

国外电子与通信教材系列

芯片制造

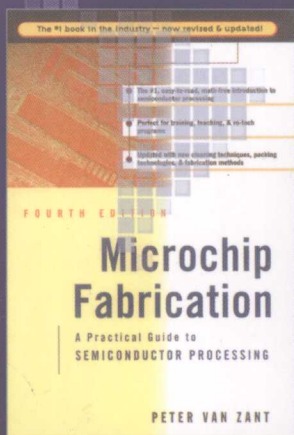
—— 半导体工艺制程实用教程

(第四版)

Microchip Fabrication

A Practical Guide to Semiconductor Processing

Fourth Edition



[美] Peter Van Zant 著

赵树武 朱践知 于世恩 等译

Mc
Graw
Hill



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

芯片制造

——半导体工艺制程实用教程

(第四版)

Microchip Fabrication: A Practical Guide to
Semiconductor Processing
Fourth Edition

[美] Peter Van Zant 著

赵树武 朱践知 于世恩 等译

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是一部综合介绍半导体工业非常实用的专业书籍。其英文版在半导体业界享有很高的声誉,被列为业界最畅销的书籍之一。本书写作方式直截明了,没有繁琐复杂的数学理论,非常便于读者理解。本书的范围包含了整个半导体工艺的制作过程——从原材料硅片的准备到已完成封装测试的集成电路器件的工艺。书中详细介绍了半导体制造工艺的各个阶段,如测试、制造流程、商用集成电路类型以及封装种类等。另外,书中给每一章都安排了知识测试和复习总结纲要,以便于读者自学。读完全书后,读者一定会对半导体科技中所有重要的问题和工艺、材料和方法有很深的理解。

本书可作为高等教育、继续教育和职业技术培训的教材,也可作为半导体专业人员的参考用书。

Peter Van Zant: **Microchip Fabrication: A Practical Guide to Semiconductor Processing, Fourth Edition.**

ISBN 0-07-135636-3

Copyright © 2000, 1997, 1984 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2004.

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和美国麦格劳-希尔教育出版(亚洲)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 McGraw-Hill 公司激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2003-4609

图书在版编目(CIP)数据

芯片制造——半导体工艺制程实用教程(第四版)/(美)赞特(Zant, P. V.)著;赵树武等译.

-北京:电子工业出版社,2004.10

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Microchip Fabrication: A Practical Guide to Semiconductor Processing, Fourth Edition

ISBN 7-121-00414-3

I. 芯... II. ①赞... ②赵... III. 半导体工艺-教材 IV. TN305

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第100394号

责任编辑:李秦华

特约编辑:熊 健

印 刷:北京智力达印刷公司印刷

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:26.75 字数:685千字

印 次:2006年1月第3次印刷

定 价:49.00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。



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和自由组合使用。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分委员会委员 |
| | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
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分委员会委员 |
| | 阮秋琦 | 北京交通大学教授、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分委员会委员 |
| | 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 | 西安交通大学副校长、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分委员会委员 |
| | 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分委员会委员 |
| | 毛军发 | 上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长
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、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任 |
| | 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 | 电子工业出版社原副社长 |
| | 王志功 | 东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会主任委员 |
| | 张中兆 | 哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长 |
| | 范平志 | 西南交通大学教授、博士生导师、计算机与通信工程学院院长 |

译 者 序

本书的译者是来自摩托罗拉(中国)电子有限公司天津半导体集成制造中心的20几位资深工程师。他们中很多人持有国内知名大学的工学硕士学位,并在半导体前段和后段制造厂从业近10年,其中多人有在海外世界级先进技术的芯片厂工作和培训的经历,是中国最早的半导体从业人员,其理论和实践知识兼备。他们自愿组成团队翻译此书,在紧张忙碌的工作之余,利用业余时间完成了全书的翻译工作,其初衷是把这本优秀的综合介绍半导体工业工艺与制造技术的书籍介绍给国内的读者,也希望谨此为中国的半导体制造工业的发展做些微薄的贡献。

全书共分18章,赵树武为翻译小组组长,在全书的翻译过程中做了大量的组织协调工作,并为中译本作序。其中第1章和第9章由于世恩翻译,第2章由马法军翻译,第3章由吴红东翻译,第4章由于雷翻译,第5章由龚平和于力翻译,第6章由刘海龙翻译,第7章由陈松翻译,第8章由李宝刚翻译,第10章由徐宏翻译,第11章由黄小锋翻译,第12章由曾庆成翻译,第13章由赵彬和樊新军翻译,第14章由尹娟毅翻译,第15章由朱践知翻译,第16章由于成飞翻译,第17章由闰智勇翻译,第18章由穆泓毅翻译。术语部分由李振林和朱践知翻译。译本改正了原书中的一些印刷错误,对部分需要商榷的地方和译者在原著基础上进一步解释的内容,以“译者注”标明。全书由许学颖进行校订。由于受译者水平和时间的限制,译本难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

如果读者希望了解更多的半导体行业相关的技术和知识,并乐于与译者进行更深入的探讨,欢迎通过以下的联系方式与译者联系,共同切磋交流。

赵树武	scott_zhao@263.net	闰智勇	mark_run@smics.com
吴红东	hongdong_wu@yahoo.com	赵彬	alex_zhao2003@sina.com
马法军	mfjamao@yahoo.com	李振林	werther_lizl@hotmail.com
于力	yuli@chinaren.com	樊新军	xinjunfan@yahoo.com.cn
龚平	gongpingg@yahoo.com	于成飞	irsiyu1976@yahoo.com.cn
黄小锋	r33296@yahoo.com	徐宏	eltonhongxu@yahoo.com
于雷	jambo_yu@yahoo.com.cn	尹娟毅	r28777@yahoo.com
于世恩	shawnjinyu@yahoo.com	朱践知	jianzhizhu@hotmail.com
刘海龙	hlliu@hotmail.com	曾庆成	zengqc1@yahoo.com
陈松	chens11@yahoo.com	穆泓毅	henrymu@126.com
李宝刚	r53773@yahoo.com	许学颖	sapphirexu@yahoo.com

中文版序

时下的中国半导体工业正如中国稳步发展的经济的环境一样,其势头锐不可挡。世界半导体的设计及制造中心正以非常快的速度向中国大陆转移。有关专家预测:中国的芯片市场将继续以非常快的速度增长。诱人的市场前景、低廉的劳动成本和丰富的原材料将刺激全球电子产品制造商不断地把生产设备向中国转移,从而进一步加快中国半导体工业的发展。在半导体工业这一高科技领域中从业人员一定要具备相当的专业素质才能立于不败之地。

目前,在国内市场,综合介绍半导体工艺制作流程的书籍非常少。本书是一部综合介绍半导体工业非常实用的专业书籍。其英文版在半导体业界享有很高的声誉,被列为业界最畅销的书籍之一。其作者 Peter Van Zant 先生在半导体行业有相当的知名度。这本书很完善地介绍了被称为技术创新脊梁的行业,半导体工业,其介绍范围包含了整个半导体工艺制程,从原材料硅片的制作到已完成封装测试的集成电路器件的工艺。从 1984 年第一版出版以来,本书已再版三次,并且每次再版都会将最新的制造技术融入到新版本中。

本书采用了直截了当的介绍方式,避免介绍繁杂的数学理论,非常适用于培训、教学和自学,专门为各类半导体专业人员量身定制。本书为方便半导体业界以外人士的阅读,内容中也包含了对理论知识、半导体工业的历史,以及最新半导体技术的详细描述。

从本书中,读者可以通过阅读作者通俗易懂的语言了解半导体制造工艺的各个阶段,如测试、制造流程、商用集成电路类型以及封装种类。

另外,本书作者 Peter Van Zant 先生特意随每一章节安排了知识测试和复习总结纲要,使本书内容更实用、更适用于自学。当阅读到本书的最后一页合卷回首时,将一定会对半导体科技中所有重要的问题和工艺、材料以及方法有了很深的理解,不管是在亚原子水平上还是在大规模的工业制造中。

赵树武

2004 年于天津

前 言

在 1984 年时，我几乎没有想到过本书会出它的第四版。在 McGraw-Hill 出版社和我的编辑 Steve Chapman 的支持和引导下，新的一版终于和读者见面了。读者注意到新版的更新速度比其他大部分技术书籍通常的更新速度要快。对于芯片专业人士和观察者来讲，其原因是显而易见的：这一工业的技术发展的步伐是在变快而不是变慢。

我尽量把上一版中过时的、次要的描述去掉，以新的描述取而代之。铜技术和多层金属的到来催生了一系列的新工艺。正如在前三版中指出的，有一天，光学成像会被其他技术所代替。尽管这是一个真实的描述，但是聪明的工程师们一直在继续用光学技术做出越来越小的图形。总有一天，我会把成像技术从本书中删除，但是可能不会很快。

章节内容基本上和以前的版本一样，除了把“芯片制造概述”一节安排到第 4 章。这一变化的目的是使读者在开始进入专门工艺章节前，先有对基本工艺的了解。

半导体工业协会报告说，在不久的将来，半导体工业会生产出相当于地球上每人拥有十亿个晶体管。基于这样的增长速度，我们可以预见到半导体工业还会有好多年的发展。与此同时，集成电路生产和半导体工艺中的物理、化学和电子学依然有效，并且在第四版中，我们继续关注这些基本理论。

要感谢半导体服务的 Anne Miller，Jim Hayes 顾问和 Portland 社区大学的 David Hata，是他们为本书提供了新的材料和建议。

还要感谢 Pro-Image 公司的 Lucy Luckenbaugh，她对此版的编辑提供了帮助，并对我未能按时交稿表现出极大的耐心。

Peter Van Zant
Grass Valley, 加州

目 录

第 1 章 半导体工业	1
1.1 一个工业的诞生	1
1.2 固态时代	2
1.3 集成电路	3
1.4 工艺和产品趋势	3
1.5 特征图形尺寸的减小	4
1.6 芯片和晶圆尺寸的增大	5
1.7 缺陷密度的减小	5
1.8 内部连线水平的提高	6
1.9 SIA 的发展方向	6
1.10 芯片成本	7
1.11 半导体工业的发展	7
1.12 半导体工业的构成	8
1.13 生产阶段	9
1.14 开发的十年 (1951~1960)	10
1.15 工艺的十年 (1961~1970)	12
1.16 产品的十年 (1971~1980)	13
1.17 自动化的十年 (1981~1990)	13
1.18 产品的纪元 (1991~2000)	13
1.19 极小的纪元	14
1.20 关键概念和术语	15
习题	15
参考文献	15
第 2 章 半导体材料和工艺化学品	16
2.1 原子结构	16
2.2 元素周期表	17
2.3 电传导	19
2.4 绝缘体和电容器	19
2.5 本征半导体	20
2.6 掺杂半导体	21
2.7 掺杂半导体的电阻率	21
2.8 电子和空穴传导	22
2.9 载流子迁移率	23
2.10 半导体产品材料	24

2.11 半导体化合物	24
2.12 锗化硅	25
2.13 铁电材料	25
2.14 工艺化学品	25
2.15 物质的状态	26
2.16 等离子体	27
2.17 物质的性质	27
2.18 压力和真空	28
2.19 酸, 碱和溶剂	29
2.20 材料安全数据表	30
2.21 关键概念和术语	30
习题	31
参考文献	31
第3章 晶圆制备	32
3.1 简介	32
3.2 半导体硅制备	32
3.3 晶体材料	33
3.4 晶体生长	35
3.5 晶体和晶圆质量	38
3.6 晶体准备	39
3.7 切片	40
3.8 晶圆刻号	41
3.9 磨片	41
3.10 化学机械抛光 (CMP)	41
3.11 背处理	42
3.12 双面抛光	42
3.13 边缘倒角和抛光	42
3.14 晶圆评估	42
3.15 氧化	43
3.16 包装	43
3.17 晶圆外延	43
3.18 关键概念和术语	43
习题	44
参考文献	44
第4章 芯片制造概述	45
4.1 晶圆生产的目标	45
4.2 晶圆术语	45
4.3 晶圆生产的基础工艺	46
4.4 制造半导体器件和电路	49

4.5	芯片术语	54
4.6	晶圆测试	55
4.7	集成电路的封装	56
4.8	小结	57
4.9	关键概念和术语	57
	习题	57
	参考文献	57
第5章	污染控制	58
5.1	简介	58
5.2	问题	58
5.3	污染源	61
5.4	洁净室的建设	68
5.5	洁净室的物质与供给	77
5.6	洁净室的维护	77
5.7	晶片表面清洗	77
5.8	关键概念和术语	87
	习题	88
	参考文献	88
第6章	工艺良品率	90
6.1	良品率测量点	90
6.2	累积晶圆生产良品率	91
6.3	晶圆生产良品率的制约因素	92
6.4	晶圆电测良品率要素	95
6.5	封装和最终测试良品率	101
6.6	整体工艺良品率	102
6.7	关键概念和术语	103
	习题	103
	参考文献	103
第7章	氧化	104
7.1	二氧化硅层的用途	104
7.2	热氧化机制	106
7.3	热氧化方法	111
7.4	水平炉管反应炉	111
7.5	垂直炉管反应炉	119
7.6	快速升温反应炉	120
7.7	快速加热工艺	120
7.8	高压氧化	122
7.9	氧化工艺	124

7.10	阳极氧化	125
7.11	热氮化	126
7.12	关键概念和术语	127
	习题	127
	参考文献	127
第8章	基本光刻工艺流程——从表面准备到曝光	129
8.1	简介	129
8.2	光刻蚀工艺概述	130
8.3	光刻 10 步法	132
8.4	基本的光刻胶化学	133
8.5	光刻胶的表现要素	136
8.6	正胶和负胶的比较	139
8.7	光刻胶的物理属性	141
8.8	光刻工艺	143
8.9	表面准备	143
8.10	涂光刻胶	146
8.11	软烘焙	150
8.12	对准和曝光	153
8.13	对准系统比较	162
8.14	关键概念和术语	162
	习题	162
	参考文献	163
第9章	基本光刻工艺流程——从曝光到最终检验	164
9.1	显影	164
9.2	硬烘焙	168
9.3	显影检验	169
9.4	刻蚀	172
9.5	湿法刻蚀	173
9.6	干法刻蚀	177
9.7	光刻胶的去除	182
9.8	最终目检	184
9.9	光刻版制作	185
9.10	小结	187
9.11	关键概念和术语	187
	习题	187
	参考文献	188
第10章	高级光刻工艺	190
10.1	ULSI/VLSI 集成电路图形处理过程中存在的问题	190

10.2	光学系统分辨率控制	191
10.3	其他曝光问题	194
10.4	掩膜版薄膜	197
10.5	晶圆表面问题	198
10.6	防反射涂层	199
10.7	平整化	201
10.8	先进光刻胶工艺	201
10.9	化学机械研磨小结	209
10.10	改进刻蚀工艺	212
10.11	自对准结构	213
10.12	刻蚀轮廓控制	213
10.13	光学光刻的末日到来了吗	213
10.14	关键概念和术语	214
	习题	214
	参考文献	214
第 11 章	掺杂	216
11.1	结的定义	216
11.2	掺杂区的形成	216
11.3	掺杂区和结的扩散形成	217
11.4	扩散工艺的步骤	220
11.5	淀积	220
11.6	推进氧化	226
11.7	离子注入的概念	229
11.8	离子注入系统	229
11.9	离子注入区域的杂质浓度	235
11.10	离子注入层的评估	237
11.11	离子注入的应用	238
11.12	掺杂前景展望	239
11.13	关键概念和术语	239
	习题	239
	参考文献	240
第 12 章	淀积	241
12.1	简介	241
12.2	化学气相淀积基础	243
12.3	CVD 的工艺步骤	245
12.4	CVD 系统分类	246
12.5	常压 CVD 系统	246

12.6	低压化学气相淀积	249
12.7	增强型等离子体	251
12.8	气相外延	253
12.9	分子束外延	253
12.10	金属有机物 CVD	254
12.11	淀积膜	255
12.12	淀积的半导体膜	255
12.13	外延硅	255
12.14	多晶硅和非晶硅淀积	259
12.15	SOS 和 SOI	261
12.16	绝缘体和绝缘介质	261
12.17	导体	263
12.18	关键概念和术语	263
	习题	264
	参考文献	264
第 13 章	金属淀积	266
13.1	简介	266
13.2	单一导体层金属	266
13.3	多层金属导体框架	267
13.4	导体	268
13.5	金属薄膜的用途	273
13.6	淀积方法	274
13.7	真空泵	280
13.8	小结	284
13.9	关键概念和术语	284
	习题	284
	参考文献	285
第 14 章	工艺和器件评估	286
14.1	简介	286
14.2	晶圆的电性测量	287
14.3	层厚的测量	291
14.4	结深	295
14.5	关键尺寸和线宽测量	297
14.6	污染物和缺陷检测	299
14.7	总体表面特征	304
14.8	污染认定	305
14.9	器件电学测量	306
14.10	关键概念和术语	313

习题	313
参考文献	314
第 15 章 晶圆加工中的商务因素	315
15.1 制造和工厂经济	315
15.2 晶圆制造的成本	316
15.3 设备	320
15.4 所有权成本	321
15.5 自动化	322
15.6 工厂层次的自动化	324
15.7 设备标准	326
15.8 统计制程控制	327
15.9 库存控制	330
15.10 生产线组织	332
15.11 关键概念和术语	332
习题	333
参考文献	333
第 16 章 半导体器件和集成电路的形成	334
16.1 半导体器件的生成	334
16.2 集成电路的形成	347
16.3 超导体	355
16.4 微电子机械系统	355
16.5 关键概念和术语	360
习题	360
参考文献	361
第 17 章 集成电路的类型	362
17.1 简介	362
17.2 电路基础	363
17.3 集成电路的类型	364
17.4 晶圆的比例集成	370
17.5 下一代产品	371
17.6 关键概念和术语	371
习题	371
参考文献	372
第 18 章 封装	373
18.1 简介	373
18.2 芯片的特性	374
18.3 封装功能和设计	375

18.4 封装操作工艺的概述	376
18.5 封装工艺	380
18.6 封装工艺流程	391
18.7 封装-裸芯片策略	392
18.8 封装设计	393
18.9 封装类型和技术小结	396
18.10 关键概念和术语	397
习题	397
参考文献	397
术语表	398