

国外电子与通信教材系列

英文版

微纳尺度制造工程 (第三版)

[美] 斯蒂芬 A·坎贝尔 著



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)

(英文版)

[美] 斯蒂芬 A. 坎贝尔 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是*The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*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 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.

本书英文影印版专有出版权由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：01-2010-5671

图书在版编目(CIP)数据

微纳尺度制造工程=Fabrication Engineering at the Micro- and Nanoscale: 第三版: 英文/(美)坎贝尔(Campbell, S.A.)著. —北京: 电子工业出版社, 2010.9

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-11804-3

I. ①微... II. ①坎... III. ① 微电子技术-高等学校-教材-英文 IV. ① TN405

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第178312号

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: 787×980 1/16 印张: 41.25 字数: 924千字

印 次: 2010年9月第1次印刷

定 价: 69.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题, 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zllts@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”。

为做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 | 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，教授级高工
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 |

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，它既可以用作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。书中同时覆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，第17章和第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，菲克定律具有解析解，但是它们只是在一个非常有限的参数范围内成立。沉淀积扩散是在很高浓度下完成的，在这样高的浓度下，求解时所作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。如果时间不允许的话，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。

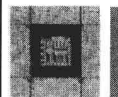
最后，我们必须承认，无论这些材料被检查过多少遍，都依然不能保证它们（尽管我们希望）没有一点小错。以往，当发现的错误足够多或错误很明显的时候，出版社会提供一个勘误表。但是即

使当勘误表出版时，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无法知道大部分的修正。本书将提供一个勘误文件，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/Campbell-Fabrication 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改正或需要讲清楚的，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。

S.A.C.

于明尼阿波利斯市

Preface



The intent of this book is to introduce microelectronic and some aspects of nano-processing to a wide audience. I wrote it as a textbook for seniors and/or first-year graduate students, but it may also be used as a reference for practicing professionals.

The goal has been to provide a book that is easy to read and understand. Both silicon and GaAs processes and technologies are covered, although the emphasis is on silicon-based technologies. The later sections also deal briefly with organic and thin film devices. The book assumes one year of physics, one year of mathematics (through simple differential equations), and one course in chemistry. Most students with electrical engineering backgrounds will also have had at least one course in semiconductor physics and devices including pn junctions and MOS transistors. This material is extremely useful for the last five chapters and is reviewed in the first sections of Chapters 16, 17, and 18 for students who haven't seen it before or find that they are a bit rusty. One course in basic statistics is also encouraged but is not required for this course.

Microelectronics textbooks typically divide the fabrication sequence into a number of unit processes that are repeated to form the integrated circuit. The effect is to give the book a survey flavor: a number of loosely related topics each with its own background material. Most students have difficulty recalling all of the background material. They have seen it once, two or three years and many final exams ago. It is important that this fundamental material be reestablished before students take up new material. Distributed through each chapter of this book are reviews of the science that underlies the engineering. These sections, marked with an “*o*”, also help make the distinction between the immutable scientific laws and the applications of those laws, with all the attendant approximations and caveats, to the technology at hand. Optical lithography, for instance, may have a limited life, but diffraction will always be with us.

A second problem that arises in teaching this type of course is that the solution of the equations describing the process often cannot be done analytically. Consider diffusion as an example. Fick's laws have analytic solutions, but they are valid only in a very restricted parameter space. Predeposition diffusions are done at high concentrations at which the simplifying assumption used in the solution derivation are simply not valid. In the area of lithography even the simplest solutions of the Fresnel equations are beyond the scope of the book. This text uses a widely used suite of simulation tools supplied commercially by Silvaco™. These are “industry standards” and are provided at low cost to educational institutions. For institutions that do not support this software, I plan to replicate the examples using web-based software that is available at no cost on the nanohub website (www.nanohub.org). Information on these examples will be available at www.nano.umn.edu/simexamples. The software is intended to augment, not replace, learning the fundamental equations that describe microelectronic processing. Typical installations include UNIX and Windows-based computers. The book also enriches the basic material with additional sections and chapters on process integration for various technologies and on more advanced processes. This additional material is in sections marked with a “+”. If time does not permit covering these sections, they may be omitted without loss of the basic content of the course.

The third edition has added a variety of topics to keep it current. This includes atomic layer deposition, electroplating, immersion lithography, nanoimprint and soft lithography, thin film devices, organic light-emitting diodes, and the use of strain in CMOS. Other topics that are of less current interest were de-emphasized or removed.

Finally, one has to acknowledge that, no matter how many times material is reviewed, it cannot be guaranteed to be free of all (hopefully) minor errors. In the past, publishers have provided errata when errors were sufficiently numerous or egregious. Even when errata are published, they are very difficult to get to people who have already bought the book. This means that the average reader is often unaware of most of the corrections until a new or revised edition of the book is released. This book will have an errata file that anyone can access at any time. We will also provide minor additions to the book that were not available at press time. You can access the file by going to the Oxford University Press website for the book, www.oup.com/us/he/CampbellFabrication. As time goes on I will be adding other minor updates and new topics on this site as well. If you find something that you feel needs correction or clarification in the book, I invite you to notify me at my e-mail address, scampbell@umn.edu. Please be sure to include your justification, citing published references.

Minneapolis

S.A.C.

目录概览

第1篇 综述与题材

第1章 微电子制造引论	3
第2章 半导体衬底	10

第2篇 单项工艺 1：热处理与离子注入

第3章 扩散	43
第4章 热氧化	74
第5章 离子注入	107
第6章 快速热处理	140

第3篇 单项工艺 2：图形转移

第7章 光学光刻	165
第8章 光刻胶	199
第9章 非光学光刻技术	224
第10章 真空科学与等离子体	259
第11章 刻蚀	283

第4篇 单项工艺3: 薄膜

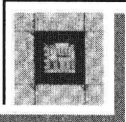
第12章 物理淀积: 蒸发与溅射	323
第13章 化学气相淀积	356
第14章 外延生长	391

第5篇 工艺集成

第15章 器件隔离、接触与金属化	437
第16章 CMOS工艺	475
第17章 其他类型晶体管的工艺技术	509
第18章 光电子器件工艺技术	547
第19章 微机电系统	555
第20章 集成电路制造	599
附录I 缩写词与通用符号	620
附录II 部分半导体材料性质	626
附录III 物理常数	627
附录IV 单位转换因子	629
附录V 误差函数的一些性质	632
附录VI F数	636

Contents

Preface XIX



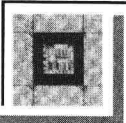
Part I Overview and Materials 1

Chapter 1 An Introduction to Microelectronic Fabrication 3

- 1.1 Microelectronic Technologies: A Simple Example 5
- 1.2 Unit Processes and Technologies 7
- 1.3 A Roadmap for the Course 8
- 1.4 Summary 9

Chapter 2 Semiconductor Substrates 10

- 2.1 Phase Diagrams and Solid Solubility^o 10
- 2.2 Crystallography and Crystal Structure^o 14
- 2.3 Crystal Defects 16
- 2.4 Czochralski Growth 22
- 2.5 Bridgman Growth of GaAs 30
- 2.6 Float Zone Growth 32
- 2.7 Wafer Preparation and Specifications 33
- 2.8 Summary and Future Trends 35
- Problems 35
- References 36



Part II Unit Processes I: Hot Processing and Ion Implantation 41

Chapter 3 Diffusion 43

- 3.1 Fick's Diffusion Equation in One Dimension 43
- 3.2 Atomistic Models of Diffusion 45
- 3.3 Analytic Solutions of Fick's Law 50
- 3.4 Diffusion Coefficients for Common Dopants 53
- 3.5 Analysis of Diffused Profiles 56
- 3.6 Diffusion in SiO₂ 62

^oThis section provides background material.

3.7	Simulations of Diffusion Profiles	64
3.8	Summary	69
	Problems	69
	References	71

Chapter 4 **Thermal Oxidation** 74

4.1	The Deal–Grove Model of Oxidation	74
4.2	The Linear and Parabolic Rate Coefficients	77
4.3	The Initial Oxidation Regime	81
4.4	The Structure of SiO ₂	83
4.5	Oxide Characterization	84
4.6	The Effects of Dopants During Oxidation and Polysilicon Oxidation	91
4.7	Silicon Oxynitrides	94
4.8	Alternative Gate Insulators ⁺	95
4.9	Oxidation Systems	97
4.10	Numeric Oxidations ⁺	99
4.11	Summary	101
	Problems	101
	References	103

Chapter 5 **Ion Implantation** 107

5.1	Idealized Ion Implantation Systems	108
5.2	Coulomb Scattering ^o	113
5.3	Vertical Projected Range	114
5.4	Channeling and Lateral Projected Range	120
5.5	Implantation Damage	122
5.6	Shallow Junction Formation ⁺	126
5.7	Buried Dielectrics ⁺	128
5.8	Ion Implantation Systems: Problems and Concerns	130
5.9	Numerical Implanted Profiles	132
5.10	Summary	134
	Problems	134
	References	136

Chapter 6 **Rapid Thermal Processing** 140

6.1	Gray Body Radiation, Heat Exchange, and Optical Absorption ^o	141
6.2	High Intensity Optical Sources and Chamber Design	144
6.3	Temperature Measurement	147
6.4	Thermoplastic Stress ^o	151
6.5	Rapid Thermal Activation of Impurities	152
6.6	Rapid Thermal Processing of Dielectrics	154
6.7	Silicidation and Contact Formation	155
6.8	Alternative Rapid Thermal Processing Systems	156
6.9	Summary	157
	Problems	157
	References	158

⁺This section contains advanced material and can be omitted without loss of the basic content of the course.

Part III Unit Processes 2: Pattern Transfer 163

Chapter 7 Optical Lithography 165

- 7.1 Lithography Overview 165
- 7.2 Diffraction^o 169
- 7.3 The Modulation Transfer Function and Optical Exposures 172
- 7.4 Source Systems and Spatial Coherence 175
- 7.5 Contact/Proximity Printers 179
- 7.6 Projection Printers 183
- 7.7 Advanced Mask Concepts⁺ 189
- 7.8 Surface Reflections and Standing Waves 192
- 7.9 Alignment 194
- 7.10 Summary 195
- Problems 195
- References 196

Chapter 8 Photoresists 199

- 8.1 Photoresist Types 199
- 8.2 Organic Materials and Polymers^o 200
- 8.3 Typical Reactions of DQN Positive Photoresist 202
- 8.4 Contrast Curves 204
- 8.5 The Critical Modulation Transfer Function 207
- 8.6 Applying and Developing Photoresist 207
- 8.7 Second-Order Exposure Effects 211
- 8.8 Advanced Photoresists and Photoresist Processes⁺ 215
- 8.9 Summary 219
- Problems 219
- References 221

Chapter 9 Nonoptical Lithographic Techniques⁺ 224

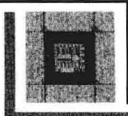
- 9.1 Interactions of High Energy Beams with Matter^o 225
- 9.2 Direct-Write Electron Beam Lithography Systems 227
- 9.3 Direct-Write Electron Beam Lithography: Summary and Outlook 233
- 9.4 X-ray Sources^o 235
- 9.5 Proximity X-ray Exposure Systems 238
- 9.6 Membrane Masks 240
- 9.7 Projection X-ray Lithography 242
- 9.8 Projection Electron Beam Lithography (SCALPEL) 244
- 9.9 E-beam and X-ray Resists 245
- 9.10 Radiation Damage in MOS Devices 247
- 9.11 Soft Lithography and Nanoimprint Lithography 249
- 9.12 Summary 252
- Problems 252
- References 253

Chapter 10 **Vacuum Science and Plasmas** 259

- 10.1 The Kinetic Theory of Gases^o 259
- 10.2 Gas Flow and Conductance 262
- 10.3 Pressure Ranges and Vacuum Pumps 265
- 10.4 Vacuum Seals and Pressure Measurement 271
- 10.5 The DC Glow Discharge^o 273
- 10.6 RF Discharges 275
- 10.7 High Density Plasmas 277
- 10.8 Summary 280
- Problems 280
- References 282

Chapter 11 **Etching** 283

- 11.1 Wet Etching 284
- 11.2 Chemical Mechanical Polishing 289
- 11.3 Basic Regimes of Plasma Etching 291
- 11.4 High Pressure Plasma Etching 292
- 11.5 Ion Milling 300
- 11.6 Reactive Ion Etching 303
- 11.7 Damage in Reactive Ion Etching⁺ 307
- 11.8 High Density Plasma (HDP) Etching 308
- 11.9 Liftoff 310
- 11.10 Summary 311
- Problems 312
- References 313



Part IV **Unit Processes 3: Thin Films** 321

Chapter 12 **Physical Deposition: Evaporation and Sputtering** 323

- 12.1 Phase Diagrams: Sublimation and Evaporation^o 324
- 12.2 Deposition Rates 325
- 12.3 Step Coverage 329
- 12.4 Evaporator Systems: Crucible Heating Techniques 331
- 12.5 Multicomponent Films 334
- 12.6 An Introduction to Sputtering 335
- 12.7 Physics of Sputtering^o 336
- 12.8 Deposition Rate: Sputter Yield 337
- 12.9 High Density Plasma Sputtering 339
- 12.10 Morphology and Step Coverage 341
- 12.11 Sputtering Methods 345
- 12.12 Sputtering of Specific Materials 346
- 12.13 Stress in Deposited Layers 349
- 12.14 Summary 350
- Problems 350
- References 352

Chapter 13	Chemical Vapor Deposition	356
13.1	A Simple CVD System for the Deposition of Silicon	356
13.2	Chemical Equilibrium and the Law of Mass Action ^o	358
13.3	Gas Flow and Boundary Layers ^o	361
13.4	Evaluation of the Simple CVD System	366
13.5	Atmospheric CVD of Dielectrics	367
13.6	Low Pressure CVD of Dielectrics and Semiconductors in Hot Wall Systems	368
13.7	Plasma-enhanced CVD of Dielectrics	373
13.8	Metal CVD ⁺	377
13.9	Atomic Layer Deposition	380
13.10	Electroplating Copper	382
13.11	Summary	384
	Problems	384
	References	385
Chapter 14	Epitaxial Growth	391
14.1	Wafer Cleaning and Native Oxide Removal	392
14.2	The Thermodynamics of Vapor Phase Growth	396
14.3	Surface Reactions	400
14.4	Dopant Incorporation	401
14.5	Defects in Epitaxial Growth	402
14.6	Selective Growth ⁺	405
14.7	Halide Transport GaAs Vapor Phase Epitaxy	405
14.8	Incommensurate and Strained Layer Heteroepitaxy	406
14.9	Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD)	409
14.10	Advanced Silicon Vapor Phase Epitaxial Growth Techniques	414
14.11	Molecular Beam Epitaxy Technology	417
14.12	BCF Theory ⁺	422
14.13	Gas Source MBE and Chemical Beam Epitaxy ⁺	427
14.14	Summary	428
	Problems	428
	References	429

Part V Process Integration 435

Chapter 15	Device Isolation, Contacts, and Metallization	437
15.1	Junction and Oxide Isolation	437
15.2	LOCOS Methods	440
15.3	Trench Isolation	443
15.4	Silicon-on-Insulator Isolation Techniques	446
15.5	Semi-insulating Substrates	447
15.6	Schottky Contacts	449
15.7	Implanted Ohmic Contacts	453
15.8	Alloyed Contacts	456
15.9	Multilevel Metallization	457
15.10	Planarization and Advanced Interconnect	462
15.11	Summary	467
	Problems	468
	References	469