体管的发明

晶体管被认为是现代历史中最伟大的发明之一，在重要性方面可以与印刷术、汽车和电话等发明相提并论。

1947 年 12 月，美国贝尔实验室的肖克莱、巴丁和布拉顿组成的研究小组，研制出一种点接触型的锗晶体管。晶体管的问世，是 20 世纪的一项重大发明，是微电子革命的先声。晶体管出现后，人们就能用一个小巧的、消耗功率低的电子器件，来代替体积大、功率消耗

大的电子管了。晶体管的发明又为后来集成电路的降生吹响了号角。

20 世纪最初的 10 年，通信系统已开始应用半导体材料。20 世纪上半叶，在无线电爱好者中广泛流行的矿石收音机，就采用矿石这种半导体材料进行检波。半导体的电学特性也在电话系统中得到了应用。

晶体管的发明，最早可以追溯到 1929 年，当时工程师利莲费尔德就已经取得一种晶体管的专利。但是，限于当时的技术水平，制造这种器件的材料达不到足够的纯度，而使这种晶体管无法制造出来。

由于电子管处理高频信号的效果不理想，人们就设法改进矿石收音机中所用的矿石触须式检波器。在这种检波器里，有一根与矿石（半导体）表面相接触的金属丝（像头发一样细且能形成检波接点），它既能让信号电流沿一个方向流动，又能阻止信号电流朝相反方向流动。在第二次世界大战爆发前夕，贝尔实验室在寻找比早期使用的方铅矿晶体性能更好的检波材料时，发现掺有某种极微量杂质的锗晶体的性能不仅优于矿石晶体，而且在某些方面比电子管整流器还要好。

在第二次世界大战期间，不少实验室在有关硅和锗材料的制造和理论研究方面，也取得了不少成绩，这就为晶体管的发明奠定了基础。

为了克服电子管的局限性，第二次世界大战结束后，贝尔实验室加紧了对固体电子器件的基础研究。肖克莱等人决定集中研究硅、锗等半导体材料，探讨用半导体材料制作放大器件的可能性。

1945 年秋天，贝尔实验室成立了以肖克莱为首的半导体研究小组，成员有布拉顿、巴丁等人。布拉顿早在 1929 年就开始在这个实验室工作，长期从事半导体的研究，积累了丰富的经验。他们经过一系列的实验和观察，逐步认识到半导体中电流放大效应产生的原因。布拉顿发现，在锗片的底面接上电极，在另一面插上细针并通上电流，然后让另一根细针尽量靠近它，并通上微弱的电流，这样就会使原来的电流产生很大的变化。微弱电流少量的变化，会对另外的电流产生很大的影响，这就是“放大”作用。

布拉顿等人还想出有效的办法，来实现这种放大效应。他们在发射极和基极之间输入一个弱信号，在集电极和基极之间的输出端，就放大为一个强信号了。在现代电子产品中，上述晶体管的放大效应得到广泛的应用。

巴丁和布拉顿最初制成的固体器件的放大倍数为 50 左右。不久之后，他们利用两个靠得很近（相距 0.05mm）的触须接点，来代替金箔接点，制造了“点接触型晶体管”，如图 1-1 所示。1947 年 12 月，这个世界上最早的实用半导体器件终于问世了，在首次试验时，它能把音频信号放大 100 倍，它的外形比火柴棍短，但要粗一些。

在为这种器件命名时，布拉顿想到它的电阻变换特性，即它是靠一种从“低电阻输入”到“高电阻输出”的转移电流来工作的，于是取名为

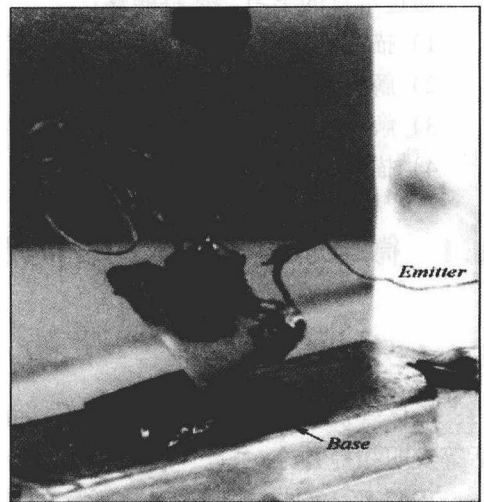


图 1-1 世界上第一个晶体管的照片  
(最原始的点接触型晶体管)



trans-resister (转换电阻), 后来缩写为“transister”, 中文译名就是晶体管。

由于点接触型晶体管制造工艺复杂, 致使许多产品出现故障, 它还存在噪声大、在功率大时难于控制、适用范围窄等缺点。为了克服这些缺点, 肖克莱提出了用一种“整流结”来代替金属半导体接点的大胆设想。半导体研究小组又提出了这种半导体器件的工作原理。

1950年, 第一只“面结型晶体管”问世了, 它的性能与肖克莱原来设想的完全一致。今天的晶体管, 大部分仍是这种面结型晶体管。

1956年, 肖克莱、巴丁、布拉顿三人, 因发明晶体管同时荣获诺贝尔物理学奖, 图 1-2 为三位科学家在实验室中的合影。从左到右分别为巴丁 (J. Bardeen)、肖克莱 (W. Schokley) 和布拉顿 (W. H. Barttain)。



图 1-2 发明晶体管的三位科学家在实验室中的合影

### 1.1.2 集成电路的发展历史及规律

集成电路 (Integrated Circuit, IC) 是采用一系列特定的半导体加工工艺, 在一块较小的单晶片 (如 Si 或 GaAs 等) 上制作上许多二极管、三极管以及电阻器、电容器等元器件, 并按照多层布线或隧道布线的方法将元器件组合成一个完整的电子电路, 作为一个不可分割的整体执行某一些特定功能。

1947年美国贝尔实验室发明了半导体点接触晶体管, 从而开创了人类的硅文明时代。此项发明后不到 5 年, 英国皇家研究所的达默就第一次提出了集成电路的设想。1958年 9 月 12 日, 在德克萨斯仪器公司从事研究工作的科学家基尔比发明了世界上第一块集成电路, 图 1-3 为世界上第一块集成电路。然而直到 2000 年, 集成电路问世 42 年后, 人们才终于了解到它给社会带来的巨大影响和推动作用, 基尔比因集成电路的发明被授予诺贝尔物理学奖。诺贝尔奖评审委员会曾经这样评价基尔比: “为现代信息技术奠定了基础”。这迟来

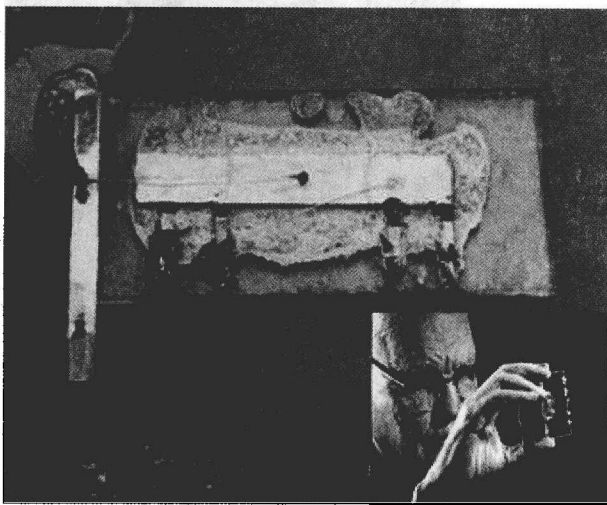


图 1-3 基尔比发明的世界上第一块集成电路

42 年的诺贝尔物理学奖, 对于基尔比来说实属不易, 这也许和他只有硕士学位有关, 另外就是业界对于集成电路的发明是工业发明还是科学发现一直有争议。不管怎么说, 基尔比获此殊荣当之无愧, 集成电路的发明给整个社会带来了翻天覆地的变化。图 1-4 为 2000 年基尔比获得诺贝尔物理学奖。

之后, 电子工业进入 IC 时代, 集成电路从 SSI (小规模集成) 起步, 经过 MSI (中规

模集成), 发展到 LSI (大规模集成), 近十几年来又提高到 VLSI (超大规模集成) 及 ULSI (特大规模集成) 时代。经过 50 余年的发展, 单个电路芯片集成的元器件数已经从当时的十几个发展到目前的几亿个甚至几十、上百亿个。

1965 年英特尔 (Intel) 公司创始人 Gordon E. Moore 提出了著名的摩尔 (Moore) 定律: 集成电路的集成度, 即芯片上晶体管的数目, 每隔 18 个月增加一倍或每 3 年翻两番, 如图 1-5 所示。30 多年来, 以英特尔公司的微处理器为代表的集

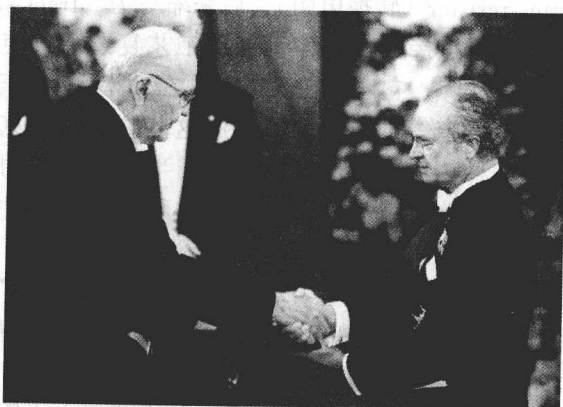


图 1-4 2000 年基尔比获得诺贝尔物理学奖

成电路的规模几乎就是准确地按照摩尔定律发展的。这个被称为“摩尔定律”的预言成为了以后几十年指导集成电路技术发展的最终法则。虽然摩尔定律不是一个物理意义上的定律, 但是集成电路行业中的学者、研发人员和工程技术人员已经自觉、不自觉成为这个定律的忠实执行者。这个不幸被言中的预言后来又加以了扩展: 集成电路的工艺每 3 年升级一代, 集成度每 3 年翻两番、特征线宽约缩小 30% 左右, 逻辑电路 (以 CPU 为代表) 的工作频率约提高 30%。据专家预测, 今后 20 年左右, 集成电路技术及其产品仍将遵循这一规律发展。

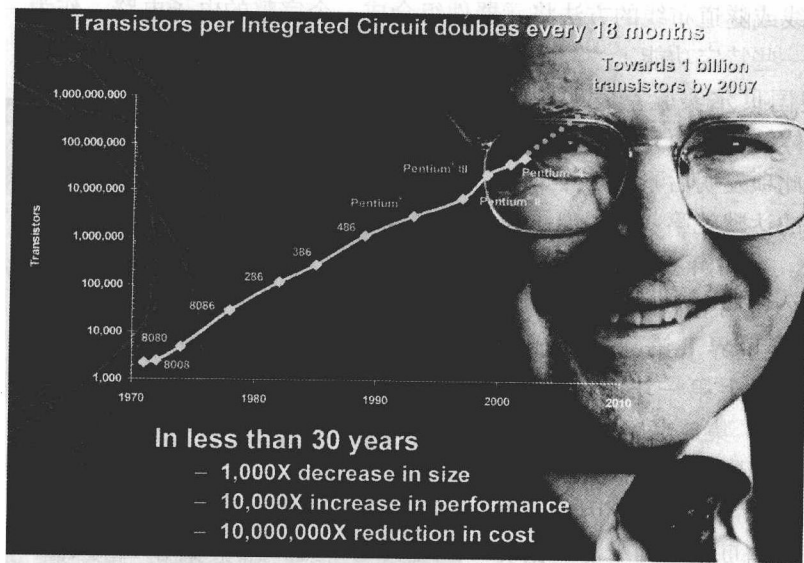


图 1-5 集成电路规模按摩尔定律发展的趋势

表 1-1 列出了 2007 年美国半导体协会制定的集成电路制造技术进程路标, 结合表 1-1 以及摩尔定律我们对集成电路发展规律总结如下:

1) 集成电路的特征尺寸向深亚微米发展, 目前国际的规模化生产是 45nm 工艺, 我国的规模化生产是 90nm 工艺, 65nm 工艺线即将在 2010 年投产。图 1-6 从左上角到右下角所示为按比例缩小的特征尺寸发展变化规律。

表 1-1 2007 年集成电路技术发展节点 (Roadmap)

| 生产年份            | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 技术节点            | 65   |      |      | 45   |      |      | 32   |      |      | 22   |      |      | 16   |      |      | 11   |
| DRAM 半节距/nm     | 65   | 57   | 50   | 45   | 40   | 36   | 32   | 28   | 25   | 22   | 20   | 18   | 16   | 14   | 13   | 11   |
| MPU/ASIC 半节距/nm | 68   | 59   | 52   | 45   | 40   | 36   | 32   | 28   | 25   | 22   | 20   | 18   | 16   | 14   | 13   | 11   |
| MPU 版图栅长/nm     | 42   | 38   | 34   | 30   | 27   | 24   | 21   | 19   | 17   | 15   | 13   | 12   | 11   | 9    | 8.4  | 7.5  |
| MPU 物理栅长/nm     | 25   | 23   | 20   | 18   | 16   | 14   | 13   | 11   | 10   | 9    | 8    | 7    | 6.3  | 5.6  | 5    | 4.5  |

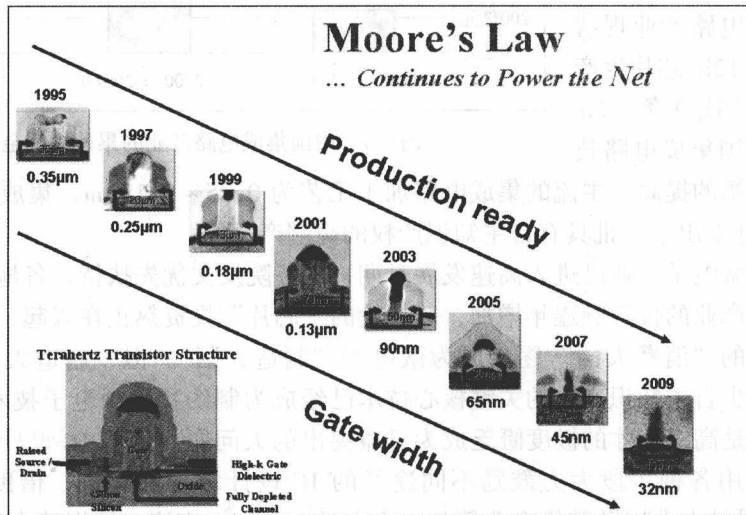


图 1-6 摩尔定律下集成电路特征尺寸变化规律

2) 晶圆尺寸的增加。当前的主流晶圆的尺寸为 8in (1in = 0.0254m), 12in 正在快速地蔓延发展, 国际上已是主流技术, 按规律预计在 2010 年左右 450mm 直径的晶圆将要出台。

3) 随着集成电路的规模、速度、复杂度、制造成本的不断提高, 集成电路设计能力出现了滞后现象, 从而导致了多数工艺线走向代工厂 (Foundry) 的经营道路。整个集成电路产业呈现为设计、制造、封装、测试分立运行的产业结构特征, Foundry、Fabless Co. (无生产线设计公司)、Chipless Co. (无芯片设计公司) 成为集成电路产业的三大主脉。

### 1.1.3 我国微电子技术的发展概况

近年来, 集成电路产业在中国发展迅速, 初步形成了电路设计、芯片制造和电路封装三业并举的局面。

截止到 2008 年底, 我国共有各类集成电路企业 800 多家, 其中芯片制造企业 70 多家, 封装与测试企业大约有 200 家, 设计企业近 500 家。2008 年我国集成电路总产量达到 417.1 亿块, 销售额达到 1246.8 亿元, 分别是 2000 年产量和销售额的 7.1 倍和 6.7 倍, 其中设计业份额占到 18.9%, 芯片制造业份额占到 31.5%, 封装测试业份额则为 49.6%。

图 1-7 为中国集成电路产业的累计投资金额。1980—1999 年这 20 年间, 国内对集成电路产业投入的资金总额仅为 257 亿人民币。而 2000—2004 年这 5 年间, 国内集成电路领域

的投资金额高达 1160 亿元, 相当于过去 20 年投资总额的 5 倍; 2000—2008 年这 9 年间, 其投资总额累计超过 260 亿美元, 相当于过去 20 年投资总额的 7 倍多。资金的大量涌入对近几年我国集成电路产业的发展起到了至关重要的作用。

从整个集成电路产业现状来看, 国内现有 12in 芯片生产线 1 条, 8in 生产线 9 条, 6in 生产线 6 条; 我国集成电路技

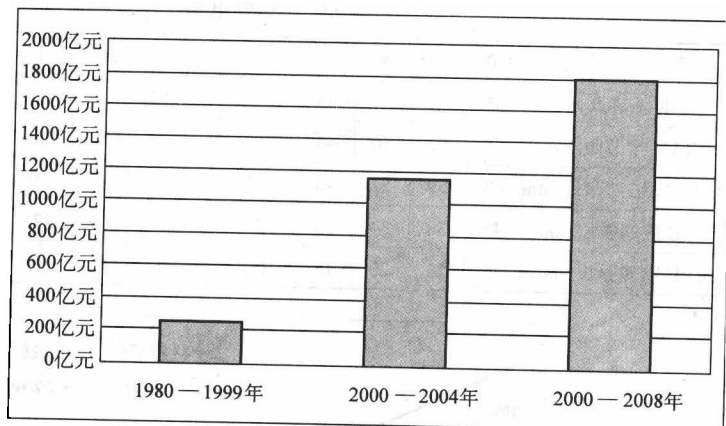


图 1-7 中国集成电路产业的累计投资金额

术水平得到了大幅的提高, 主流的集成电路加工工艺为  $0.25 \sim 0.18\mu\text{m}$ , 集成电路设计水平达到  $0.13\mu\text{m}$ , 开发出了一批具有自主知识产权的高端产品。

目前, 我国微电子产业已进入高速发展时期, 国务院发文优先扶持, 各地争相出台优惠政策, 集成电路产业的投资额逐年增加, 新一轮的“芯片”投资热正在兴起。我国正由一个集成电路 (IC) 的“消费大国”逐步成为微电子“制造大国”。但“制造大国”并不等于“研发强国”, 缺少自主知识产权的关键核心技术已经成为制约我国微电子技术发展的瓶颈。设计人才, 特别是高级人才的极度匮乏成为日益突出的大问题。随着 IC 设计人才供需矛盾的日益突出, 采用各种手段大力鼓励不同途径的 IC 设计教育和培训, 借助政府、高校、EDA 厂商、IC 设计企业以及整机企业等各方面力量, 合作、交流、培训等多种方式相结合, 为我国 IC 设计业培养不同层次的 IC 人才, 是我国集成电路发展至关重要的途径。表 1-2 和 1-3 分别为我国十大集成电路设计企业和十大集成电路和分立器件制造企业。

表 1-2 十大集成电路设计企业

| 排 名 | 企 业 名 称          | 2007 年销售额/亿元 |
|-----|------------------|--------------|
| 1   | 中国华大集成电路设计集团有限公司 | 14.61        |
| 2   | 深圳海思半导体有限公司      | 12.90        |
| 3   | 展讯通信 (上海) 有限公司   | 11.06        |
| 4   | 大唐微电子技术有限公司      | 10.79        |
| 5   | 炬力集成电路设计有限公司     | 8.87         |
| 6   | 无锡华润矽科微电子有限公司    | 8.50         |
| 7   | 杭州士兰微电子股份有限公司    | 8.20         |
| 8   | 北京中星微电子有限公司      | 7.06         |
| 9   | 上海华虹集成电路有限公司     | 6.83         |
| 10  | 北京清华同方微电子有限公司    | 4.57         |
|     | 小 计              | 93.39        |

表 1-3 十大集成电路和分立器件制造企业

| 排 名 | 企 业 名 称        | 2007 年销售额/亿元 |
|-----|----------------|--------------|
| 1   | 中芯国际集成电路制造有限公司 | 111.43       |
| 2   | 无锡海力士意法半导体有限公司 | 93.59        |
| 3   | 华润微电子（控股）有限公司  | 46.63        |
| 4   | 上海华虹（集团）有限公司   | 35.09        |
| 5   | 和舰科技（苏州）有限公司   | 19.70        |
| 6   | 上海宏力半导体制造有限公司  | 15.34        |
| 7   | 首钢日电电子有限公司     | 14.04        |
| 8   | 台积电（上海）有限公司    | 13.40        |
| 9   | 上海先进半导体制造有限公司  | 11.83        |
| 10  | 吉林华微电子股份有限公司   | 11.25        |
|     | 小 计            | 372.3        |

## 1.2 微电子学的特点

微电子学（Microelectronics）是研究在固体（主要是半导体）材料上构成的微小化电路、电路及系统的电子学分支。微电子学作为电子学的一门分支学科，主要是研究电子或离子在固体材料中的运动规律及其应用，并利用它实现信号处理功能的学科。微电子学是以实现电路和系统的集成为目的的。微电子学中实现的电路和系统又称为集成电路和集成系统，是微小化的；在微电子学中的空间尺寸通常是以微米（ $\mu\text{m}$ ）和纳米（ $\text{nm}$ ）为单位的。

微电子学是信息领域的重要基础学科，在信息领域中，微电子学是研究并实现信息获取、传输、储存、处理和输出的科学，是研究信息载体的科学，构成了信息科学的基石。其发展水平直接影响着整个信息技术的发展。

微电子学是一门综合性很强的边缘学科，其中包括了半导体器件物理、集成电路工艺和集成电路及系统的设计、测试等多方面的内容；涉及了固体物理学、量子力学、热力学、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。

微电子学是一门发展极为迅速的学科，高集成度、低功耗、高性能、高可靠性是微电子学的发展方向。信息技术发展的方向是多媒体（智能化）、网络化和个体化，要求系统获取和储存海量的多媒体信息，并能够高速度、精确可靠地处理和传输这些信息，及时地把有用的信息显示出来或用于控制。所有这些只能依赖于微电子技术的支撑才能成为现实。超高容量、超高速、超高频、超低功耗是信息技术无止境的追求目标，是微电子技术迅速发展的动力。

微电子学的渗透性极强，它可以与其他学科结合而诞生出一系列新的交叉学科，例如它与机械、光学的结合导致了微机电系统（MEMS）的出现，它与生物科学结合诞生了生物芯片。微机电系统和生物芯片都是近年来发展起来的具有极其广阔应用前景的新技术。

## 习 题 一

- 1-1 列举出 20 世纪上半叶对半导体产业发展做出贡献的 4 种不同产业。
- 1-2 什么时间、什么地点、由谁发明了固体晶体管？
- 1-3 什么是集成电路？什么时间、由谁发明？
- 1-4 什么是摩尔定律？它预测了什么？正确吗？

## 第 2 章 半导体物理与器件基础

本章主要介绍半导体材料的基本特性，并在此基础上将几种常用的半导体器件（PN 结、双极型晶体管和金属-氧化物-半导体场效应晶体管）的特性、工作原理介绍给大家。半导体物理和半导体器件是微电子学理论基础的重要部分，所以我们必须对这些知识有个全面的了解。

通过本章的学习，你将能够：

- 1) 描述原子，包括价电子层、能带理论。
- 2) 说明三类材料导电性能差异的原因。
- 3) 描述硅材料的相关参量。
- 4) 解释掺杂并讨论三价和五价掺杂元素如何使硅成为一种有用的半导体材料。
- 5) 讨论 P 型硅和 N 型硅之间的差异，描述硅的电阻率怎样随掺杂的变化而变化，并解释 PN 结的形成。

### 2.1 半导体的特性

#### 2.1.1 半导体材料

材料按其导电性能的差异可以分为三类，见表 2-1，通常金属导体的电导率为  $10^6 \sim 10^4 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ ，绝缘体的电导率小于  $10^{-14} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ ，而电导率在  $10^{-9} \sim 10^2 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$  之间的则称为半导体。

表 2-1 材料的分类及其电导率

| 分 类 | 材 料  | 电导率/ $(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ |
|-----|--|--------------------------------------|
| 导体  | 铝、金、钨、铜等                                   | $10^5$                               |
| 半导体 | 硅、锗、砷化镓、磷化铟等                               | $10^{-9} \sim 10^2$                  |
| 绝缘体 | $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 等 | $10^{-22} \sim 10^{-14}$             |

集成电路是导体、半导体和绝缘体三种材料有机组合形成的系统，相对于其他系统，半导体材料在集成电路的制造中起着根本性的作用。首先，集成电路通常是制作在半导体衬底材料上的；其次，集成电路中的基本元器件是依据半导体的特性构成的。

半导体材料之所以得到广泛的应用，其主要特点是：

1) 在纯净的半导体材料中，电导率随着温度的上升而呈指数增加，所以半导体对外界热刺激敏感，利用这种热敏效应可以制成热敏器件。

2) 半导体中杂质的种类和数量决定着半导体的电导率，在纯净的半导体中掺入百万分之一的杂质，就可以将半导体的电导率增加几百倍。同时，在半导体中还能实现非均匀掺杂，所以可以采取不同的掺杂制造出各种不同的器件。

3) 光的照射、高能电子等的注入可以影响半导体的电导率，所以利用光电效应就可以

制成光敏电阻、光敏晶体管等。半导体在接收外界能量注入的同时也会发射出光，从而可以制造出发光二极管等。

硅 (Si) 和锗 (Ge) 是最常见的单一元素半导体，两者在化学元素周期表中都位于 IV 族，最外层都有 4 个价电子，硅和锗的物理和化学特性就是由这最外层的 4 个电子决定的。最常见的化合物半导体则是由 III 族元素和 V 族元素构成的 III-V 族化合物，如砷化镓 (GaAs)、磷化镓 (GaP)、锑化铟 (InSb)、磷化铟 (InP) 等。每个 V 族原子把一个电子转移给一个 III 族原子，分别形成 V 族的正离子和 III 族的负离子，这样它们最外层也都有 4 个价电子，来决定化合物半导体材料的物理化学性质。

目前，市场上 90% 的 IC 产品都是基于 Si 材料制造的，因为硅原料来源丰富，技术成熟，价格低廉，所以硅基集成电路自然作为系统集成的首选方案。近十年来，随着器件尺寸的不断减小，锗材料技术又重新被大家所重视，应变硅、硅-锗异质结等技术快速发展起来。而砷化镓 (GaAs) 由于其具有高的载流子迁移率和近乎半绝缘的电阻率等，使得它同时满足高速和低功耗的性能，所以在微波、毫米波范围内，GaAs 集成电路处于主导地位。在光纤系统中，磷化铟 (InP) 则成为最重要的半导体材料来制作发光器件和光敏器件。

### 2.1.2 半导体的晶格结构

非晶、多晶、单晶是固体的三种基本类型。每种类型的特征是用材料中有序化区域的大小来加以判定。有序化区域是指原子或分子有规则或周期性几何排列的空间范畴。如图 2-1 所示，非晶材料只在几个原子或分子的尺度内有序，多晶材料则在许多个原子或分子的尺度上有序，这些有序化区域称为单晶区域，彼此有不同的大小和方向。单晶区域称为晶粒，它们由晶界将彼此分离。单晶材料则在整体范围内都有很高的几何周期性。

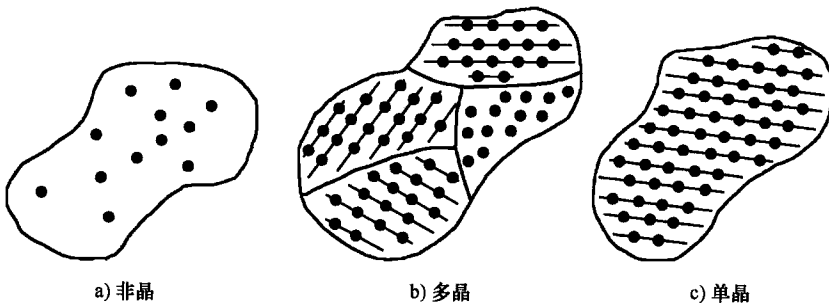


图 2-1 晶体三种类型示意图

晶体中这种原子的周期性排列称为晶格。通过了解材料的晶体结构和晶格尺寸，我们就能确定该晶体的不同特征，如能确定它的原子体密度。图 2-2 所示的是三种最简单最基本的简立方、体心立方、面心立方结构。

硅和锗都是 IV 族元素，它们具有金刚石晶格结构，如图 2-3 所示，每个原子周围有四个最邻近的原子，这四个原子处于正四面体的顶角上，任一顶角上的原子和中心原子各贡献一个价电子为该两个原子所共有，并形成稳定的共价键结构。这种金刚石晶格也可看成是由两个面心立方沿立方体空间对角线互相位移了四分之一的空间对角线长度套构而成。而这种结构最基本的构造单元则是图 2-4 所示的缺四个顶角原子的体心立方结构，或者中心有原子的正四面体结构。整个金刚石晶格结构中等效原子个数是 8 个，其中 8 个顶角贡献 1 个原子，



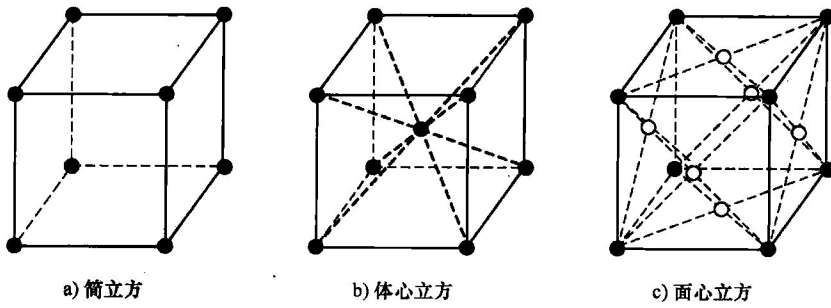


图 2-2 三种晶格结构

六个面心贡献 3 个原子，晶格内部包含有 4 个原子。表 2-2 具体列出了硅、锗晶体的一些基本物理参数比较，锗的晶格常数  $a$  明显要比硅大，正因为如此才出现了应变硅技术。

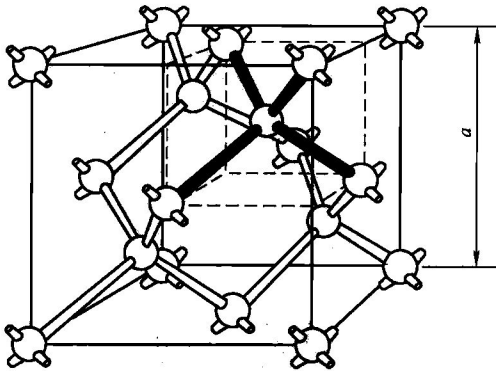


图 2-3 金刚石晶格结构

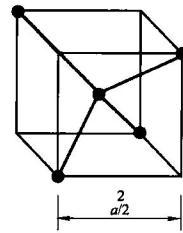


图 2-4 基本单元（四面体结构）

表 2-2 硅、锗的基本物理参数

| 材 料 | 晶格常数 $a/\text{nm}$ | 原子密度 / (个/ $\text{cm}^3$ ) | 共价半径/ $\text{nm}$ |
|-----|--------------------|----------------------------|-------------------|
| 硅   | 0.543089           | $5.00 \times 10^{22}$      | 0.117             |
| 锗   | 0.565754           | $4.42 \times 10^{22}$      | 0.122             |

硅和锗由同种原子形成的这种特定晶格我们称为金刚石结构，另一类常见的半导体晶格结构是铅锌矿结构，它与金刚石结构的不同就仅在于它们的晶格中有两类原子，这两类原子各自组成的面心立方晶格，沿空间对角线方向彼此位移四分之一空间对角线长度套构而成。如图 2-5 所示，化合物半导体 GaAs 的基本结构和金刚石一样也是四面体结构，每个镓原子有四个最近邻的砷原子，每个砷原子有四个近邻镓原子，两种子晶格相互交织在一起形成。

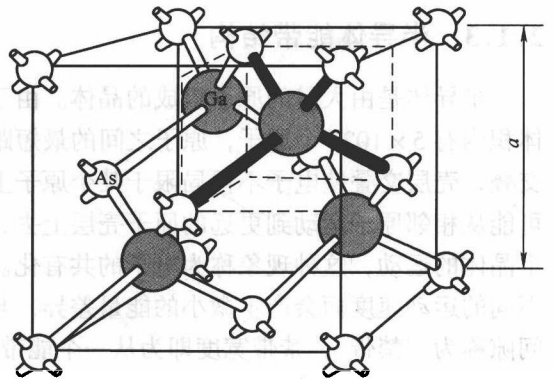


图 2-5 GaAs 的铅锌矿晶格结构

晶体性质的基本特征之一是具有方向性。沿不同方向，晶体性质不同。晶体中，一般利