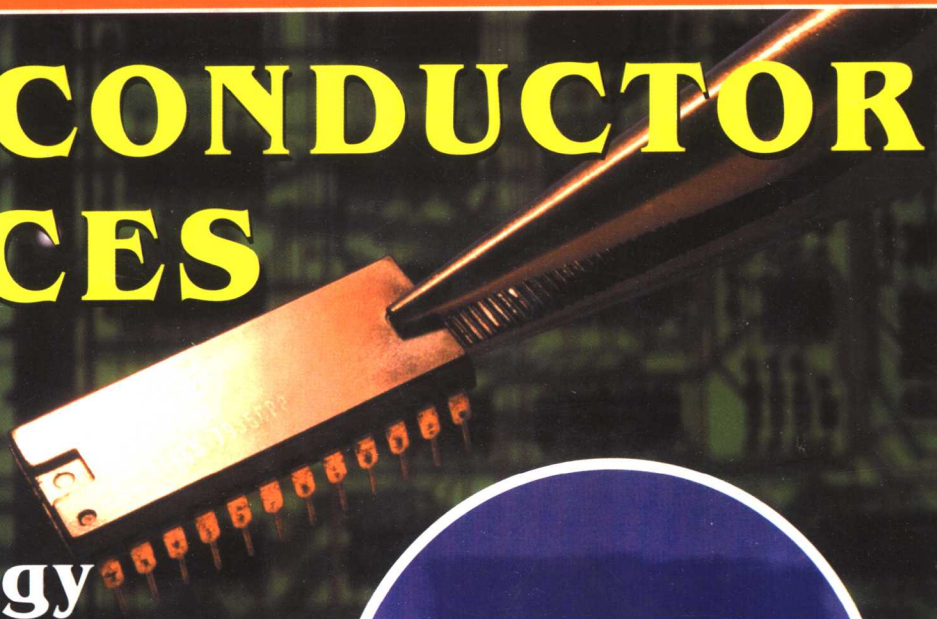


SEMICONDUCTOR DEVICES

Physics
and
Technology

(2nd Edition)



半导体器件 物理与工艺

[美]施敏著

赵鹤鸣 钱敏 黄秋萍译

第二版

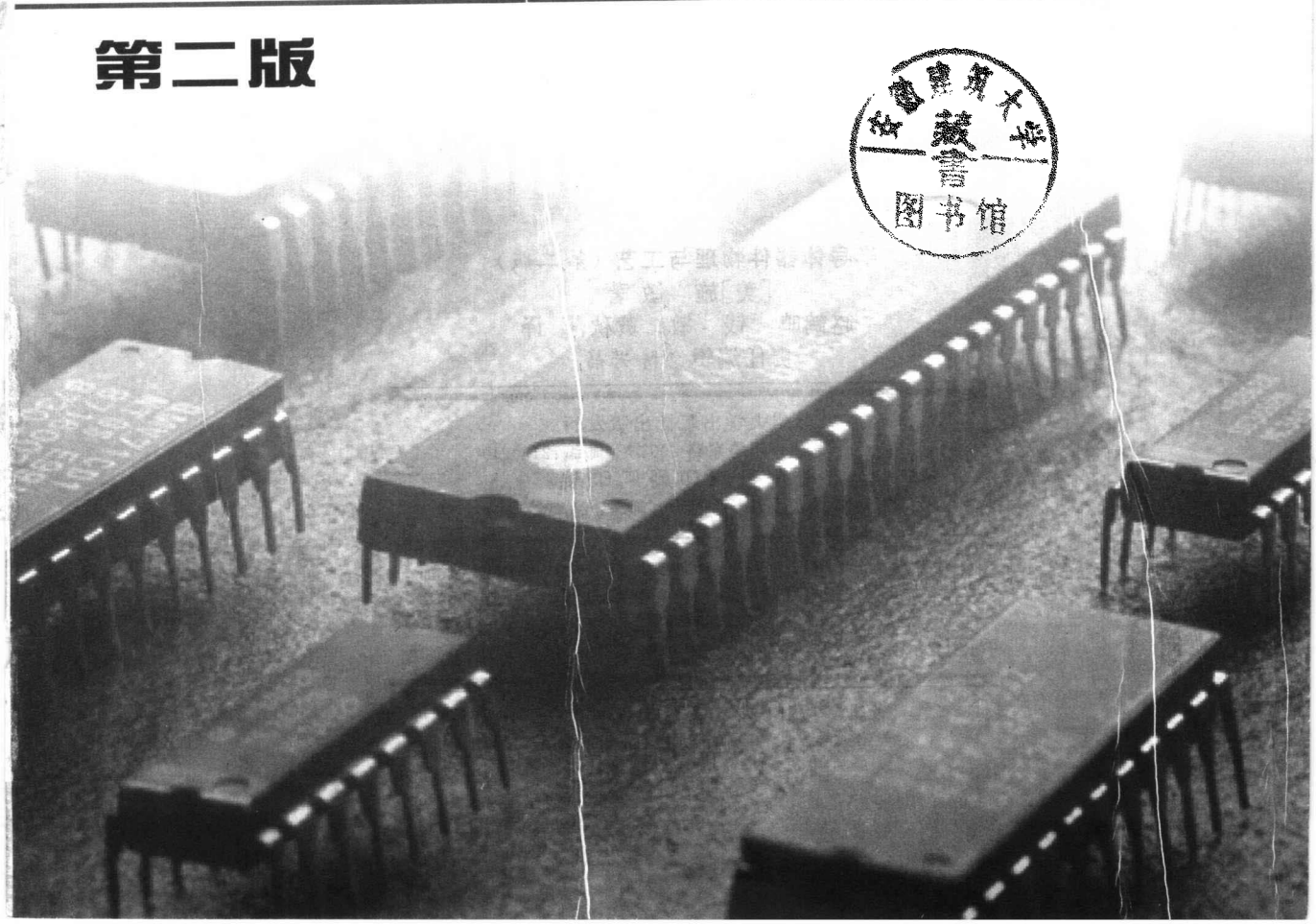
苏州大学出版社

苏州大学出版社

[美]施敏著
赵鹤鸣 钱敏 黄秋萍译

半导体器件 物理与工艺

第二版



图书在版编目(CIP)数据

半导体器件物理与工艺(第二版)/(美)施敏著;
赵鹤鸣,钱敏,黄秋萍译.—苏州:苏州大学出版社,
2002.12

ISBN 7-81090-015-3

I. 半… II. ①施…②赵…③钱…④黄…
III. ① 半导体物理学-高等学校-教材② 半导体工艺-高等学校-教材 IV. ①O47②TN305

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 089639 号

Copyright © by John Wiley & Sons, Inc. 2002.
Simplified Chinese Edition Arranged by S. M. Sze.
Simplified Chinese Edition Copyright © 2002 by Suzhou University Press.
登记号 图字: 10-2003-001 号

半导体器件物理与工艺(第二版)

[美]施敏著

赵鹤鸣 钱敏 黄秋萍译

责任编辑 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)

丹阳教育印刷厂印装

(地址:丹阳市西门外 邮编:212300)

开本 787×1092 1/16 印张 35 插页 4 字数 875 千

2002 年 12 月第 1 版 2002 年 12 月第 1 次印刷

印数 1-3000 册

ISBN 7-81090-015-3/TN·1(课) 定价:55.00 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

致 谢

在修订本书时，承很多人给予我宝贵的协助。首先我要对纳米实验室的同仁们表示感谢，他们对改善本书的内容和最先进的图片有极大的贡献，并且提供课外作业和解答，其中有：胡淑芬博士（第2章）、吴文发博士（第3章）、詹世雄博士（第4章）、邱灿宾博士（第5章）、林鸿志博士（第6章）、曾坚信博士（第7章）、黄国威博士（第8章）、郭政达博士（第9章）、吴世全博士（第10章）、张鼎张博士（第11章）、廖明吉博士和江明崇博士（第12章）、柯富祥博士（第13章）和赵天生博士（第14章）。

我也从本书校阅人的意见中获益良多，他们分别是：台湾交通大学的张俊彦、陈金鑫、黄调元、崔秉铎和杨宗哲教授，中山大学的陈英忠和李明逵教授，长庚大学的赖朝松教授，康桥大学的梁维耀教授，贝尔实验室和朗讯科技的伍国珏博士，成功大学的曾伟志教授，中原大学的魏大钦教授，清华大学的吴玉书教授，纳米实验室的杨金成先生，逢甲大学的杨文祿教授和台湾集成电路公司的严涛南博士。

令我受惠良多的还有协助我编排草稿的 N. Erdos 先生、完成草稿和最终稿排版打字的林诗融小姐，还有交大半导体中心的杨月娇小姐提供本书数百张图片，其中从其他出版品而来的图片都在版权所有者的同意下使用，即使所有的图片都再经过调整和重绘，我仍然非常感激他们慷慨的允许。我还要感谢旺宏公司的盛旦初先生提供了本书封面那张快闪记忆体 (flash memory) 的透射电子显微镜 (TEM, transmission electron micrography) 照片。另外，也要感谢 Intel 公司的 A. Mutlu 先生、S. Short 先生和 R. Steward 小姐，他们提供了第一架微处理器 (Intel 4004) 和最新微处理器奔腾 4 (Pentium 4) 的照片。

在 John Wiley & Sons 出版社方面，我想谢谢 G. Telecki 和 W. Zobrist 两位先生，他们鼓励我进行这个再版计划。我也感谢台湾交通大学思源基金会的赞助。我尤其想感谢台湾联华电子公司，因为联华电子讲座教授奖金提供了我写这本书的环境。

最后，我想谢谢我的妻子王令仪女士，她在我著书的过程中一直支持我、协助我。我也要谢谢我的儿子施迪凡(医学博士)和媳妇顾凯南(医学博士)、我的女儿施怡凡(财经分析师)和女婿 Bob Cameron(President, Cameron Global Investment, LLC)，因为他们一直是我最好的健康顾问和财务顾问。

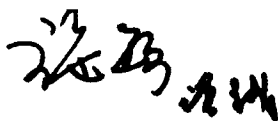
施敏 谨识于台湾新竹

2001年3月

中文版序

目前,电子工业是全世界最大的工业,到 2030 年,电子产品的全球销售额预计将超过 10000 亿美元。半导体器件、微电子技术是电子工业的核心,其发展之快,是其他任何技术都比不上的。最新的报道,集成电路的最小特征尺寸已经达到了 90nm,进入了纳米时代。当然,继续发展也面临着诸多挑战。到目前为止,微电子技术的发展基本遵循摩尔定律(Moore's Law),预计到 2030 年,仍然是硅的时代。中国正处于大力发展微电子工业的阶段,需要大批专业人才。现将《半导体器件物理与工艺》(第二版)交由苏州大学电子信息学院翻译成简体中文出版。

本书主要介绍了半导体器件、集成电路的工作原理及制作的工艺技术,适合于大学本科微电子相关专业的学生作为教科书,也适合于广大从事微电子技术科研、产业的技术人员作为参考书。相对于第一版来说,此次修订内容上有很大的修改与增删。至于器件物理部分较深入的内容,读者可参看本人的《半导体器件物理》(第二版)一书。



2002 年 11 月

译 者 序

施敏教授是国际微电子学术界及工业界公认的仰之弥高的领军人物，早年工作于全世界科学家都仰慕的贝尔实验室，他发明的非挥发性半导体存储器(NVSM)是目前微电子工业界最重要的产品之一，是移动电话、笔记本电脑、IC卡、数码相机及便携式电子产品的关键部件。施敏教授同时又是一位教育家，春风化雨，桃李满天下，好多来苏州投资的电子公司的老总都是施敏教授直接或间接的学生。施敏教授著作丰厚，达12本之多。其著作 *Physics of Semiconductor Devices* (1st Edition, 1969, 2nd Edition, 1981, Wiley) 是工程和应用科学领域的经典著作之一，该书内容丰富、概念清晰、说理透彻，广受赞誉，曾被翻译成六国文字出版，发行量达百万册，在世界各大学流传甚广，被引用13000余次 (ISI Press, 2001, Philadelphia)。

Semiconductor Devices Physics and Technology (1st Edition, 1985, Wiley, New York) 是施敏教授为大学本科三四年级微电子专业学生编著的教材，相对于 *Physics of Semiconductor Devices* 而言，器件物理的内容有所简化，增加了器件工艺及IC工艺；而2001年出版的第二版是其最新修订版。相比第一版，其内容有很大的增删与修改，例如包含了一些最新的器件进展和最新的发明。1991年北京大学微电子研究所所长王阳元院士曾将其第一版翻译出版，我们在翻译过程中参考了该书；同时我们也参考了本书的台湾交通大学版本(繁体中文版)。

21世纪初的中国，机遇与挑战并存，发展高科技是强国的必由之路。作为电子工业支柱的微电子高科技产业，更是各国优先发展的首选。智力密集型的高科技产业需要的是人才，培养大批微电子专业人才已是当务之急。祖籍苏州的施敏教授非常愿意为培养我国微电子专业人才、为家乡的建设贡献力量，他对苏州发展IC产业寄予了厚望。2002年10月至11月间，施敏教授又专程来苏州大学作了为期一个月的讲学。若本书的翻译出版能有助于广大从事微电子科研、产业的朋友一臂之力的话，那将是我们最大的满足。

本书虽经再三校对，力求完美，但疏漏之处仍在所难免。另外，少量名词在国内尚无统一的术语译法，我们就采用了直译法。由于译者才疏学浅，不妥之处，希望广大读者不吝指正。最后，感谢施敏教授的教诲，感谢苏州大学出版社为本书出版所做的大量工作。

译者于苏州大学

2002年11月

本书介绍了现代半导体器件的物理原理和先进的工艺技术。它可以作为应用物理、电机工程、电子工程和材料科学领域的本科学生的教材,也可以作为工程师和科学家们需要了解最新器件和技术发展的参考资料。

第2版更新的部分

本书在第1版(原英文版)的基础上作了如下更新:

- 修正并更新了50%的材料,增加了许多章节讨论当代较感兴趣的部分,如快闪存储器(flash memory)、奔腾(pentium)芯片(chip,或译晶粒或晶片)、铜工艺和准分子激光(excimer laser)图形曝光(lithography)技术。另一方面,我们删除或减少了某些较不重要的章节,以维持本书的内容篇幅。
- 为了符合教科书的需求,本书也做了一些版面上的改变,如书中重要的公式辅以底纹以突出显示。
- 所有的器件和材料参数都经过更新或修正。例如,硅在300K的本征载流子浓度(intrinsic carrier density)是 $9.65 \times 10^9 \text{cm}^{-3}$,而不是以前常引用的 $1.45 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$,这项改变对问题的解答至少有30%的影响。
- 为了改善每个主题的易读性,含有研究生程度的数学或物理概念的章节被移到本书最后的附录之中。

章节主要内容

- 首先,第1章对主要半导体器件和关键技术的发展作一个简短的历史回顾。接着,本书分为三个部分:
- 第1部分(第2、3章)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1部分的概念将在本书接下来的部分被用到,了解这些概念需要现代物理和微积分的基本知识。
- 第2部分(第4~9章)讨论所有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,接下来讨论双极型和场效应器件,最后讨论微波、量子效应、热电子和光电子器件。
- 第3部分(第10~14章)则介绍从晶体生长到掺杂等工艺技术。我们介绍了制作器件时的各个主要步骤,包含理论和实际情况,并特别强调其在集成电路上的应用。

主要特色

每一章包含下列特色:

- 以对主要内容概括性的陈述开头,并列出一些学习目标。
- 例子:第2版例子的数量增加为原来的三倍,希望通过特定问题提供基础的概念。
- 每章最后有总结,阐述重要的概念并帮助学生在做家庭作业前复习该章内容。
- 课外作业:本书有约250个课外作业问题,其中超过一半是第2版新增的题目。部分奇数题的解答列在本书后面的附录L中。

课程设计选择

第2版对课程设计提供了极大的弹性。本书涵括了足够的材料,可以提供一整年的器件物理及工艺技术课程,以每周三节课、两个学期的课程为例,可以在第1学期教授第1~7章、第2学期教授第8~14章。对三学期的课程而言,则可以将课程分为第1~5章、第6~9章和第10~14章三部分。

一个两学期的课程则可以在第1学期时教第1~5章,第2学期时教师可以有数种选择。例如,选第6、11~14章来专门介绍金氧半晶体管(MOSFET)和它的工艺技术;或选择第6~9章来介绍所有主要的器件。对一学期的半导体器件工艺课程而言,教师可以选择第1.2节和第10~14章。

一个一学期的课程可以用第1~7章来教授基础半导体物理和器件;或用第1~4、7~9章来教微波和光电子器件;如果学生已经对半导体有一些初步的认识,第1、6、10~14章可以用来教授亚微米金氧半场效应晶体管的物理和工艺技术。当然还有很多其他的课程设计,可以随教学进度和教师的选择而定。

教材提供

- 教师手册:其中有完整的作业解答可提供给大专院校采用本书作为教材的正式教师。

说明

书中的名词、概念、单位、格式等在翻译时尽量按照中国读者的阅读习惯和出版要求处理,少数不便处理的地方仍维持原貌,如参考文献的格式、部分大气压的单位等。

目 录

第 1 章 简介

- 1.1 半导体器件·····(1)
- 1.2 半导体工艺技术·····(7)
- 总结·····(13)
- 参考文献·····(14)

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·····(18)
- 2.2 基本晶体结构·····(21)
- 2.3 基本晶体生长技术·····(24)
- 2.4 共价键·····(27)
- 2.5 能带·····(28)
- 2.6 本征载流子浓度·····(34)
- 2.7 施主与受主·····(37)
- 总结·····(44)
- 参考文献·····(44)
- 习题·····(44)

第 3 章 载流子输运现象

- 3.1 载流子漂移·····(48)
- 3.2 载流子扩散·····(56)
- 3.3 产生与复合过程·····(59)
- 3.4 连续性方程式·····(65)
- 3.5 热电子发射过程·····(70)
- 3.6 隧穿过程·····(72)
- 3.7 强电场效应·····(74)
- 总结·····(79)
- 参考文献·····(80)
- 习题·····(80)

第 2 部分 半导体器件

第 4 章 p-n 结

- 4.1 基本工艺步骤·····(84)
- 4.2 热平衡状态·····(86)
- 4.3 耗尽区·····(91)
- 4.4 耗尽层势垒电容·····(97)
- 4.5 电流-电压特性·····(102)

4.6	电荷储存与暂态响应	(111)
4.7	结击穿	(114)
4.8	异质结	(120)
	总结	(122)
	参考文献	(123)
	习题	(123)

第5章 双极型晶体管及相关器件

5.1	晶体管的工作原理	(127)
5.2	双极型晶体管的静态特性	(133)
5.3	双极型晶体管的频率响应与开关特性	(141)
5.4	异质结双极型晶体管	(146)
5.5	可控硅器件及相关功率器件	(151)
	总结	(159)
	参考文献	(160)
	习题	(161)

第6章 MOSFET 及相关器件

6.1	MOS 二极管	(165)
6.2	MOSFET 基本原理	(180)
6.3	MOSFET 按比例缩小	(191)
6.4	CMOS 与双极型 CMOS (BiCMOS)	(197)
6.5	绝缘层上 MOSFET(SOI)	(201)
6.6	MOS 存储器结构	(206)
6.7	功率 MOSFET	(210)
	总结	(211)
	参考文献	(212)
	习题	(213)

第7章 MESFET 及相关器件

7.1	金属-半导体接触	(217)
7.2	金半场效应晶体管(MESFET)	(228)
7.3	调制掺杂场效应晶体管	(237)
	总结	(242)
	参考文献	(243)
	习题	(243)

第8章 微波二极管、量子效应和热电子器件

8.1	基本微波技术	(246)
8.2	隧道二极管	(250)
8.3	碰撞电离雪崩渡越时间二极管	(252)

目 录

8.4	转移电子器件	(255)
8.5	量子效应器件	(260)
8.6	热电子器件	(265)
	总结	(269)
	参考文献	(270)
	习题	(271)

第9章 光电器件

9.1	辐射跃迁与光的吸收	(273)
9.2	发光二极管	(279)
9.3	半导体激光	(288)
9.4	光探测器	(301)
9.5	太阳能电池	(308)
	总结	(317)
	参考文献	(318)
	习题	(319)

第3部分 半导体工艺

第10章 晶体生长和外延

10.1	从融体中生长单晶	(323)
10.2	硅的悬浮区熔工艺	(329)
10.3	砷化镓晶体的生长技术	(333)
10.4	材料特性	(337)
10.5	外延	(343)
10.6	外延层的构造和缺陷	(351)
	总结	(354)
	参考文献	(355)
	习题	(356)

第11章 薄膜淀积

11.1	热氧化	(359)
11.2	介质淀积	(366)
11.3	多晶硅淀积	(375)
11.4	金属化	(378)
	总结	(387)
	参考文献	(387)
	习题	(389)

第12章 图形曝光与刻蚀

12.1	光学图形曝光	(392)
------	--------	-------

12.2	新一代图形曝光技术	(404)
12.3	湿法化学腐蚀	(413)
12.4	干法刻蚀	(418)
12.5	微机电系统	(430)
	总结	(433)
	参考文献	(434)
	习题	(436)
第 13 章 杂质掺杂		
13.1	基本扩散工艺	(439)
13.2	非本征扩散	(447)
13.3	扩散相关工艺	(451)
13.4	注入离子的分布	(454)
13.5	注入损伤与退火	(461)
13.6	注入相关工艺	(465)
	总结	(469)
	参考文献	(470)
	习题	(471)
第 14 章 集成器件		
14.1	无源器件	(475)
14.2	双极型晶体管技术	(480)
14.3	MOSFET 技术	(487)
14.4	MESFET 技术	(503)
14.5	微电子器件的挑战	(506)
	总结	(511)
	参考文献	(511)
	习题	(512)
	附录 A. 符号表	(515)
	附录 B. 国际单位制 (SI Units)	(517)
	附录 C. 单位词头*	(518)
	附录 D. 希腊字母	(519)
	附录 E. 物理常数	(520)
	附录 F. 300K 时重要半导体材料的特性	(521)
	附录 G. 300K 时硅和砷化镓的特性	(522)
	附录 H. 半导体态密度的推导	(523)
	附录 I. 非直接复合的复合率的推导	(525)
	附录 J. 对称共振隧道二极管的穿透系数的计算	(527)
	附录 K. 基本气体动力学	(529)
	附录 L. 各章部分奇数题的参考解答	(531)
	索引	(533)

第1章

简介

- ▶ 1.1 半导体器件
 - ▶ 1.2 半导体工艺技术
 - ▶ 总结
-

身为一个应用物理、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,其全球销售量超过一万亿美元,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4种最基本的结构(building block)
- 18种重要的半导体器件以及它们在电子应用上所扮演的角色
- 20种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^[1,2].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%。半导体工业身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%。

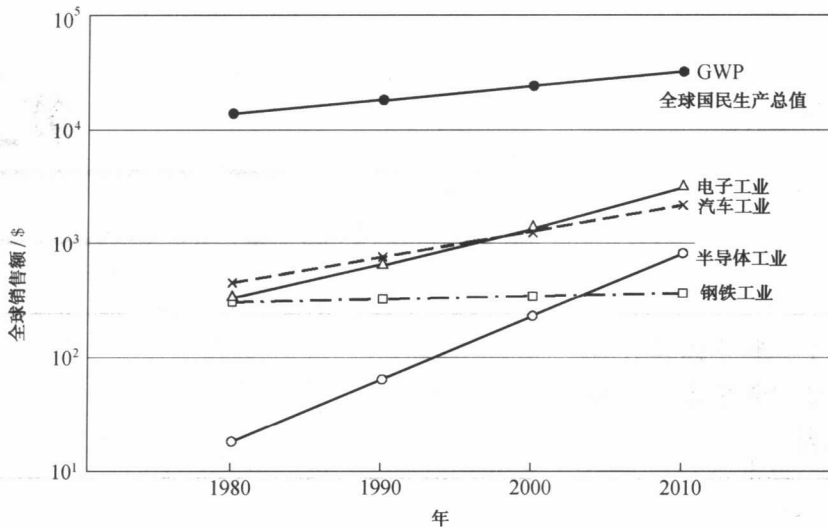


图 1.1 1980~2000 年的全球国民生产总值(GWP)及电子、汽车、半导体和钢铁工业的销售量,并外插此曲线到 2010 年止^[1,2]

► 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^[3],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^[4],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。

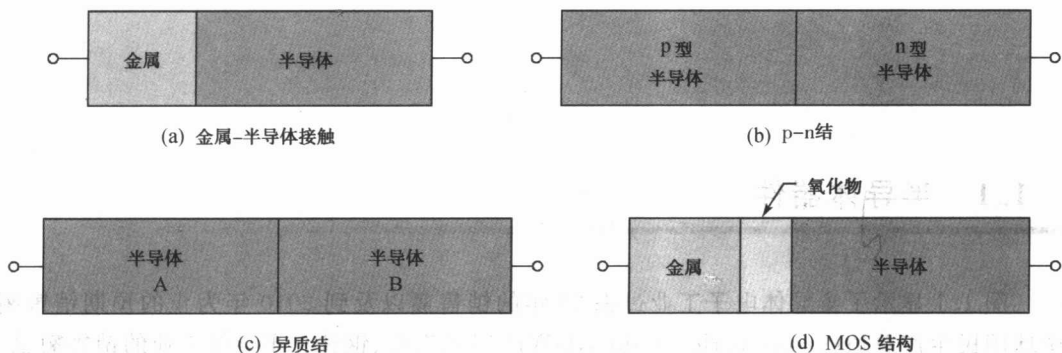


图 1.2 基础器件结构

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;或者也可以用来作欧姆接触(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,利用整流接触当作栅极(gate)、利用欧姆接触当作漏极(drain)和源极(source),即形成一个金半场效应晶体管(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,亦即加上另一个 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),叫作可控硅器件(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 结构当作栅极,再用两个 p-n 结分别当作漏极和源极,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,其中加注脚 b 的是两终端(two-terminal)的器件,其他的是三终端或四终端的器件^[3].最早系统地研究半导体器件(金属-半导体接触)的是布朗(Braun)^[5],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^[6].

表 1.1 主要半导体器件

公元	半导体器件 ^a	作者/发明者	参考资料
1874	金属-半导体接触 ^b	Braun	5
1907	发光二极管(LED) ^b	Round	6
1947	双极型晶体管(BJT)	Bardeen, Brattain 及 Shockley	7
1949	p-n 结 ^b	Shockley	8
1952	可控硅器件(thyristor)	Ebers	9
1954	太阳能电池 ^b	Chapin, Fuller 及 Pearson	10

续表

公元	半导体器件 ^a	作者/发明者	参考资料
1957	异质结双极型晶体管(HBT)	Kroemer	11
1958	隧道二极管(tunnel diode) ^b	Esaki	12
1960	金氧半场效应晶体管(MOSFET)	Kahng 及 Atalla	13
1962	激光 ^b	Hall, et al.	15
1963	异质结激光 ^b	Kroemer, Alferov 及 Kazarinov	16, 17
1963	转移电子二极管(TED) ^b	Gunn	18
1965	碰撞电离雪崩渡越时间二极管(IMPATT diode) ^b	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 ^b	张立纲, Esaki 及 Tsu	24
1980	调制掺杂场效应晶体管(MODFET)	Mimura, et al.	25
1994	室温单电子存储器(SEMC)	Yano, et al.	22
2001	15nm 金氧半场效应晶体管	Yu, et al.	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^[3].

1947年巴丁(Bardeen)和布莱登(Brattain)^[7]发明了点接触(point-contact)晶体管. 接着在1949年肖克莱(Shockley)^[8]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 μm 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.

1952年伊伯斯(Ebers)^[9]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^[10]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, 克罗马(Kroemer)^[11]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, 这种器件有可能成为更快速的半导体器件. 1958年江崎(Esaki)^[12]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