

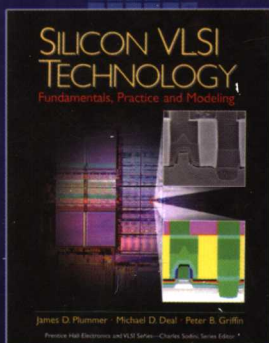
国外电子与通信教材系列

PEARSON
Prentice
Hall

硅超大规模 集成电路工艺技术

——理论、实践与模型

Silicon VLSI Technology
Fundamentals, Practice and Modeling



James D. Plummer

[美] Michael D. Deal 著

Peter B. Griffin

严利人 王玉东 熊小义 等译

许军 审校



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

www.phei.com.cn

国外电子与通信教材系列

硅超大规模 集成电路工艺技术

——理论、实践与模型

Silicon VLSI Technology
Fundamentals, Practice and Modeling

James D. Plummer

[美] Michael D. Deal 著

Peter B. Griffin

严利人 王玉东 熊小义 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

本书是美国斯坦福大学电气工程系“硅超大规模集成电路制造工艺”课程所使用的教材,该课程是为电气工程系微电子学专业的四年级本科生及一年级研究生开设的一门专业课。本书最大的特点是,不仅详细介绍了与硅超大规模集成电路芯片生产制造相关的实际工艺技术,而且还着重讲解了这些工艺技术背后的科学原理。特别是对于每一步单项工艺技术,书中都通过工艺模型和工艺模拟软件,非常形象直观地给出了实际工艺过程的物理图像。同时全书还对每一步单项工艺技术所要用的测量方法做了详细的介绍,对于工艺技术与工艺模型的未来发展趋势也做了必要的分析讨论。另外,本书每一章后面都附有相关内容的参考文献,同时还附有大量习题。

对于我国高等院校微电子学专业的教师及学生,本书是一本不可多得优秀教材和教学参考书,并可供相关领域的工程技术人员学习参考。

Simplified Chinese edition Copyright © 2005 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice and Modeling, ISBN: 0130850373 by James D. Plummer, Michael D. Deal, Peter B. Griffin. Copyright © 2000.

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:01-2002-5698

图书在版编目(CIP)数据

硅超大规模集成电路工艺技术——理论、实践与模型/(美)普卢默(Plummer, J. D.)等著;严利人等译.
北京:电子工业出版社,2005.12

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice and Modeling

ISBN 7-121-01987-6

I. 硅... II. ①普... ②严... III. 硅化物-应用-超大规模集成电路-教材 IV. TN47

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第138819号

责任编辑:陶淑毅

印 刷:北京智力达印刷有限公司

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:40 字数:1050千字

印 次:2005年12月第1次印刷

定 价:68.00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zltts@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
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	南京邮电大学副校长、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

超大规模集成电路技术是现代电子信息科学技术的重要基石,同时也是衡量一个国家整体科学技术发展水平和综合国力的主要标志之一。进入 21 世纪以来,随着改革开放力度的不断加大,我国微电子产业也获得了长足的进步,目前我国集成电路芯片生产的主流工艺已经达到了 $0.18 \sim 0.13 \mu\text{m}$,部分技术领先的企业甚至已经开始了 90 nm 工艺的试生产,可以说与国际水平基本保持同步。但是我们也必须清醒地看到,与国际上微电子技术的发达国家相比,我们仍然存在着相当大的差距,因为集成电路的生产制造大国绝不等同于集成电路的研发强国,如果我们不能牢牢掌握若干具有自主知识产权的关键核心技术,那么庞大的生产能力也就可能只是国外各种先进集成电路产品的廉价加工厂而已,因此我们必须尽快地实现由集成电路生产制造大国向集成电路研发强国的转变。为了全面提高我国超大规模集成电路工艺技术人员培养质量和教学水平,在电子工业出版社的支持下,我们清华大学微电子学研究所的几位老师共同翻译了美国斯坦福大学电机工程系的这本《硅超大规模集成电路工艺技术——理论、实践与模型》教材。

本书是美国斯坦福大学电机工程系“硅超大规模集成电路制造工艺”课程所使用的教材,其作者 James D. Plummer、Michael D. Deal 和 Peter B. Griffin 三位教授是斯坦福大学电机工程系的资深教授,长期从事硅超大规模集成电路工艺技术领域前瞻性的教学与科研工作,在微电子工艺技术的理论、实践与建模方面具有非常深厚的造诣,该课程是为电机工程系微电子学专业的四年级本科生或一年级研究生开设的一门专业课。本书最大的特点是不仅详细地介绍了与硅超大规模集成电路芯片生产制造相关的实际工艺技术,而且还着重讲解了这些工艺技术背后的科学原理。特别是对于每一步单项工艺技术,书中都通过工艺模型的引入和工艺模拟软件的使用,非常形象直观地给出了实际工艺过程的物理图像。书中同时还对每一步单项工艺技术所要用的测量方法做了详细的介绍,对于工艺技术与工艺模型的未来发展趋势,也做了必要的分析讨论。另外本书每一章后面都附有相关内容的参考文献,同时还附有大量的习题。本书作者之一 James D. Plummer 教授在访问清华大学微电子学研究所时也向我们热情地推荐了此书。对于我国高等院校微电子学专业的教学工作来说,本书确实是一本不可多得优秀教材和教学参考书。对于我国微电子产业的广大科技工作者来说,本书同样也是一本非常有参考价值的工艺技术手册。

本书由清华大学微电子学研究所的多位老师共同翻译,其中前言、第 1 章、第 2 章、第 4 章、附录和术语表由许军翻译,第 3 章由刘志弘翻译,第 5 章由严利人翻译,第 6 章由林发永翻译,第 7 章由王纪民翻译,第 8 章由张伟翻译,第 9 章由朱钧翻译,第 10 章由王玉东翻译,第 11 章由熊小义翻译,全书最后由许军进行统一审校。鉴于译者和审校者的水平所限,译本中的错误及疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

前 言

硅集成电路无疑是我们这个时代所创造的当之无愧的奇迹之一,正是这种能够将数以千万计的元器件集成于一块面积只有几平方厘米的硅芯片上的能力造就了今天的信息时代。

从 1945 年到 1970 年,人类在这一段时期内所取得的一系列基本发现与发明奠定了今天这些微芯片的基础。在过去的 30 年里,芯片的复杂性一直是以指数增长的速度在不断增加,这主要是由于器件尺寸的持续缩小、器件工艺技术的不断改进以及一些采用创新方法实现某些特定功能的灵巧的发明。缩小器件的几何尺寸可以使得同样大小的硅芯片面积上能够集成更多的器件;改进工艺技术可以使得面积更大的芯片也能够比较经济地制造出来;而灵巧的创新发明则可以在较小的芯片面积上实现更为复杂的电路功能。目前人们普遍认为这种历史的发展趋势还会继续向前延续至少 10 年到 20 年,由此形成的芯片最终可能会集成有几十亿只元器件,这种芯片将会表现出令人惊异的功能。在经过了 10 年到 20 年之后,我们将会发现,相对于那个时候所能制造出来的芯片而言,我们今天的芯片可能就成了非常原始的老古董了。

今天我们用来制造硅集成电路的工艺技术在很大程度上是由经验性的方法发展而来的。我们常常有这样的感觉,就是集成电路芯片产业发展的速度如此之快,新产品层出不穷,以至于人们几乎没有多少时间来认真思考芯片技术赖以存在的科学基础。但是事实上在芯片产业快速发展的背后,人们也同时在努力为芯片制造工艺所用到的各项生产技术建立一个牢固的物理基础。考虑到现代集成电路芯片中各种结构的特征尺寸已进入纳米尺度,我们对上述这种物理基础的认识通常也必须从分子或者原子的水平来建立。例如,对于二氧化硅的形成,如果我们仍然只是简单地将其看成是硅与氧气发生化学反应生成二氧化硅,则显然是远远不够的。今天必须从原子理论的基础上详细了解硅原子与氧原子之间的化学键结构以及促成这个化学反应发生的动力学机理。

硅集成电路技术可以说综合应用了多种不同领域的科学技术成果。能够在晶圆片上通过光学复印手段制备出各种微细图形的光学分步重复光刻机,实际上就是傅里叶光学理论在众多最先进的工程技术领域中的应用之一。等离子体刻蚀技术则包含了当今制造工艺技术中的某些最复杂的化学反应过程。而离子注入技术则是充分利用了高能物理的研究成果。此外,硅晶圆片表面不同的薄膜层所表现出来的复杂的机械力学特性也大大拓展了我们对各种基本材料特性的认识。当然,硅器件本身的尺寸也在不断缩小,以至于各种与量子力学效应有关的分子尺度或原子尺度的现象也变得更加重要。因此集成电路制造领域目前面临的重大挑战之一就是必须在这样一个极为宽广的多学科范围内来充分吸取和利用各种最新的科学技术成果。将这样一些不同学科领域的科学知识有机地整合到一起,过去一直是一项极其富有挑战性的工作,将来也一定仍然如此。在这个领域工作的科学家和工程技术人员需要具有宽泛的知识面,并具有发现、整合和应用不同领域的科学思想的能力。

在过去的 20 年里,人类对于现代集成电路芯片中所使用的硅以及其他几种材料有了更多的认识。通常各种新的理论总是以某个“模型”的方式出现,它可以是描述某个过程的数学方程式,也可以是解释某个特定过程物理机理的原子论图像。采用模型的方法可以使得人们对于物

理过程的认识更加系统、表达更加准确。另外,采用模型的方法也给特定领域的研究人员提供了一种相互交流思想的有效方式,而且模型自身的准确性也可以通过实验来进行检验和评估。

在最近的十年里,对于开发计算机模拟工具以便对芯片制造过程中所使用到的各种工艺技术进行模拟这项工作,研究人员进行了认真的尝试。已经建立起来的这些模拟工具都是围绕着实际工艺过程中所包含的具体工艺模型而开发的。其中有些模拟工具现在就是依据完整坚实的科学理论来对实验结果进行预测的。举例来说,各种光学光刻工艺技术模拟器就是这方面工作的一个很好的实例,它就是建立在傅里叶光学原理的数学描述基础之上的。只要给出明确的掩模板设计结构和特定的曝光系统条件,目前这一类模拟工具已经能够精确地预测出硅晶圆片上所能形成的光刻胶图形。另外一类模拟工具的理论基础则没有这么坚实。举例来说,不同掺杂剂在硅材料中的扩散工艺过程所使用的各种杂质扩散模型在学术界内部就仍然存在争议,因为这些扩散模型在描述扩散过程所包含的各种物理现象方面显然还是十分不完备的。但是尽管如此,上述这些模型目前来说还都是非常具有实用价值的。

本书试图介绍的内容不仅涵盖了与硅芯片加工生产技术相关的实际工艺制造过程,而且包括了这些工艺技术背后所依据的科学原理。在多数情况下,这些科学原理都是以模型的方式来对工艺过程做出描述。在大多数章节中,各种工艺模型都是结合计算机模拟程序来一起进行讨论的,因为这些模拟程序中已经包含了各种工艺模型并应用这些工艺模型来模拟各个单项工艺步骤。在本书中我们将广泛应用各种模拟实例来说明每一项工艺技术的基本原理,并形象地展示出各项工艺技术所具有的主要特点,而这后面一条则是任何其他教学手段都难以做到的。我们已经发现这些模拟工具是做好教学工作的一个强有力的辅助手段。

今天各种模拟工具在半导体产业界已经得到了广泛的应用,以弥补传统的实验研究方法的不足。虽然目前这种模拟研究方法还不太可能完全取代实验研究手段,特别是对于集成电路这样一个快速发展的产业更是如此,但是各种模拟工具的使用至少可以使得开发新一代工艺技术的成本大大节省,同时也大大减少了解决各种工艺制造问题的费用。目前业界普遍认为只要半导体产业这种快速发展的势头持续下去的话,未来各种模拟工具的广泛应用就是必不可少的。

与其他论述硅集成电路工艺技术的教科书相比,本书在总体结构上存在着两个与众不同的明显特点。第一个明显特点就是贯穿整本教材我们充分应用了大量的模拟实例。这些模拟实例所起的作用如下:首先,这些模拟实例有助于更清楚地说明每一章内容中所包含的科学原理,例如利用工艺模拟结果可以清楚地显示氧化层的生长过程、掺杂剂的浓度分布情况或者薄膜淀积的厚度等工艺参数随着时间推进的发展变化;其次,这些模拟实例也非常有助于显示出一些特定物理现象对于某些具体工艺步骤的影响,因为在各种模拟工具中,要增加或删除某个特定的物理模型可以说是一件易如反掌的事情,而且也只有利用这些模拟工具,我们才能真正认识和理解各种不同工艺步骤之间极其复杂的相互作用和影响;最后,对于那些未来准备投身于这个产业的学生来说,他们今后毫无疑问将要用到这些模拟工具,因此充分认识这些模拟工具的功能和局限性对于他们将来的工作也是非常重要的。

本书在总体结构上的第二个与众不同的明显特点就是书中在一开始(第2章)就讨论介绍了一个完整的工艺流程。尽管很多原先对这一领域比较陌生的读者在进一步学习后续章节之前,可能无法真正领会一个复杂的CMOS工艺流程中的许多细节知识,但是我们发现尽早对整个芯片的全部制造过程有一个全面的了解,对于读者正确地建立有关后续章节中将要讨论的各个不同的特定工艺步骤之间的相互联系是非常有好处的。在本书相关内容的教学过程中,我们通常在上第一次或第二次课时,就对整个CMOS工艺流程做一个初步的介绍,然后在上最后一次课

时,再回到同样的内容上,而在后面一次的讲授过程中,许多细节的问题就可以更为充分地加以讨论。

另外,我们还试图在每一章的内容中都包含一个关于未来发展趋势的讨论。要想准确地预测未来的发展趋势显然是一件极其困难的事情,而且包含这部分内容还存在这样的风险,即很容易就会使人觉得本书的内容已经过时。但是即便如此,我们还是发现很多学生都对这个讨论很感兴趣,至少对总体的未来发展趋势很感兴趣,我们也相信对于硅工艺技术还是有可能预测出其大致的发展方向的。半导体产业界所熟知的“国家半导体技术发展路线图”(NTRS)也给预测未来的发展趋势提供了一个指南。

本书所包含的主要内容可在大学四年级本科生或一年级研究生一个学季(大约 12 周左右的教学时间)的教学过程中完成,当然一个学季的教学时间不可能完全覆盖书中每一章的全部内容。如果采用学期制,那么一个学期(大约 16~18 周)的课程教学时间则完全可以覆盖本书的全部教学内容。假如本书用于一个学季的课程教学,一种可供选择的办法就是尽量减少每章中有关“制造方法”和“测试技术”这两节内容的授课时间。凡讲授此课程的教师可以通过电子邮件与出版商或本书作者取得联系,以获得根据书中内容和插图准备的一组授课讲稿。在斯坦福大学开设的一个学季的课程中已经数次使用了这组授课讲稿。

在学完基本的集成电路制造技术课程之后,后续的课程就可以更为充分地应用本书中所讨论过的各种模拟工具了。在学生初次学习基本的集成电路制造工艺的课程时,我们无论是在课后布置的作业中,还是在要求学生完成的实验课程中,都没有涉及到书中介绍的各种模拟工具。在这种入门水平的工艺课程中,我们认为各种模拟实例更适合于用做教学的辅助手段,以便清楚地阐明工艺思路和物理原理。但是在后续的课程中,要获得亲自使用这些模拟工具的实际经验也是十分容易的。我们在本书中用到的大多数计算机模拟工具都是在市场上可以得到的,而且这些模拟工具的供应商通常都非常愿意与大学里的授课老师开展合作,以便将他们开发的各種模拟工具用于教学目的。

最后我们要感谢斯坦福大学众多选修我们这门课程的学生,由于他们多次使用本书各种不同版本的初稿作为教材,大大促进了对书中内容的进一步充实。他们提出的各种意见和建议也使得本书变得更加完善。多年来我们一直与斯坦福大学的一群精力旺盛的同事以及博士研究生们一起共事,本书中所介绍的一些模型和软件工具正是通过他们齐心协力的工作才得以开发出来。在此我们特别要感谢鲍勃·达顿教授和他以前的两位博士研究生马克·劳先生(现在也是佛罗里达大学的教授)以及康纳·拉夫蒂博士(目前供职于朗讯科技公司)。我们还要感谢许多审阅了本书的初稿并对书中不同章节的内容都做了补充修订的人,他们包括惠普公司的保罗·里斯曼、斯坦福大学的吉米·麦克维蒂以及马克·劳教授。我们自己在该领域的研究工作多年来一直得到美国国防部先进研究计划局(DARPA)和美国半导体厂商研究会(SRC)的赞助。在此也向他们对于我们工作的长期支持表示衷心的感谢。最后我们衷心欢迎各位读者通过电子邮件对本书的内容提出批评和建议,电子邮件请发至:plummer@ee.stanford.edu, deal@ee.stanford.edu 或者 griffin@stanford.edu。

目 录

第 1 章 引言及历史展望	1
1.1 引言	1
1.2 集成电路与平面工艺——促成集成电路产生的几项关键发明	6
1.3 半导体的基本特性	11
1.4 半导体器件	27
1.4.1 PN 结二极管	27
1.4.2 MOS 晶体管	29
1.4.3 双极型晶体管	32
1.5 半导体工艺技术的发展历程	33
1.6 现代科学发现——实验、理论与计算机模拟	35
1.7 本书的内容安排	36
1.8 本章要点小结	38
1.9 参考文献	38
1.10 习题	38
第 2 章 现代 CMOS 工艺技术	40
2.1 引言	40
2.2 CMOS 工艺流程	40
2.2.1 CMOS 工艺流程	41
2.2.2 有源区的形成	43
2.2.3 用于器件隔离的可选工艺方案——浅槽隔离	47
2.2.4 N 阱和 P 阱的形成	49
2.2.5 用于制备有源区和阱区的可选工艺方案	52
2.2.6 栅电极的制备	59
2.2.7 前端或延伸区(LDD)的形成	63
2.2.8 源漏区的形成	67
2.2.9 接触与局部互连的形成	69
2.2.10 多层金属互连的形成	71
2.3 本章要点小结	75
2.4 习题	76
第 3 章 晶体生长、晶圆片制造与硅晶圆片的基本特性	78
3.1 引言	78
3.2 历史发展和基本概念	78
3.2.1 单晶结构	78
3.2.2 晶体中的缺陷	81
3.2.3 原料与提纯	84

3.2.4	直拉和区熔单晶的生长方法	85
3.2.5	圆片的准备和规格	87
3.3	制造方法和设备	89
3.4	测量方法	91
3.4.1	电学测试	91
3.4.2	物理测量	95
3.5	模型和模拟	98
3.5.1	直拉法单晶生长	98
3.5.2	CZ 单晶生长期间的掺杂	100
3.5.3	区域精炼与区熔(FZ)生长	103
3.5.4	点缺陷	105
3.5.5	硅中的氧	110
3.5.6	硅中碳	113
3.5.7	模拟	113
3.6	技术和模型的限制及未来趋势	114
3.7	本章要点小结	115
3.8	参考文献	116
3.9	习题	117
第 4 章	半导体制造——洁净室、晶圆片清洗与吸杂处理	118
4.1	引言	118
4.2	历史的发展与几个基本概念	120
4.2.1	第一个层次的污染降低:超净化工厂	123
4.2.2	第二个层次的污染降低:晶圆片清洗	125
4.2.3	第三个层次的污染降低:吸杂处理	127
4.3	制造方法与设备	130
4.3.1	第一个层次的污染降低:超净化工厂	131
4.3.2	第二个层次的污染降低:晶圆片清洗	131
4.3.3	第三个层次的污染降低:吸杂处理	132
4.4	测量方法	135
4.4.1	第一个层次的污染降低:超净化工厂	135
4.4.2	第二个层次的污染降低:晶圆片清洗	138
4.4.3	第二个层次的污染降低:吸杂处理	141
4.5	模型与模拟(模型化方法与模拟技术)	144
4.5.1	第一个层次的污染降低:超净化工厂	145
4.5.2	第二个层次的污染降低:晶圆片清洗	148
4.5.3	第三个层次的污染降低:吸杂处理	150
4.6	工艺技术与模型方面的限制因素及未来的发展趋势	156
4.7	本章要点小结	158
4.8	参考文献	159
4.9	习题	161

第 5 章 光刻	162
5.1 引言	162
5.2 发展历史和基本概念	163
5.2.1 光源	165
5.2.2 硅片曝光系统	167
5.2.3 光刻胶	176
5.2.4 掩膜版工程——光学邻近效应纠正和相移掩膜	184
5.3 工艺方法和设备	186
5.3.1 硅片曝光系统	186
5.3.2 光刻胶	188
5.4 测量方法	191
5.4.1 光刻版特征和缺陷测量	192
5.4.2 光刻胶图形测量	193
5.4.3 蚀刻特征的测量	194
5.5 模型与模拟	195
5.5.1 硅片曝光系统	195
5.5.2 光刻胶中的光强图形	201
5.5.3 光刻胶曝光	204
5.5.4 曝光后烘烤(PEB).....	207
5.5.5 光刻胶显影	209
5.5.6 光刻胶后烘	211
5.5.7 先进掩膜版工程	213
5.6 技术及建模中的限制和未来趋势	213
5.6.1 电子束光刻	214
5.6.2 X 射线光刻	215
5.6.3 先进掩膜版工程	217
5.6.4 新光刻胶	218
5.7 本章要点小结	219
5.8 参考文献	220
5.9 习题	222
第 6 章 热氧化和 Si-SiO₂ 界面	224
6.1 引言	224
6.2 历史性发展和基本概念	226
6.3 制造方法和设备	231
6.4 测量方法	232
6.4.1 物理测量	233
6.4.2 光学测量	233
6.4.3 电学测量——MOS 电容器	234
6.5 模型和模拟	242
6.5.1 第一级平面生长动力学——线性抛物线模型	242
6.5.2 平面氧化动力学的其他模型	249

6.5.3	薄二氧化硅(SiO_2)生长动力学	252
6.5.4	生长动力学与压强依赖关系	253
6.5.5	生长动力学与晶向的依赖关系	255
6.5.6	混合气氛生长动力学	256
6.5.7	二维 SiO_2 生长动力学	257
6.5.8	用于氧化的先进点缺陷基本模型	261
6.5.9	衬底掺杂效应	264
6.5.10	多晶硅氧化	266
6.5.11	Si_3N_4 生长和氧化动力学	267
6.5.12	硅化物氧化	270
6.5.13	Si/SiO_2 界面电荷	271
6.5.14	完整的氧化模块模拟	275
6.6	工艺技术和模型的限制及未来趋向	277
6.7	本章要点小结	277
6.8	参考文献	278
6.9	习题	280
第7章	扩散	285
7.1	引言	285
7.2	发展历史和基本概念	287
7.2.1	杂质固溶度	288
7.2.2	从宏观的角度看扩散	289
7.2.3	扩散方程的分析解	291
7.2.4	无限介质中的高斯解	291
7.2.5	表面附近的高斯解	292
7.2.6	无限介质中的误差函数解	293
7.2.7	表面附近的误差函数解	294
7.2.8	硅中杂质的本征扩散系数	296
7.2.9	连续多步扩散的影响	297
7.2.10	设计和估算扩散层	298
7.2.11	基本扩散概念小结	300
7.3	制造方法和设备	300
7.4	测量方法	303
7.4.1	次级离子质谱法(SIMS)	303
7.4.2	扩展电阻	304
7.4.3	薄层电阻	305
7.4.4	电容电压法	305
7.4.5	TEM 截面法	305
7.4.6	使用扫描探针显微技术的二维电测量	306
7.4.7	反向电测法	307
7.5	模型和模拟	308

7.5.1	扩散方程的数值解	308
7.5.2	Fick's 定律关于电场效应的修正	310
7.5.3	Fick's 定律关于浓度有关的扩散的修正	312
7.5.4	分凝	315
7.5.5	界面的杂质堆积	317
7.5.6	微观扩散进程摘要	318
7.5.7	原子级上扩散的物理基础	318
7.5.8	氧化增强或减速扩散	319
7.5.9	填隙替代式杂质扩散	321
7.5.10	自扩散和掺杂扩散的激活能	324
7.5.11	杂质 - 缺陷相互作用	324
7.5.12	杂质 - 缺陷相互作用的化学平衡公式	328
7.5.13	模型的简化表达式	330
7.5.14	电荷态效应	332
7.6	工艺和模型中的限制及未来趋势	333
7.6.1	掺杂方法	334
7.6.2	高级杂质分布建模——杂质 - 缺陷相互作用的全动力学描述	334
7.7	本章要点小结	335
7.8	参考文献	336
7.9	习题	338
第 8 章	离子注入	341
8.1	引言	341
8.2	历史发展和基本概念	341
8.2.1	实际硅中的注入——晶体结构的作用	348
8.3	制造方法和设备	351
8.3.1	高能注入	353
8.3.2	超低能量注入	354
8.3.3	离子束加热	355
8.4	测量方法	355
8.5	模型和模拟	355
8.5.1	核阻滞	356
8.5.2	非局部电子阻滞	357
8.5.3	局部电子阻滞	358
8.5.4	总的阻滞能力	358
8.5.5	损伤的产生	359
8.5.6	损伤退火	361
8.5.7	固相外延	364
8.5.8	杂质的激活	364
8.5.9	瞬态增强扩散	367
8.5.10	TED 的原子级解释	368
8.5.11	对器件的影响	376

8.6	工艺和模拟的限制与未来趋势	376
8.7	本章要点小结	377
8.8	参考文献	377
8.9	习题	379
第9章	薄膜淀积	383
9.1	引言	383
9.2	历史的发展和基本概念	385
9.2.1	化学气相淀积(CVD)	385
9.2.2	物理蒸气淀积(PVD)	398
9.3	制造方法	415
9.3.1	外延硅淀积	416
9.3.2	多晶硅淀积	417
9.3.3	氮化硅淀积	420
9.3.4	二氧化硅淀积	420
9.3.5	Al 淀积	422
9.3.6	Ti-W 淀积	422
9.3.7	W 淀积	423
9.3.8	TiSi ₂ 和 WSi ₂ 淀积	423
9.3.9	TiN 淀积	424
9.3.10	Cu 淀积	425
9.4	测量方法	426
9.5	模型和模拟	426
9.5.1	用于淀积模拟的模型	427
9.5.2	应用物理为基础的模拟器——SPEEDIE 模拟淀积	439
9.5.3	其他淀积模拟	444
9.6	溅射和模型的限制及将来的发展趋势	446
9.7	本章要点小结	448
9.8	参考文献	448
9.9	习题	450
第10章	刻蚀	453
10.1	引言	453
10.2	发展过程与基本概念	455
10.2.1	湿法腐蚀	455
10.2.2	等离子体刻蚀	459
10.3	制造方法	474
10.3.1	等离子体刻蚀条件与问题	474
10.3.2	不同薄膜的等离子体刻蚀技术	478
10.4	测量方法	484
10.5	模型与模拟	485
10.5.1	刻蚀模型	485

10.5.2	刻蚀模型——线性刻蚀模型	488
10.5.3	刻蚀模型——离子增强刻蚀的饱和吸附模型	492
10.5.4	刻蚀模型——更高级模型	497
10.5.5	其他刻蚀模拟过程	498
10.6	技术与模型的限制和未来趋势	501
10.7	本章要点小结	502
10.8	参考文献	503
10.9	习题	505
第 11 章	后端工艺	507
11.1	引言	507
11.2	历史发展和基本概念	511
11.2.1	接触孔	512
11.2.2	互连线和通孔	518
11.2.3	绝缘材料	526
11.3	制造方法和设备	533
11.3.1	硅化的栅极和源/漏区	533
11.3.2	第一层绝缘材料的制作	534
11.3.3	形成接触	535
11.3.4	全局互连线	537
11.3.5	IMD 淀积和平坦化	538
11.3.6	通道的形成	539
11.3.7	结束步骤	540
11.4	测量方法	540
11.4.1	形态测量	541
11.4.2	电学测量	541
11.4.3	化学和结构测量	545
11.4.4	机械测量	546
11.5	建模和仿真	549
11.5.1	硅化物形成	549
11.5.2	化学 - 机械抛光	554
11.5.3	回流	556
11.5.4	晶粒生长	561
11.5.5	多晶材料中的扩散	567
11.5.6	电迁移	570
11.6	工艺及模拟的限制和发展趋势	578
11.7	本章要点小结	581
11.8	参考文献	582
11.9	习题	585
附录	587
术语表	602