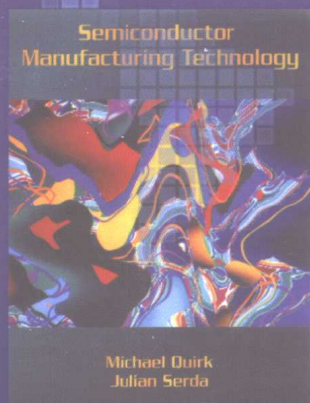


国外电子与通信教材系列

半导体制造技术

Semiconductor Manufacturing Technology



[美] Michael Quirk 著
Julian Serda

韩郑生 等译

海潮和 徐秋霞 等审校

PEARSON
Prentice
Hall



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

半导体制造技术

Semiconductor Manufacturing Technology

[美] Michael Quirk 著
Julian Serda

韩郑生 等译

海潮和 徐秋霞 等审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

在半导体领域,技术的变化遵循着摩尔定律的快速节奏,是以月而不是以年为单位计的。本书详细追述了半导体发展的历史并吸收了当今最新技术资料,学术界和工业界都称赞这是一本目前在市场上能得到的最全面、最先进的教材。全书共分20章,章节根据应用于半导体制造的主要技术分类来安排,内容包括:与半导体制造相关的基础技术信息;总体流程图的工艺模型概况,用流程图将硅片制造的主要领域连接起来;具体讲解每一个主要工艺;集成电路装配和封装的后部工艺概况。此外,各章为读者提供了关于质量测量和故障排除的问题,这些都是会在硅片制造中遇到的实际问题。

本书适合作为高等院校微电子技术专业的教材,也可作为从事半导体制造与研究人员的参考书及公司培训员工的标准教材。

Simplified Chinese edition Copyright © 2004 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Semiconductor Manufacturing Technology, ISBN: 0130815209 by Michael Quirk, Julian Serda. Copyright © 2001.

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和Pearson Education培生教育出版亚洲有限公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有Pearson Education培生教育出版集团激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号:图字:01-2002-5706

图书在版编目(CIP)数据

半导体制造技术/(美)夸克(Quirk, M.)等著;韩郑生等译.-北京:电子工业出版社,2004.1
(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Semiconductor Manufacturing Technology

ISBN 7-5053-9493-2

I.半... II.①夸... ②韩... III.半导体工艺-教材 IV. TN305

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第119073号

责任编辑:杜闽燕

印 刷:北京兴华印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:38.5 字数:986千字

印 次:2004年1月第1次印刷

定 价:55.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。

联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。

吴佑寿

中国工程院院士、清华大学教授
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入 21 世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入 WTO 后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在 2000 年至 2001 年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了 40 余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为作好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

- | | | |
|-----|------------|--|
| 主任 | 吴佑寿 | 中国工程院院士、清华大学教授 |
| 副主任 | 林金桐
杨千里 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师
总参通信部副部长、中国电子学会会士、副理事长
中国通信学会常务理事 |
| 委员 | 林孝康 | 清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员 |
| | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系副主任
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 樊昌信 | 西安电子科技大学教授、博士生导师
中国通信学会理事、IEEE 会士 |
| | 程时昕 | 东南大学教授、博士生导师
移动通信国家重点实验室主任 |
| | 郁道银 | 天津大学副校长、教授、博士生导师
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员 |
| | 阮秋琦 | 北方交通大学教授、博士生导师
计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 |
| | 张晓林 | 北京航空航天大学教授、博士生导师、电子工程系主任
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员 |
| | 郑宝玉 | 南京邮电学院副院长、教授、博士生导师
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 朱世华 | 西安交通大学教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员 |
| | 彭启琮 | 电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员 |
| | 徐重阳 | 华中科技大学教授、博士生导师、电子科学与技术系主任
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员 |
| | 毛军发 | 上海交通大学教授、博士生导师、电子信息学院副院长
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 赵尔沅 | 北京邮电大学教授、教材建设委员会主任 |
| | 钟允若 | 原邮电科学研究院副院长、总工程师 |
| | 刘彩 | 中国通信学会副理事长、秘书长 |
| | 杜振民 | 电子工业出版社副社长 |

译者序

当人类进入电气时代和20世纪前期以真空电子管为主导的电子时代,导体和绝缘材料是人们的“宠物”,半导体就像一只被人遗忘的“丑小鸭”。到了20世纪后期发展最快的产业是硅基集成电路,半导体集成电路产业不仅自身迅速成长,还带动了一批其他产业的崛起和完善,例如计算机、通信、航天、精密机械等。超纯、超净、超精细、超大规模等概念对我们的生活产生着巨大的影响。例如,我们现在饮用的纯净水、医护人员的净化服、纳米技术、巨型计算机等都源于半导体集成电路研制。半导体集成电路几乎无处不在,只是常常隐藏在各种漂亮的外壳内。在微电子技术中占主导地位的半导体已经成长为世人瞩目的“白天鹅”。将这一时期称为硅时代就是对半导体最佳的认同。

我们国家的半导体集成电路研究几乎和世界同时起步。但是经过几十年的风雨与磨难,现在才终于迎来产业大发展的春天。国家制定了发展微电子技术的各项优惠政策,与国际接轨的集成电路制造厂纷纷成立,海外学子开始回流,国内许多其他专业的学生也在向微电子专业靠拢。这预示着中国半导体集成电路产业的明天必将灿烂辉煌。

本书追述了半导体集成电路的发展历史,详细描述了集成电路制造的全过程,即硅片制备、硅片制造、硅片测试/拣选、装配和封装以及终测。具有大量精美的图片、图表及具体详实的数据。对立志从事微电子技术工作,而又未能实际体验集成电路制造过程的人来说,它无疑是一位良师益友。即使是正在从事集成电路制造的工程技术人员,也一定会认为它是非常具有价值的参考书。作者在前言中叙述了各章节的主要内容,这里不再赘述。

为了使本书能和广大读者尽快见面,中国科学院微电子中心的一些研究员和研究生参加了本书的翻译工作。参加本书翻译工作的有韩郑生、欧文、杜寰、杨荣、丁明正、李科、武荣刚、白国斌、赵洪辰、林钢、南铮、李庆华、刘奎伟、汤仙明、王志玮、程超、连军等。参加本书审校工作的研究员有韩郑生、海潮和、徐秋霞、扈焕章、周小茵和汪锁发。此外,非常感谢周玉梅研究员将本书介绍给译者。鉴于译者水平有限,在翻译过程中难免有疏漏之处,恳请广大读者不吝赐教。

前 言

本教材以简单的假设为开始: 作为教师, 我们需要教给学生和半导体制造厂雇员相关的微芯片技术。遗憾的是, 在半导体产业, 技术的变化是以月而不是以年为单位计的。我们的挑战是写一本相关书籍, 它不能到出版发行时就过时。带着这种心理, 我们研究材料并应用于所写的章节和创作的艺术品中。遵循着摩尔定律的快速节奏, 本书中的技术素材最多仅有 18 到 24 个月。这使得我们可以与整个半导体产业令人晕眩变化的技术节点保持同步。

本书是为两年制大专或四年制大学技术专业的学生所写的, 也可以作为公司和技术培训课程的实际参考书和标准教材。希望学生了解高中化学、物理和数学知识。章节围绕应用于半导体制造的主要技术来安排。

本书的组织

我们的目标是实现三个目的:

1. 帮助技术学生掌握用于制造半导体器件的基本技术。
2. 介绍微芯片制造中许多挑战的一部分。
3. 满满地灌输给读者半导体制造概念化的简单的正确评价。

首先, 第 1 章到第 8 章介绍半导体制造相关的全部基础技术信息。第 9 章介绍工艺模型概况, 用流程图将硅片制造的主要领域连接起来。第 10 章到第 19 章覆盖制造厂中的每一个主要工艺。最后, 第 20 章提供集成电路装配和封装的后道工艺概况。在工艺章节(第 10 至 20 章)讲述关键工艺技术, 接下来是支持这些技术需要的各种设备设计。每个工艺章节都将关于质量测量和故障排除问题总结出来提供给学生, 这些是在硅片制造中每天都会遇到的难题。

在细节上覆盖用于亚 0.25 μm 工艺的最新技术。包括化学机械平坦化(CMP)、浅槽隔离(STI)、深紫外化学放大光刻胶、步进与扫描系统、具有双大马士革的铜金属化以及向具有多腔集成设备的工艺集成的普遍转移。贯穿全书, 解释了产业变化漫长历史中的所有工艺和设备。描述早期的工具和工艺以阐明现在技术的发展。在一些例子中, 最近的设备和早期的工具之间的联系显而易见, 而在另外一些例子中, 变化是惊人的。

教授、学生以及本书的其他读者可将关于本书的评论和问题按下列网址发给作者: <http://www.smtbook.com>。我们渴望任何有助于提高半导体制造教育的信息交流。

目 录

第1章 半导体产业介绍	1
目标	1
1.1 引言	1
1.2 产业的发展	2
1.3 电路集成	3
1.4 集成电路制造	4
1.5 半导体趋势	8
1.6 电子时代	12
1.7 在半导体制造业中的职业	14
1.8 小结	17
第2章 半导体材料特性	20
目标	20
2.1 引言	20
2.2 原子结构	20
2.3 周期表	23
2.4 材料分类	27
2.5 硅	31
2.6 可选择的半导体材料	37
2.7 小结	38
第3章 器件技术	41
目标	41
3.1 引言	41
3.2 电路类型	42
3.3 无源元件结构	42
3.4 有源元件结构	44
3.5 CMOS器件的闩锁效应	56
3.6 集成电路产品	56
3.7 小结	58
第4章 硅和硅片制备	64
目标	64

4.1	引言	64
4.2	半导体级硅	64
4.3	晶体结构	65
4.4	晶向	67
4.5	单晶硅生长	68
4.6	硅中的晶体缺陷	73
4.7	硅片制备	75
4.8	质量测量	79
4.9	外延层	82
4.10	小结	82
第5章	半导体制造中的化学品	87
	目标	87
5.1	引言	87
5.2	物质形态	87
5.3	材料的属性	88
5.4	工艺用化学品	94
5.5	小结	102
第6章	硅片制造中的沾污控制	106
	目标	106
6.1	引言	106
6.2	沾污的类型	107
6.3	沾污的源与控制	112
6.4	硅片湿法清洗	125
6.5	小结	132
第7章	测量学和缺陷检查	140
	目标	140
7.1	引言	140
7.2	集成电路测量学	140
7.3	质量测量	142
7.4	分析设备	160
7.5	小结	166
第8章	工艺腔内的气体控制	171
	目标	171
8.1	引言	171
8.2	真空	172
8.3	真空泵	174

8.4	工艺腔内的气流	178
8.5	残气分析器	179
8.6	等离子体	181
8.7	工艺腔的沾污	183
8.8	小结	184
第9章	集成电路制造工艺概况	187
	目标	187
9.1	引言	187
9.2	CMOS 工艺流程	187
9.3	CMOS 制作步骤	192
9.4	小结	207
第10章	氧化	210
	目标	210
10.1	引言	210
10.2	氧化膜	211
10.3	热氧化生长	214
10.4	高温炉设备	222
10.5	卧式与立式炉	223
10.6	氧化工艺	230
10.7	质量测量	232
10.8	氧化检查及故障排除	232
10.9	小结	233
第11章	淀积	239
	目标	239
11.1	引言	239
11.2	膜淀积	242
11.3	化学气相淀积	246
11.4	CVD 淀积系统	250
11.5	介质及其性能	262
11.6	旋涂绝缘介质	265
11.7	外延	267
11.8	CVD 质量测量	269
11.9	CVD 检查及故障排除	270
11.10	小结	271
第12章	金属化	277
	目标	277

12.1	引言	277
12.2	金属类型	279
12.3	金属淀积系统	290
12.4	金属化方案	300
12.5	金属化质量测量	303
12.6	金属化检查及故障排除	304
12.7	小结	305
第 13 章	光刻：气相成底膜到软烘	310
	目标	310
13.1	引言	310
13.2	光刻工艺	314
13.3	光刻工艺的 8 个基本步骤	316
13.4	气相成底膜处理	319
13.5	旋转涂胶	322
13.6	软烘	333
13.7	光刻胶质量测量	334
13.8	光刻胶检查及故障排除	335
13.9	小结	336
第 14 章	光刻：对准和曝光	341
	目标	341
14.1	引言	341
14.2	光学光刻	344
14.3	光刻设备	360
14.4	混合和匹配	376
14.5	对准和曝光质量测量	377
14.6	对准和曝光检查及故障排除	378
14.7	小结	378
第 15 章	光刻：光刻胶显影和先进的光刻技术	384
	目标	384
15.1	引言	384
15.2	曝光后烘焙	385
15.3	显影	387
15.4	坚膜	391
15.5	显影检查	392
15.6	先进的光刻技术	393
15.7	显影质量测量	398
15.8	显影检查及故障排除	399

15.9	小结	400
第 16 章	刻蚀	404
目标	404	
16.1	引言	404
16.2	刻蚀参数	406
16.3	干法刻蚀	411
16.4	等离子体刻蚀反应器	414
16.5	干法刻蚀的应用	423
16.6	湿法腐蚀	431
16.7	刻蚀技术的发展历程	432
16.8	去除光刻胶	432
16.9	刻蚀检查	435
16.10	刻蚀质量测量	435
16.11	干法刻蚀检查及故障排除	436
16.12	小结	436
第 17 章	离子注入	442
目标	442	
17.1	引言	442
17.2	扩散	445
17.3	离子注入	448
17.4	离子注入机	453
17.5	离子注入在工艺集成中的发展趋势	465
17.6	离子注入质量测量	470
17.7	离子注入检查及故障排除	470
17.8	小结	471
第 18 章	化学机械平坦化	477
目标	477	
18.1	引言	477
18.2	传统的平坦化技术	480
18.3	化学机械平坦化	482
18.4	CMP 应用	495
18.5	CMP 质量测量	498
18.6	CMP 检查及故障排除	499
18.7	小结	500
第 19 章	硅片测试	506
目标	506	

19.1	引言	506
19.2	硅片测试	508
19.3	测试质量测量	525
19.4	测试检查及故障排除	525
19.5	小结	526
第 20 章	装配与封装	531
	目标	531
20.1	引言	531
20.2	传统装配	534
20.3	传统封装	540
20.4	先进的装配与封装	544
20.5	封装与装配质量测量	552
20.6	集成电路封装检查及故障排除	553
20.7	小结	553
附录 A	化学品及安全性	558
附录 B	净化间的沾污控制	566
附录 C	单位	569
附录 D	作为氧化层厚度函数的颜色	571
附录 E	光刻胶化学的概要	572
附录 F	刻蚀化学	576
术语表	578

第1章 半导体产业介绍

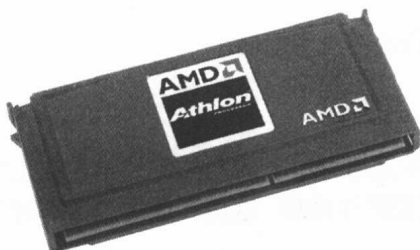
在20世纪,社会目睹了伴随着从机械技术派生出的产品到集中电子技术产品变化的技术革命。数字CD播放机取代了磁带播放机,现在汽车发动机也已由电子点火系统控制。电子计算机几乎在社会每个方面迅速起着作用,促进资源的有效利用。从由电子技术引起变化的广度看,这场革命刚刚开始。

半导体产业已经成为这场技术革命的中心。主要建筑材料——半导体——是贯穿整个社会电子产品的要素。半导体产品由具有不同技术技巧的人们制造:根据客户需求创造新设计的设计师、根据设备和工艺要求而改善性能的工程师以及在自动化工厂制造半导体产品的技师。总之,增长着的半导体市场不断要求以更低的成本获得更好的性能。

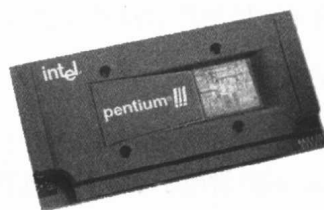
目标

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,并列出5个电路集成时代。
3. 描述硅片,包括它是如何分层的,并描述硅片制造5个阶段的基本方面。
4. 说明并讨论伴随硅片制造发展的三个主要趋势。
5. 解释什么是关键尺寸(CD)及摩尔定律如何预测未来硅片制造进展。
6. 描述自晶体管发明到现代硅片制造的不同电子时代。
7. 讨论在半导体产业中的不同职业路径。



微处理器芯片(承蒙AMD公司准许使用照片)



微处理器芯片(承蒙Intel公司准许使用照片)

1.1 引言

制造电子器件的基本半导体材料是圆形单晶薄片,称为硅片。在硅片制造厂,由硅片生产的半导体产品,又被称为微芯片或芯片。

半导体制造技术很复杂,要求许多特殊工艺步骤、材料、设备以及供应产业。一旦微芯片被制造,根据大量产品应用要求,它们被封装到各种电子和机械的装配件中。这些应用的例子有汽车电子、电子商务、个人电脑及移动电话通信。

在2001年,微芯片全球销售额有望超过2000亿美元¹。现在,半导体占个人电脑成本的30%到40%,在每一部手机中半导体约占100美元的价值。每辆汽车含有近乎价值140美元的微芯片,随着这个价值量的增加,汽车变得更智能化。

半导体产业实际上是一个更大实体的子系统——高技术产业。制造微芯片生产电子硬件，它伴随着软件集成并控制芯片功能。高技术产业包含整个半导体应用中可见的全部硬件和软件（见图 1.1）。

在美国，高技术产业是庞大的。在 20 世纪 90 年代中期，高技术产业占美国经济的 27%，相比之下居民住房占 14%，汽车业占 4%。为什么半导体产业变得如此强大呢？一个主要因素是该产业能持续增加半导体产品性能而同时降低成本的价格。满足市场对于高性能低成本需求的能力可以直接归根于技术的规律性发展，它贯穿了整个产品设计和制造业的历史。

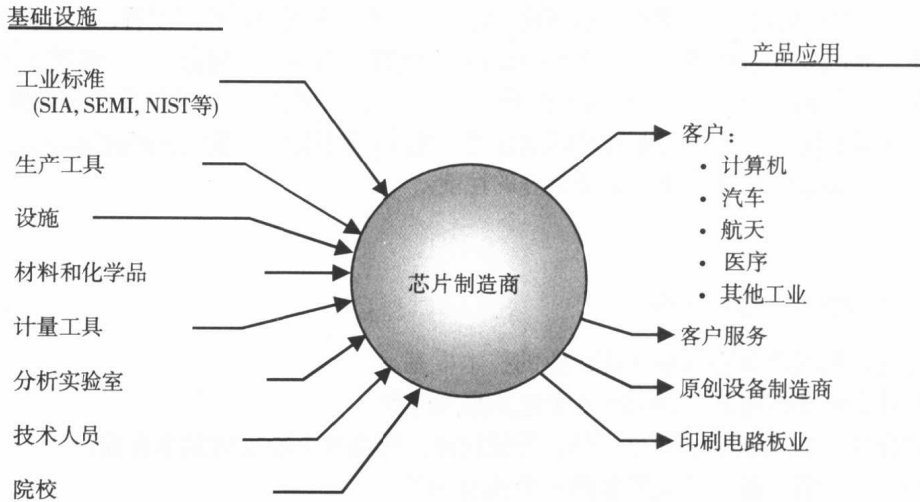


图 1.1 半导体产业

1.2 产业的发展

用于制造半导体器件的技术发展出自电子领域先驱的许多技术发明。

1.2.1 产业根基

半导体产业发展的基础是在 20 世纪上半叶开发的技术上培育出来的²。关键技术是在工业和学术网中获取的：真空管电子学、无线电通信、机械制表机及固体物理。这些产业构成了那时的高技术产业。

放大电子信号的三极真空管是由 Lee De Forest 于 1906 年发明的。它发展了早期由约翰·弗莱明 (John Fleming) 和托玛斯·爱迪生在真空管方面的工作。三极管由三个部件构成，在一个抽空气体的玻璃容器中分别封入两个电极和一个栅极。为了使部件不被烧毁，同时还要保证电子能够在电极间传输，必须采用真空。Forest 申请了专利并将他的真空管发明命名为音频管，因为他认为对于声音放大和再生有一些潜力。他是对的，真空管已经变成现代收音机、电视机和整个电子学领域的主要电子器件，直到 20 世纪 50 年代。

一种相对新的材料，称为硅的单晶体，在 20 世纪初曾被用于将无线电通信信号从交流转换为直流。包含这种材料的“半导体”一词最初在德国采用³。然而，真正要发展成为半导体技术势力需要全世界物理化学家和物理学家的参与研究。在半导体特性能被完全解释之前，为了理解电子行为的量子理论，这项研究是必需的。这些基础工作延续了几十年直到第二次世界大战。

对于电子计算数据有市场需求。第一台机械计算机是霍尔瑞斯机械制表机，是由赫尔曼·霍尔瑞斯 (Herman Hollerith) 发明的，并在令人惊异的六周内把 1890 年人口普查数据制成表格。这台

制表机由电动马达驱动并且依靠穿孔卡（穿孔卡保持计算机的通用输入模式贯穿于20世纪70年代）。在第二次世界大战期间的宾夕法尼亚大学，真空管被用于开发第一台电子计算机ENIAC（电子数字积分与计算器）。ENIAC重达50吨、占地3000平方英尺（1英尺=0.3048米）、需要19000只真空管，并且使用相当于160个灯塔的电量。

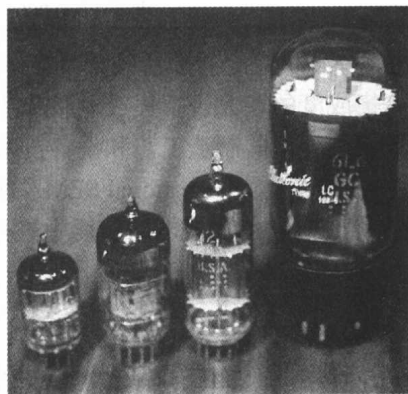
ENIAC除了体积大之外，它的主要缺点是伴随着真空管出现的问题。真空管体积大、不可靠以及耗电量大。由于会烧毁，真空管寿命有限。为了迎合迅速发展的电子市场的需求来生产体积小、可靠的电子产品，真空管显然不是优选技术。

1.2.2 固体

第二次世界大战后，贝尔电话实验室的科学家们一致努力研究固态硅和锗半导体晶体。领导这项研究的科学家感到需要替换掉真空管，并且可以从用固态半导体材料代替真空管中受益。

当代半导体产业伴随着1947年12月16日在贝尔电话实验室固态晶体管的发明而诞生，发明者是威廉·肖克利（William Shockley）、约翰·巴丁（John Bardeen）和沃尔特·布拉顿（Walter Brattain）⁴。晶体管的名字取自“跨导”和“变阻器”两词⁵，提供了与真空管同样的电功能，但具有固态的显著优点：尺寸小、无真空、可靠、重量轻、最小的发热以及低功耗。这三位科学家以他们的发明被授予1956年物理学诺贝尔奖。这一发现发动了以固体材料和技术为基础的现代半导体产业。

半导体产业在20世纪50年代开始迅速增长为以硅为基础的商品化晶体管技术。早期的许多先驱者开始在北加利福尼亚州，现在以硅谷著称的地区。1957年，在加利福尼亚州的帕罗阿托市（Palo Alto）的仙童半导体公司（Fairchild Semiconductor）制造出第一个商用平面晶体管。它有一层铝互连材料，这种材料被淀积在硅片的最顶层以连接晶体的不同部分（见图1.2）。从硅上热氧化生长的一层自然氧化层被用于隔离铝导线。这些层的使用在半导体领域是一重要发展，也是称其为平面技术的原因。



真空管

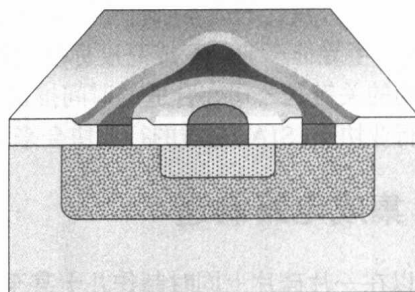


图1.2 第一个平面晶体管

1.3 电路集成

半导体这一名称的来源是由于半导体材料有时是电的导体而有时是非导体。建成具有单一功能的简单芯片（称为分离元件）最早的半导体材料是锗。现在，全部微芯片的85%以上都是由半导体材料硅制造的。基于这个原因，在这本书中我们着重强调硅。

在半导体产业向前迈进的重要一步是将多个电子元件集成在一个硅衬底上。被称为集成电路或简称IC，它是由仙童半导体公司的罗伯特·诺伊思（Robert Noyce）和德州仪器公司（Texas