

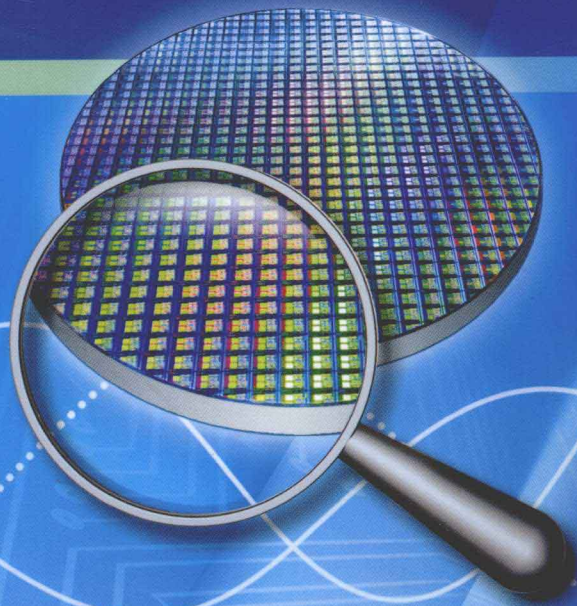
国外电子与通信教材系列

Introduction to  
Semiconductor Manufacturing Technology  
Second Edition

# 半导体 制造技术导论 (第二版)

[美] Hong Xiao (萧宏) 著

杨银堂 段宝兴 译



 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

# 半导体制造技术导论

(第二版)

Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology

Second Edition

[美] Hong Xiao(萧宏) 著

杨银堂 段宝兴 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书共包括 15 章:第 1 章概述了半导体制造工艺;第 2 章介绍了基本的半导体工艺技术;第 3 章介绍了半导体器件、集成电路芯片,以及早期的制造工艺技术;第 4 章描述了晶体结构、单晶硅晶圆生长,以及硅外延技术;第 5 章讨论了半导体工艺中的加热过程;第 6 章详细介绍了光学光刻工艺;第 7 章讨论了半导体制造过程中使用的等离子体理论;第 8 章讨论了离子注入工艺;第 9 章详细介绍了刻蚀工艺;第 10 章介绍了基本的化学气相沉积(CVD)和电介质薄膜沉积工艺,以及多孔低  $k$  电介质沉积、气隙的应用、原子层沉积(ALD)工艺过程;第 11 章介绍了金属化工艺;第 12 章讨论了化学机械研磨(CMP)工艺;第 13 章介绍了工艺整合;第 14 章介绍了先进的 CMOS、DRAM 和 NAND 闪存工艺流程;第 15 章总结了本书和半导体工业未来的发展。

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。

Chinese simplified edition published by PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY copyright © 2012.

This edition is manufactured in the People's Republic of China, and is authorized for sale only in mainland of China exclusively(except Taiwan, Hong Kong SAR and Macau SAR).

本书中文简体字翻译版由 Hong Xiao 授予电子工业出版社。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。

本书在中国大陆地区出版,仅限在中国大陆发行。

## 图书在版编目(CIP)数据

半导体制造技术导论:第 2 版/(美)萧宏著;杨银堂,段宝兴译. —北京:电子工业出版社,2013.1

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-18850-3

I. ①半… II. ①萧… ②杨… ③段… III. ①半导体工艺-高等学校-教材 IV. ①TN305

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 257615 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:周宏敏

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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

开 本:787×1092 1/16 印张:30 字数:826 千字

印 次:2013 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

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。

服务热线:(010)88258888。

## 此书献给

父母 萧先赐，周宏廷

妻子 黄 柳

儿子 萧嘉瑞，萧凯瑞

## 译者序

半导体科学与技术引发了现代科技许多领域革命性的变革和进步，是计算机、通信和网络技术的基础和核心，已经成为与国民经济发展、社会进步及国家安全密切相关的重要科学技术，成为一个国家科学技术的“基石”。半导体科技与人们的日常生活息息相关，大大提高了人们的生活质量。以半导体科学与技术为基础发展起来的集成电路技术综合了电子、信息、材料、物理、化学和数学等各门学科的精髓，发展速度非常惊人，促使信息、通信和计算机领域发生着巨大变革。集成电路制造技术是人类改造微观世界能力的体现，是衡量一个国家科技实力的标志之一。

作为1977年我国恢复高考制度后培养的第一批半导体科技专业人员，译者一直从事半导体材料、器件和工艺方面的教学科研工作，深感培养半导体高级专业人是振兴国家信息产业和国防工业的关键。由于半导体工艺技术发展速度很快，我国关键技术相对落后，所以翻译引进国际优秀教材，对于培养具有国际竞争力的优秀人才具有重要意义。

本书作者萧宏博士，在先进半导体工艺技术方面有很深的造诣，长期在美国大学讲授半导体工艺技术课程。与传统半导体工艺相关书籍相比，本书具有两大显著特点：第一是避免了很深的理论和数学推导，用简单易懂的方式将集成电路制造技术的奥秘说得十分清楚；第二是内容涵盖了先进半导体工艺最新的技术资料，包括22纳米节点关键工艺技术。本书将半导体工艺分为四类：添加工艺、移除工艺、热处理工艺和图形化工艺，知识充实，视角新颖。所以本书不仅适合于从事半导体设计和制造方面的工程师、科技人员和学生，也适用于想学习了解半导体制造方面的其他专业人员。

本书由西安电子科技大学杨银堂教授和段宝兴教授翻译，其中杨银堂教授参与翻译了第1章至第3章、第10章至第15章，段宝兴教授翻译了第4章至第9章。最后，由杨银堂教授和原著作者萧宏博士对全书做了统一审校。

西安电子科技大学宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室部分老师对本书的翻译给予了大力帮助，包括李跃进教授、柴常春教授、朱樟明教授、刘毅教授、贾护军和杨晓晰老师等，译者对他们表示感谢。

从本书的翻译到最后完稿付梓，电子工业出版社给予了很多支持和帮助。本书繁体版由台湾全华图书股份有限公司出版，书中技术用语和表达方式略有不同。

由于译者水平有限，加之时间紧迫，不妥或错误之处在所难免，请读者指正。

杨银堂 段宝兴  
2012年5月8日  
西安电子科技大学

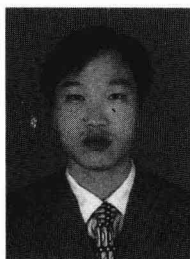
## 译者简介

### 杨银堂



1962年生，男，河北邯郸市人，博士，教授，博士生导师，毕业于西安电子科技大学半导体专业。曾先后担任该校微电子研究所所长、技术物理学院副院长、微电子学院院长、发展规划处处长兼“211工程”办公室主任，校长助理，兼任总装备部军用电子元器件专家组副组长，曾获国家自然科学基金杰出青年基金、教育部跨世纪优秀人才，全国模范教师和中国青年科技奖，入选国家“百千万人才工程”。现任西安电子科技大学副校长。先后在国际国内重要期刊上发表论文180余篇，出版专著4部。

### 段宝兴



1977年生，男，陕西省大荔县人，博士，教授。分别于2000年和2004年获哈尔滨理工大学材料物理与化学专业学士和硕士学位，2007年获电子科技大学微电子学与固体电子学博士学位。主要从事硅基功率器件与集成、宽带隙半导体功率器件和45 nm后CMOS关键技术研究。首次在国际上提出的优化功率器件新技术REBULF已成功应用于横向高压功率器件设计；与合作者提出的SOI高压器件介质场增强ENDILF技术，成功解决了高压器件纵向耐压受限问题；最近首次在国际上提出了完全3D RESURF概念并已被国际同行认可。先后在国际国内重要期刊上发表论文40余篇，其中30余篇次被SCI、EI检索。担任国际重要学术期刊*IEEE Electron Device Letters*, *Solid-State Electronics*, *Micro & Nano Letters*, *IEEE Transactions on Power Electronics* 和 *IETE Technical Review* 等的审稿人。

# 前 言

当2001年出版此书第一版时,先进IC技术的节点为130纳米左右。第一版出版后不久,我参加了一个国际集成电路技术研讨会,此时的集成电路制造技术节点为90纳米。本田公司前首席执行官吉野裕行做了一个主题演讲,他谈到本田在2000年推出了阿西莫机器人。当时,阿西莫可以理解一些简单的单词,并执行一些缓慢行走,以及用一些简单语言给出的口头指示。吉野裕行设想类似的阿西莫机器人在未来应该能够跑步、向前和向后行走,并可以上下楼梯。它不仅可以理解对方讲话的含义,而且也可以领会讲话者的心情。它不仅能识别人,而且也能够通过人的面部表情理解人类的情感。为了达到这些要求,IC发展领域的90纳米技术是完全不够的,他认为,将需要22纳米技术的集成电路芯片。

10年以后,先进IC技术的节点已经达到22纳米。2011年本田公司推出了一个全新的阿西莫机器人,它可以跑步、跳舞并使用手语。虽然之前的阿西莫机器人是一个“自动机械装置”,需要一个操作员操作,然而新的阿西莫机器人是一个“自主机器”。这意味着它具有可以通过感应环境自己做出决定和行动的能力。它可以通过观察和预测其他人调整自己的移动方向进行智能行走,并在一群人中行走而不会发生碰撞。它有能力识别很多人的声音,它的图像传感器具有面部识别能力。虽然新的阿西莫机器人已经得到了巨大改善,但是仍然距离识别情感和情绪的功能很远。要做到这一点,可能需要10纳米技术节点的IC芯片。

本书第一版出版已经过了将近10年。在这些年里,半导体工业和制造技术经历了很多变化。虽然英特尔公司在北美仍然保持领先的IC制造技术,但是IC制造中心已转移到东亚地区,如中国台湾、韩国和中国大陆。在欧洲、日本和北美的IC制造晶圆厂正在以惊人的速度减少。

当IC技术节点继续缩小时,最大的挑战仍然是图形化技术。如同本书第一版的预测,浸没式光刻技术和多图形化技术延长了光学光刻技术的应用,并进一步推迟了下一代光刻技术的进程。

本书第1章简要回顾了半导体工业的发展历史,概述了半导体制造工艺。第2章介绍了基本的半导体工艺,包括测试和成品的封装、净化室、半导体晶圆厂,以及集成电路芯片。第3章简要介绍了半导体器件、集成电路芯片,以及早期的制造工艺技术。第4章描述了晶体结构、单晶硅晶圆生长,以及硅外延技术。如应变硅、锗硅、选择性外延生长的发展都安排在本章。第5章讨论了加热过程,包括氧化、扩散、热处理、合金化和再流动过程,以及快速热处理工艺(RTP)和传统的高温炉加热过程。第6章详细介绍了光学光刻工艺,包括新的技术,如浸没式光刻和多图形化技术,以及替代光刻技术、极紫外线光刻技术、纳米压印和电子束直写技术。第7章讨论了半导体制造过程中使用的等离子体基本理论,本章还介绍了等离子体应用,直流偏压和等离子体工艺的关系。第8章讨论了离子注入工艺。第9章详细介绍了刻蚀工艺,包括湿法刻蚀和干法刻蚀、反应离子刻蚀(RIE)、化学和物理刻蚀。第10章介绍了基本的化学气相沉积(CVD)和电介质薄膜沉积工艺,以及多孔低 $k$ 电介质沉积、气隙的应用、原子层沉

积(ALD)工艺过程。第 11 章介绍了金属化工艺,包括化学气相沉积(CVD)、物理气相沉积(PVD)和电化学电镀(ECP)工艺。该章还描述了铜金属化工艺,以及金属氧化物半导体(MOS)晶体管的高  $k$  和金属栅工艺的发展。第 12 章讨论了化学机械抛光(CMP)工艺。第 13 章讨论了工艺整合。第 14 章介绍了先进的 CMOS、DRAM 和 NAND 闪存工艺流程。第 15 章总结了本书和半导体工业未来的发展。

本书第二版内容的整理得到了很多人的帮助。我的妻子黄柳(Lucy)给我许多鼓励和支持,我的长子萧嘉瑞(Jarry Xiao)帮我校对了几章,我的现任和前任同事提供了很多有用的建议。另外,我谨向 Paul MacDonald、Pierre Lefebvre 和 Alan Liang 致以深深的感谢。



# 目 录

第 1 章 导论 .....	1
1.1 集成电路发展历史 .....	2
1.1.1 世界上第一个晶体管 .....	2
1.1.2 世界上第一个集成电路芯片 .....	3
1.1.3 摩尔定律 .....	5
1.1.4 图形尺寸和晶圆尺寸 .....	6
1.1.5 集成电路发展节点 .....	7
1.1.6 摩尔定律或超摩尔定律 .....	8
1.2 集成电路发展回顾 .....	8
1.2.1 材料制备 .....	8
1.2.2 半导体工艺设备 .....	8
1.2.3 测量和测试工具 .....	9
1.2.4 晶圆生产 .....	9
1.2.5 电路设计 .....	9
1.2.6 光刻版的制造 .....	11
1.2.7 晶圆制造 .....	13
1.3 小结 .....	14
1.4 参考文献 .....	14
1.5 习题 .....	14
第 2 章 集成电路工艺介绍 .....	15
2.1 集成电路工艺简介 .....	15
2.2 集成电路的成品率 .....	16
2.2.1 成品率的定义 .....	16
2.2.2 成品率和利润 .....	16
2.2.3 缺陷和成品率 .....	18
2.3 无尘室技术 .....	18
2.3.1 无尘室 .....	19
2.3.2 污染物控制和成品率 .....	19
2.3.3 无尘室的基本结构 .....	21
2.3.4 无尘室的无尘衣穿着程序 .....	22
2.3.5 无尘室协议规范 .....	23
2.4 集成电路工艺间基本结构 .....	24
2.4.1 晶圆的制造区 .....	24
2.4.2 设备区 .....	30

2.4.3	辅助区 .....	30
2.5	集成电路测试与封装 .....	31
2.5.1	晶粒测试 .....	31
2.5.2	芯片的封装 .....	32
2.5.3	最终的测试 .....	35
2.5.4	3D 封装技术 .....	35
2.6	集成电路未来发展趋势 .....	37
2.7	小结 .....	37
2.8	参考文献 .....	38
2.9	习题 .....	38
<b>第 3 章</b>	<b>半导体基础</b> .....	<b>39</b>
3.1	半导体基本概念 .....	39
3.1.1	能带间隙 .....	40
3.1.2	晶体结构 .....	41
3.1.3	掺杂半导体 .....	41
3.1.4	掺杂物浓度和电导率 .....	42
3.1.5	半导体材料概要 .....	42
3.2	半导体基本元器件 .....	43
3.2.1	电阻 .....	43
3.2.2	电容 .....	44
3.2.3	二极管 .....	46
3.2.4	双载流子晶体管 .....	47
3.2.5	MOSFET .....	48
3.3	集成电路芯片 .....	50
3.3.1	存储器 .....	50
3.3.2	微处理器 .....	53
3.3.3	专用集成电路(ASIC) .....	53
3.4	集成电路基本工艺 .....	53
3.4.1	双载流子晶体管制造过程 .....	54
3.4.2	P 型 MOS 工艺(20 世纪 60 年代技术) .....	55
3.4.3	N 型 MOS 工艺(20 世纪 70 年代技术) .....	57
3.5	互补型金属氧化物晶体管 .....	59
3.5.1	CMOS 电路 .....	59
3.5.2	CMOS 工艺(20 世纪 80 年代技术) .....	59
3.5.3	CMOS 工艺(20 世纪 90 年代技术) .....	61
3.6	2000 年后半导体工艺发展趋势 .....	62
3.7	小结 .....	64
3.8	参考文献 .....	64
3.9	习题 .....	65

<b>第 4 章 晶圆制造</b> .....	66
4.1 简介 .....	66
4.2 为什么使用硅材料 .....	67
4.3 晶体结构与缺陷 .....	68
4.3.1 晶体的晶向 .....	68
4.3.2 晶体的缺陷 .....	69
4.4 晶圆生产技术 .....	70
4.4.1 天然的硅材料 .....	70
4.4.2 硅材料的提纯 .....	70
4.4.3 晶体的提拉工艺 .....	71
4.4.4 晶圆的形成 .....	73
4.4.5 晶圆的完成 .....	74
4.5 外延硅生长技术 .....	75
4.5.1 气相外延 .....	76
4.5.2 外延层的生长过程 .....	77
4.5.3 硅外延生长的硬件设备 .....	78
4.5.4 外延生长工艺 .....	79
4.5.5 外延工艺的发展趋势 .....	80
4.5.6 选择性外延 .....	80
4.6 衬底工程 .....	81
4.6.1 绝缘体上硅(Silicon-on-Insulator, SOI) .....	81
4.6.2 混合晶向技术(HOT) .....	82
4.6.3 应变硅 .....	83
4.6.4 绝缘体上应变硅(Strained Silicon on Insulator, SSOI) .....	84
4.6.5 IC 技术中的应变硅 .....	84
4.7 小结 .....	85
4.8 参考文献 .....	85
4.9 习题 .....	86
<b>第 5 章 加热工艺</b> .....	87
5.1 简介 .....	87
5.2 加热工艺的硬件设备 .....	88
5.2.1 简介 .....	88
5.2.2 控制系统 .....	88
5.2.3 气体输送系统 .....	89
5.2.4 装载系统 .....	89
5.2.5 排放系统 .....	89
5.2.6 炉管 .....	90
5.3 氧化工艺 .....	90
5.3.1 氧化工艺的应用 .....	92

5.3.2	氧化前的清洗工艺	94
5.3.3	氧化生长速率	95
5.3.4	干氧化工艺	97
5.3.5	湿氧化工艺	99
5.3.6	高压氧化工艺	101
5.3.7	氧化层测量技术	101
5.3.8	氧化工艺的发展趋势	104
5.4	扩散工艺	104
5.4.1	沉积和驱入过程	106
5.4.2	掺杂工艺中的测量	107
5.5	退火过程	108
5.5.1	离子注入后退火	108
5.5.2	合金化热处理	108
5.5.3	再流动过程	110
5.6	高温化学气相沉积	110
5.6.1	外延硅沉积	110
5.6.2	选择性外延工艺	111
5.6.3	多晶硅沉积	111
5.6.4	氮化硅沉积	114
5.7	快速加热工艺(RTP)系统	116
5.7.1	快速加热退火(RTA)系统	117
5.7.2	快速加热氧化(RTO)	119
5.7.3	快速加热CVD	120
5.8	加热工艺发展趋势	121
5.9	小结	122
5.10	参考文献	123
5.11	习题	123
<b>第6章</b>	<b>光刻工艺</b>	<b>125</b>
6.1	简介	125
6.2	光刻胶	126
6.3	光刻工艺	129
6.3.1	晶圆清洗	129
6.3.2	预处理过程	131
6.3.3	光刻胶涂敷	132
6.3.4	软烘烤	134
6.3.5	对准与曝光	135
6.3.6	曝光后烘烤	140
6.3.7	显影工艺	141
6.3.8	硬烘烤工艺	143

6.3.9	图形检测	143
6.3.10	晶圆轨道-步进机配套系统	147
6.4	光刻技术的发展趋势	147
6.4.1	分辨率与景深(DOF)	147
6.4.2	I线和深紫外线	149
6.4.3	分辨率增强技术	150
6.4.4	浸入式光刻技术	154
6.4.5	双重、三重和多重图形化技术	154
6.4.6	极紫外线(EUV)光刻技术	157
6.4.7	纳米压印	159
6.4.8	X光光刻技术	159
6.4.9	电子束光刻系统	160
6.4.10	离子束光刻系统	161
6.5	安全性	161
6.6	小结	162
6.7	参考文献	163
6.8	习题	164
<b>第7章</b>	<b>等离子体工艺</b>	<b>165</b>
7.1	简介	165
7.2	等离子体基本概念	165
7.2.1	等离子体的成分	165
7.2.2	等离子体的产生	166
7.3	等离子体中的碰撞	167
7.3.1	离子化碰撞	167
7.3.2	激发-松弛碰撞	167
7.3.3	分解碰撞	168
7.3.4	其他碰撞	169
7.4	等离子体参数	170
7.4.1	平均自由程	170
7.4.2	热速度	171
7.4.3	磁场中的带电粒子	172
7.4.4	玻尔兹曼分布	173
7.5	离子轰击	173
7.6	直流偏压	174
7.7	等离子体工艺优点	177
7.7.1	CVD工艺中的等离子体	177
7.7.2	等离子体刻蚀	179
7.7.3	溅镀沉积	179
7.8	等离子体增强化学气相沉积及等离子体刻蚀反应器	179

7.8.1	工艺的差异性	179
7.8.2	CVD 反应室设计	180
7.8.3	刻蚀反应室的设计	180
7.9	遥控等离子体工艺	181
7.9.1	去光刻胶	181
7.9.2	遥控等离子体刻蚀	182
7.9.3	遥控等离子体清洁	182
7.9.4	遥控等离子体 CVD(RPCVD)	183
7.10	高密度等离子体工艺	183
7.10.1	感应耦合型等离子体(ICP)	183
7.10.2	电子回旋共振	184
7.11	小结	185
7.12	参考文献	185
7.13	习题	185
<b>第 8 章</b>	<b>离子注入工艺</b>	<b>186</b>
8.1	简介	186
8.1.1	离子注入技术发展史	186
8.1.2	离子注入技术的优点	188
8.1.3	离子注入技术的应用	189
8.2	离子注入技术简介	192
8.2.1	阻滞机制	192
8.2.2	离子射程	192
8.2.3	通道效应	193
8.2.4	损伤与热退火	195
8.3	离子注入技术硬件设备	197
8.3.1	气体系统	197
8.3.2	电机系统	198
8.3.3	真空系统	198
8.3.4	控制系统	198
8.3.5	射线系统	198
8.4	离子注入工艺过程	203
8.4.1	离子注入在元器件中的应用	204
8.4.2	离子注入技术的其他应用	207
8.4.3	离子注入的基本问题	209
8.4.4	离子注入工艺评估	211
8.5	安全性	213
8.5.1	化学危险源	213
8.5.2	电机危险源	214
8.5.3	辐射危险源	214

8.5.4	机械危险源 .....	214
8.6	离子注入技术发展趋势 .....	215
8.7	小结 .....	215
8.8	参考文献 .....	216
8.9	习题 .....	217
<b>第9章</b>	<b>刻蚀工艺 .....</b>	<b>218</b>
9.1	刻蚀工艺简介 .....	218
9.2	刻蚀工艺基础 .....	220
9.2.1	刻蚀速率 .....	220
9.2.2	刻蚀的均匀性 .....	220
9.2.3	刻蚀选择性 .....	221
9.2.4	刻蚀轮廓 .....	221
9.2.5	负载效应 .....	222
9.2.6	过刻蚀效应 .....	222
9.2.7	刻蚀残余物 .....	223
9.3	湿法刻蚀工艺 .....	224
9.3.1	简介 .....	224
9.3.2	氧化物湿法刻蚀 .....	225
9.3.3	硅刻蚀 .....	225
9.3.4	氮化物刻蚀 .....	226
9.3.5	金属刻蚀 .....	227
9.4	等离子体(干法)刻蚀工艺 .....	227
9.4.1	等离子体刻蚀简介 .....	227
9.4.2	等离子体刻蚀基本概念 .....	228
9.4.3	纯化学刻蚀、纯物理刻蚀及反应式离子刻蚀 .....	228
9.4.4	刻蚀工艺原理 .....	230
9.4.5	等离子体刻蚀反应室 .....	231
9.4.6	刻蚀终点 .....	234
9.5	等离子体刻蚀工艺 .....	235
9.5.1	电介质刻蚀 .....	235
9.5.2	单晶硅刻蚀 .....	240
9.5.3	多晶硅刻蚀 .....	244
9.5.4	金属刻蚀 .....	247
9.5.5	去光刻胶 .....	248
9.5.6	干法化学刻蚀 .....	248
9.5.7	整面干法刻蚀 .....	249
9.5.8	等离子体刻蚀的安全性 .....	249
9.6	刻蚀工艺发展趋势 .....	250
9.7	刻蚀工艺未来发展趋势 .....	251

9.8	小结 .....	252
9.9	参考文献 .....	252
9.10	习题 .....	253
<b>第 10 章</b>	<b>化学气相沉积与电介质薄膜 .....</b>	<b>254</b>
10.1	简介 .....	254
10.2	化学气相沉积 .....	256
10.2.1	CVD 技术说明 .....	256
10.2.2	CVD 反应器的类型 .....	258
10.2.3	CVD 基本原理 .....	259
10.2.4	表面吸附 .....	263
10.2.5	CVD 动力学 .....	266
10.3	电介质薄膜的应用 .....	268
10.3.1	浅沟槽绝缘(STI) .....	268
10.3.2	侧壁间隔层 .....	269
10.3.3	ILD0 .....	269
10.3.4	ILD1 .....	271
10.3.5	钝化保护电介质层(PD) .....	273
10.4	电介质薄膜特性 .....	273
10.4.1	折射率 .....	273
10.4.2	薄膜厚度 .....	275
10.4.3	薄膜应力 .....	279
10.5	电介质 CVD 工艺 .....	281
10.5.1	硅烷加热 CVD 工艺 .....	281
10.5.2	加热 TEOS CVD 工艺 .....	281
10.5.3	PECVD 硅烷工艺 .....	281
10.5.4	PECVD TEOS 工艺 .....	284
10.5.5	电介质回刻蚀工艺 .....	285
10.5.6	O <sub>3</sub> -TEOS 工艺 .....	287
10.6	旋涂硅玻璃 .....	290
10.7	高密度等离子体 CVD(HDP-CVD) .....	290
10.8	电介质 CVD 反应室清洁 .....	292
10.8.1	RF 等离子体清洁 .....	292
10.8.2	遥控等离子体清洁 .....	294
10.9	工艺发展趋势与故障排除 .....	295
10.9.1	硅烷 PECVD 工艺的发展趋势 .....	295
10.9.2	PE-TEOS 发展趋势 .....	296
10.9.3	O <sub>3</sub> -TEOS 发展趋势 .....	297
10.9.4	故障解决方法 .....	298
10.10	化学气相沉积工艺发展趋势 .....	299



10.10.1	低 $k$ 电介质	300
10.10.2	空气间隙	300
10.10.3	原子层沉积(ALD)	301
10.10.4	高 $k$ 电介质材料	302
10.11	小结	304
10.12	参考文献	305
10.13	习题	306
<b>第 11 章</b>	<b>金属化工艺</b>	<b>307</b>
11.1	简介	307
11.2	导电薄膜	309
11.2.1	多晶硅	309
11.2.2	硅化物	309
11.2.3	铝	310
11.2.4	钛	311
11.2.5	氮化钛	312
11.2.6	钨	314
11.2.7	铜	315
11.2.8	钼	316
11.2.9	钴	317
11.2.10	镍	317
11.3	金属薄膜特性	318
11.3.1	金属薄膜厚度	318
11.3.2	薄膜厚度的均匀性	321
11.3.3	应力	321
11.3.4	反射系数	322
11.3.5	薄片电阻	322
11.4	金属化学气相沉积	324
11.4.1	简介	324
11.4.2	钨 CVD	325
11.4.3	硅化钨 CVD	327
11.4.4	钛 CVD	328
11.4.5	氮化钛 CVD	328
11.4.6	铝 CVD	329
11.5	物理气相沉积	330
11.5.1	简介	330
11.5.2	蒸发工艺	330
11.5.3	溅镀	331
11.5.4	金属化工艺过程	334
11.6	铜金属化工艺	338