

国外电子与通信教材系列

微纳尺度制造工程 (第三版)

Fabrication Engineering
at the Micro-and Nanoscale
Third Edition

[美] 斯蒂芬 A·坎贝尔 著

严利人 张伟 等译

许军 审校



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

微纳尺度制造工程（第三版）

Fabrication Engineering at the Micro-and Nanoscale

Third Edition

[美] 斯蒂芬 A·坎贝尔 著

严利人 张 伟 等译

许 军 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是《微电子制造科学原理与工程技术》的第三版。本书系统地介绍了微电子制造科学原理与工程技术,覆盖了集成电路制造所涉及的所有基本单项工艺,包括光刻、等离子体和反应离子刻蚀、离子注入、扩散、氧化、蒸发、气相外延生长、溅射和化学气相淀积等。对每一种单项工艺,不仅介绍了它的物理原理和化学原理,还描述了用于集成电路制造的工艺设备。本书新增加的内容包括原子层淀积、电镀铜、浸润式光刻、纳米压印与软光刻、薄膜器件、有机发光二极管以及应变技术在 CMOS 工艺中的应用等,对于其他已经过时的或不再具有先进性的题材则做了适当的简化或删除处理。

本书可作为高等学校微电子专业本科生和研究生相应课程的教科书或参考书,也可供与集成电路制造工艺技术有关的专业技术人员学习参考。

Copyright © 2008 by Oxford University Press, Inc.

FABRICATION ENGINEERING AT THE MICRO- AND NANOSCALE, THIRD EDITION was originally published in English in 2008. This translation is published by arrangement with Oxford University Press for sale/distribution in The Mainland (part) of the People's Republic of China(excluding the territories of Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only and not for export therefrom.

本书简体中文专有版权由 Oxford University Press, Inc., U. S. A. 授予电子工业出版社出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制和抄袭本书的任何部分。

本书在中国大陆地区生产,仅限在中国大陆发行。

版权贸易合同登记号 图字:01-2010-5670

图书在版编目(CIP)数据

微纳尺度制造工程:第三版/(美)坎贝尔(Campbell,S.A.)著;严利人等译. —北京:电子工业出版社,2011.5
书名原文:Fabrication Engineering at the Micro and Nanoscale, 3/e

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-13428-9

I. ①微… II. ①坎… ②严… III. ①微电子技术-生产工艺-高等学校-教材 IV. ①TN405
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 079296 号

策划编辑:杨丽娟 特约编辑:叶光华

责任编辑:杨丽娟

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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:41.25 字数:1056 千字

印 次:2011 年 5 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:83.00 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。

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—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、南京邮电大学、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、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通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 北京邮电大学校长、教授、博士生导师
杨千里 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、博士生导师
- 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
清华大学深圳研究生院副院长
- 徐安士 北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
- 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
- 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
国务院学位委员会学科评议组成员
- 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副主任委员
中国电子学会常务理事
- 郑宝玉 南京邮电大学副校长、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副主任委员
- 朱世华 西安交通大学副校长、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副主任委员
- 彭启琮 电子科技大学教授、博士生导师
- 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兼秘书长，教授级高级工程师
信息产业部通信科技委副主任
- 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
教育部高等学校电子电气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、信息科学与技术学院院长

第三版译者序

美国明尼苏达大学电子与计算机工程系教授 Stephen A. Campbell 所著的《微电子制造科学原理与工程技术》(第二版)中译本自出版之日至今已近十年,在这十年里微电子器件的特征尺寸已从深亚微米发展到了纳米尺度,相应的器件与集成电路的工艺制造技术也获得了突飞猛进的发展。为了全面、及时、准确地反映微纳电子器件与集成电路工艺制造领域所取得的这些日新月异的进步,Stephen A. Campbell 教授对《微电子制造科学原理与工程技术》(第二版)做了大量的修订、补充和改写,推出了现在书名改为《微纳尺度制造工程》的第三版新教材。这本新版教材既包含了制造纳米尺度的主流 CMOS 集成电路所必须用到的各种基本的单项工艺,也包含了制造 GaAs MESFET 与 MMIC、硅双极型晶体管与集成电路、各种薄膜器件(如 TFT)以及 III-V 族发光二极管、激光器、有机发光二极管(OLED)等多种光电子器件所需用到的各种基本工艺,还包括了用于制造几种不同类型的微机电系统(MEMS)的特殊工艺。新版本同时还补充、更新了大量的参考文献以及例题和习题。因此本书不仅可作为大学微电子及相关专业高年级本科生或一年级研究生的理想教材,而且也可以作为我国微电子产业广大工程技术人员的一本非常有参考价值的工艺技术手册。

本书第三版的中译本仍然是由清华大学微电子学研究所的多位老师共同翻译的,全书最后由许军进行统一审校,第三版中译本尽可能更正了第二版中译本中存在的一些错误,但是限于译者和审校者的水平,新译本中的错误及疏漏之处仍然在所难免,还请广大读者在使用本书的过程中给予批评指正。

许 军
2011年5月 于清华园

第二版译者序

21 世纪将是微电子技术与产业持续发展的新世纪，微电子制造业作为一项战略性的基础产业，对于促进我国国民经济持续发展和保证我国国家安全具有举足轻重的地位。因此近年来，我们一直希望能向中国读者介绍一本有关微电子制造工艺技术方面内容新颖翔实、深入浅出的国外教材。现在，在电子工业出版社和我们清华大学微电子学研究所的努力下，这本书的中译本终于可以奉献给读者了，它就是美国明尼苏达大学电子与计算机工程系教授 Stephen A. Campbell 所著、牛津大学出版社最新出版的《微电子制造科学原理与工程技术》（第二版）。

Stephen A. Campbell 教授是明尼苏达大学微电子技术实验室主任，无论是在美国工业界还是在大学实验室，他在半导体器件与集成电路制造领域都享有盛誉并有丰富经验。他的力作《微电子制造科学原理与工程技术（第二版）》在第一版的基础上进行了修订和扩充，内容覆盖了集成电路制造需要的所有基本单项工艺，并讨论了如何将这些单项工艺集成为各种常见的集成电路工艺技术；介绍了各种先进的工艺技术，并评估了它们的工艺复杂程度和器件性能之间的折中考虑；不仅描述了它们的科学原理，而且介绍了用于集成电路制造的工艺设备。第二版还专门用一章的篇幅介绍了微电子制造的一个新领域，即微机械电子系统。各章附有参考文献和习题。因此本书不仅可作为大学高年级或一年级研究生的理想教材，而且也不失为一本有关专业工程技术人员的优秀参考书。

全书分 5 篇共 20 章。第 1 篇为微电子制造引论并介绍有关半导体衬底方面的知识；第 2 篇介绍热处理与离子注入工艺，包括扩散、热氧化、离子注入和快速热处理；第 3 篇介绍图形转移工艺，包括光刻和光刻胶、非光学光刻工艺、真空原理与等离子体以及刻蚀工艺；第 4 篇介绍薄膜工艺，包括物理淀积（蒸发与溅射）、化学气相淀积和外延生长；第 5 篇则在第 2 篇至第 4 篇介绍基本单项工艺的基础上研究了工艺集成，介绍了 CMOS 工艺技术、砷化镓工艺技术、硅双极型工艺技术和 MEMS 工艺技术，并讨论了集成电路制造中的工程问题，包括成品率、统计过程控制、计算机集成制造等。

本书由清华大学微电子学研究所多位老师翻译，其中前言和第 1 章由周润德翻译，第 2 章和第 19 章由严利人翻译，第 3 章、第 6 章和第 15 章由曾莹翻译，第 4 章和第 9 章由王纪民翻译，第 5 章和第 8 章由张伟翻译，第 7 章和第 12 章由朱钧翻译，第 10 章由刘荣华翻译，第 11 章和第 14 章由黄国华翻译，第 13 章和第 16 章由林发永翻译，第 17 章和第 18 章由许军翻译，第 20 章由刘志弘翻译，附录 A 至附录 F 由李瑞伟翻译。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，以“译者注”标明。全书由朱钧、林发永、严利人、曾莹校订。尽管进行了反复校订，但由于译者水平所限，不妥之处在所难免，望读者批评指正。

周润德

2002 年 10 月 于清华园

前 言

本书旨在向广大读者介绍与微电子以及纳尺度制造相关的工艺技术，它既可以用做大学四年级本科生和/或一年级研究生的教科书，也可以作为专业工程技术人员的参考书，写作本书的目的是为读者提供一本易读易懂的书。书中同时涵盖了硅基工艺技术和砷化镓工艺技术，但是重点仍然放在硅基技术上，在与砷化镓工艺相关的章节中还简要介绍了一些有机化合物材料器件和薄膜器件。本书假定读者已经学过一年的物理，一年的数学（包括简单的微分方程）和一门化学课。大多数具有电机工程背景的学生也一定学过至少一门包含 PN 结和 MOS 晶体管内容的半导体物理与器件课程，这些知识对于本书最后五章是非常有用的。对于以前从未接触过这些知识的学生或者是那些对上述知识现在已感到有点生疏的学生，我们在本书第 16 章至第 18 章的第一节中将会复习这些内容。鼓励读者可以先学一门基础统计学方面的课程，但是它对于本课程的学习并不是必需的。

典型的微电子学教科书通常是把完整的制造工序划分成许多单项工艺，重复这些单项工艺就可以制成集成电路。因此本书具有综述的特点：它包含许多联系并不紧密的题材，每个题材都有各自的背景材料。对于大多数学生来说，回顾所有这些背景材料是有困难的，他们只是在两年或三年前以及在许多次期末考试前看过这些材料。在学习新知识之前重新列出这些基础材料是十分重要的，为此本书每一章中都包含了工程技术所基于的科学原理，这些章节标有“°”符号，以便区分永远不变的科学规律和这些规律在现有技术中的应用，并附有所有近似及适用范围的说明。例如，任何一种光学光刻技术都具有有限的生命期，而衍射规律却是永远成立的。

讲授这一类课程时经常会遇到的第二个问题是描述工艺过程的方程往往无法得到解析解。以扩散为例，费克定律具有解析解，但是它们只是在一个非常有限的参数范围内成立。预淀积扩散是在很高浓度下完成的，在这样高的浓度下，求解时所做的简化假设根本就不成立。在光刻工艺方面，甚至像 Fresnel 方程的最简解也超出了本书的范围。本书应用了目前普遍采用的 Silvaco™ 公司提供的一套商业化模拟工具，这是一套工业化的标准应用软件，它对教育机构的售价非常低。对于那些不支持这一软件的学校，我们还将利用基于网络的软件来重复上述模拟实例，这些基于网络的软件可以在纳米中心的网站（www.nanohub.org）上免费获得。有关这些模拟实例的详细介绍资料也可以在下面给出的网址中获得：www.nano.umn.edu/simexamples。注意使用这一软件的目的是要扩充而不是完全替代学习描述微电子工艺过程的基本方程。这一软件通常可以安装在基于 UNIX 或 Windows 操作系统的计算机上。为了进一步丰富本书的基本内容，书中还额外增加了有关章节来介绍多项工艺技术的集成以及一些更先进的工艺技术，增加的这些章节都标有“+”符号。如果时间不允许，这些章节也可以略去不讲授，且不会影响本课程基本内容的完整性。

第三版中还增加了许多新的题材以保持本书内容的先进性。这些新增加的内容包括原子层淀积、电镀铜、浸润式光刻、纳米压印与软光刻、薄膜器件、有机发光二极管以及应变技术在 CMOS 工艺中的应用等，对于其他已经过时的或不再具有先进性的题材则做了适当的简

化或删除处理。

最后，我们必须承认，无论这些材料被检查过多少遍，都依然不能保证它们（尽管我们希望）没有一点小错。以往，当发现的错误足够多或错误很明显时，出版社都会提供一个勘误表。但是即使有了这样的勘误表，要把它送到每一位购书人那里也是非常困难的，这也就意味着一般的读者在该书新版或修订版出版之前通常都无法知道大部分的修正结果。本书将提供一个网络版的勘误文件，任何人在任何时间都可以去查看它。我们还将提供本书的一些小的补充材料，这些补充材料在本书刚出版时读者也是无法得到的。读者可以去牛津大学出版社网站有关本书的部分，即 www.oup.com/us/he/CampbellFabrication 去获得和查看该文件。作者也将在这一网址随时增加其他小的更新内容和新的题材。如果读者感到本书中有哪些内容需要更正或需要进一步讲清楚的，请通过我的电子邮件（scampbell@umn.edu）告诉我，并请一定附上你的理由和引证已发表的参考资料。

明尼阿波利斯 S. A. C.

目 录

第 1 篇 综述与题材

第 1 章 微电子制造引论	2
1.1 微电子工艺：一个简单的实例	4
1.2 单项工艺与工艺技术	6
1.3 本课程教程	7
1.4 小结	8
第 2 章 半导体衬底	9
2.1 相图与固溶度°	9
2.2 结晶学与晶体结构°	13
2.3 晶体缺陷	14
2.4 直拉法 (Czochralski 法) 单晶生长	20
2.5 Bridgman 法生长 GaAs	28
2.6 区熔法单晶生长	29
2.7 晶圆片制备和规格	30
2.8 小结与未来发展趋势	32
习题	32
参考文献	33

第 2 篇 单项工艺 1：热处理与离子注入

第 3 章 扩散	38
3.1 一维费克扩散方程	38
3.2 扩散的原子模型	40
3.3 费克定律的分析解	44
3.4 常见杂质的扩散系数	47
3.5 扩散分布的分析	51
3.6 SiO ₂ 中的扩散	56
3.7 扩散分布的数值模拟	58
3.8 小结	63
习题	63
参考文献	65
第 4 章 热氧化	68
4.1 迪尔 - 格罗夫氧化模型	68
4.2 线性和抛物线速率系数	70

4.3	初始阶段的氧化	73
4.4	SiO ₂ 的结构	76
4.5	氧化层的特性	78
4.6	掺杂杂质对氧化和多晶氧化过程的影响	84
4.7	硅的氮氧化物	88
4.8	其他可选的栅绝缘层 ⁺	89
4.9	氧化系统	92
4.10	氧化过程的数值模拟 ⁺	94
4.11	小结	97
	习题	97
	参考文献	99
第5章	离子注入	103
5.1	理想化的离子注入系统	103
5.2	库仑散射 ^o	108
5.3	垂直投影射程	109
5.4	沟道效应和横向投影射程	115
5.5	注入损伤	117
5.6	浅结的形成 ⁺	121
5.7	埋层介质 ⁺	123
5.8	离子注入系统的问题和关注点	125
5.9	注入分布的数值模拟 ⁺	126
5.10	小结	128
	习题	128
	参考文献	130
第6章	快速热处理	134
6.1	灰体辐射, 热交换和光吸收 ^o	135
6.2	高强度光源和反应腔设计	137
6.3	温度测量	141
6.4	热塑应力 ^o	145
6.5	杂质的快速热激活	146
6.6	介质的快速热加工	148
6.7	硅化物和接触的形成	150
6.8	其他的快速热处理系统	151
6.9	小结	152
	习题	153
	参考文献	153

第3篇 单项工艺2: 图形转移

第7章	光学光刻	160
------------	-------------	------------

7.1	光学光刻概述	160
7.2	衍射°	164
7.3	调制传输函数和光学曝光	167
7.4	光源系统和空间相干	170
7.5	接触式/接近式光刻机	175
7.6	投影光刻机	178
7.7	先进掩模概念+	185
7.8	表面反射和驻波	187
7.9	对准	190
7.10	小结	191
	习题	191
	参考文献	192
第8章	光刻胶	195
8.1	光刻胶类型	195
8.2	有机材料和聚合物°	195
8.3	DQN 正胶的典型反应	198
8.4	对比度曲线	200
8.5	临界调制传输函数	202
8.6	光刻胶的涂敷和显影	203
8.7	二级曝光效应	207
8.8	先进的光刻胶和光刻胶工艺+	211
8.9	小结	215
	习题	215
	参考文献	217
第9章	非光学光刻技术+	220
9.1	高能射线与物质之间的相互作用°	220
9.2	直写电子束光刻系统	223
9.3	直写电子束光刻: 总结与展望	230
9.4	X 射线源°	232
9.5	接近式 X 射线系统	235
9.6	薄膜型掩模版	238
9.7	投影式 X 射线光刻	240
9.8	投影电子束光刻 (SCALPEL)	241
9.9	电子束和 X 射线光刻胶	243
9.10	MOS 器件中的辐射损伤	245
9.11	软光刻与纳米压印光刻	246
9.12	小结	250
	习题	250
	参考文献	251

第 10 章 真空科学与等离子体	257
10.1 气体动力学理论°	257
10.2 气体的流动及其传导率	259
10.3 压力范围与真空泵	262
10.4 真空密封与压力测量	267
10.5 直流辉光放电°	269
10.6 射频放电	271
10.7 高密度等离子体	273
10.8 小结	276
习题	276
参考文献	278
第 11 章 刻蚀	279
11.1 湿法刻蚀	280
11.2 化学机械抛光	285
11.3 等离子体刻蚀基本分类	288
11.4 高压等离子体刻蚀	288
11.5 离子铣	295
11.6 反应离子刻蚀	299
11.7 反应离子刻蚀中的损伤 ⁺	302
11.8 高密度等离子体 (HDP) 刻蚀	304
11.9 剥离技术	306
11.10 小结	307
习题	308
参考文献	309

第 4 篇 单项工艺 3: 薄膜及概述

第 12 章 物理淀积: 蒸发和溅射	318
12.1 相图: 升华和蒸发°	318
12.2 淀积速率	320
12.3 台阶覆盖	323
12.4 蒸发系统: 坩埚加热技术	326
12.5 多组分薄膜	328
12.6 溅射简介	329
12.7 溅射物理°	330
12.8 淀积速率: 溅射产额	331
12.9 高密度等离子体溅射	334
12.10 形貌和台阶覆盖	336
12.11 溅射方法	339
12.12 特殊材料溅射	341

12.13	淀积膜内的应力	343
12.14	小结	344
	习题	345
	参考文献	346
第 13 章	化学气相淀积	350
13.1	一种用于硅淀积的简单 CVD 系统	350
13.2	化学平衡和质量作用定律°	351
13.3	气体流动和边界层°	355
13.4	简单 CVD 系统的评价	359
13.5	介质的常压 CVD	360
13.6	热壁系统中介质和半导体的低压 CVD	362
13.7	介质的等离子体增强化学气相淀积 (PECVD)	367
13.8	金属 CVD ⁺	371
13.9	原子层淀积	374
13.10	电镀铜	376
13.11	小结	379
	习题	379
	参考文献	380
第 14 章	外延生长	385
14.1	晶圆片清洗和自然氧化物去除	386
14.2	气相外延生长的热动力学	389
14.3	表面反应	393
14.4	掺杂剂的引入	394
14.5	外延生长缺陷	395
14.6	选择性生长 ⁺	397
14.7	卤化物输运 GaAs 气相外延	398
14.8	不共度和应变异质外延	398
14.9	金属有机物化学气相淀积 (MOCVD)	402
14.10	先进的硅气相外延生长技术	406
14.11	分子束外延技术	409
14.12	BCF 理论 ⁺	413
14.13	气态源 MBE 和化学束外延 ⁺	418
14.14	小结	418
	习题	419
	参考文献	420

第 5 篇 工艺集成概述

第 15 章	器件隔离、接触和金属化	427
15.1	PN 结隔离和氧化物隔离	427

15.2	LOCOS (硅的局部氧化) 技术	430
15.3	沟槽隔离	433
15.4	绝缘体上硅隔离技术	436
15.5	半绝缘衬底	437
15.6	肖特基接触	439
15.7	注入形成的欧姆接触	443
15.8	合金接触	447
15.9	多层金属化	448
15.10	平坦化和先进的互连工艺	453
15.11	小结	458
	习题	459
	参考文献	460
第 16 章	CMOS 技术	466
16.1	基本长沟道器件特性	466
16.2	早期 MOS 工艺技术	469
16.3	基本的 $3\mu\text{m}$ 工艺技术	470
16.4	器件等比例缩小	474
16.5	热载流子效应和漏极工程	482
16.6	闩锁效应	485
16.7	浅源/漏和特定沟道掺杂	488
16.8	通用曲线与先进的 CMOS 工艺	490
16.9	小结	493
	习题	493
	参考文献	496
第 17 章	其他类型晶体管的工艺技术	502
17.1	基本的 MESFET 工作原理	502
17.2	基本的 MESFET 工艺技术	503
17.3	数字电路工艺技术	505
17.4	单片微波集成电路技术	510
17.5	调制掺杂场效应晶体管 (MODFETs)	514
17.6	双极型器件回顾: 理想与准理想特性	516
17.7	双极型晶体管的性能	517
17.8	早期的双极型工艺技术	520
17.9	先进的双极型工艺技术	524
17.10	双极 - CMOS 兼容工艺技术 (BiCMOS)	533
17.11	薄膜晶体管	536
17.12	小结	539
	习题	540
	参考文献	543

第 18 章 光电子器件工艺技术	548
18.1 光电子器件概述	548
18.2 直接带隙的无机材料发光二极管	550
18.3 聚合物/有机发光二极管	553
18.4 激光器	555
18.5 小结	556
参考文献	556
第 19 章 微机电系统	557
19.1 力学基础知识	558
19.2 薄膜中的应力	560
19.3 机械量到电量的变换	561
19.4 常见 MEMS 器件力学性质	565
19.5 体微机械制造中的刻蚀技术	568
19.6 体微机械工艺流程	576
19.7 表面微机械制造基础	581
19.8 表面微机械加工工艺流程	584
19.9 MEMS 执行器	587
19.10 大深宽比的微系统技术	591
19.11 小结	593
习题	593
参考文献	595
第 20 章 集成电路制造	599
20.1 成品率的预测和追踪	600
20.2 颗粒控制	605
20.3 统计过程控制	607
20.4 全因素试验和方差分析	610
20.5 试验设计	612
20.6 计算机集成制造	616
20.7 小结	618
习题	618
参考文献	619
附录 A 缩写与通用符号	621
附录 B 部分半导体材料的性质	628
附录 C 物理常数	629
附录 D 单位转换因子	631
附录 E 误差函数的一些性质	635
附录 F F 数	639