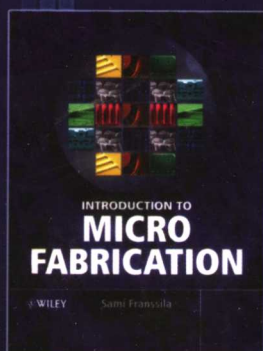


国外电子与通信教材系列



微加工导论

Introduction to Microfabrication



[芬兰] Sami Franssila 著

陈迪 刘景全 朱军 程秀兰 等译
程秀兰 陈迪 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

微加工导论

Introduction to Microfabrication

[芬兰] Sami Franssila 著

陈迪 刘景全 朱军 程秀兰 等译

程秀兰 陈迪 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

21世纪将是微电子技术及其相关产业持续发展的新世纪,本书从微加工角度出发,介绍了微加工的材料、基本工艺、结构、工艺集成、设备和制造等各个方面。其中材料部分包括了硅、薄膜材料及其制备工艺和结构,基本工艺部分包括了薄膜制备、外延、光刻、刻蚀、热氧化、扩散、离子注入、化学机械抛光(CMOS)、键合、浇铸和冲压等;结构部分包括了自对准结构、等离子体刻蚀结构、湿法刻蚀的硅结构、牺牲层结构和沉积的结构;工艺集成部分包括了互补金属氧化物半导体(CMOS)晶体管制造、双极技术、多层金属化和微机电系统(MEMS)等;设备部分包括了热工艺、真空和等离子体、化学气相沉积和外延等设备;本书还介绍了微加工技术涉及的净化室、成品率、晶圆厂、摩尔定律等。本书既介绍了微电子制造工艺技术,也涉及了微机电系统(MEMS)、微流体、微光学和纳米技术等领域。

本书将是学习微结构和微加工技术的电子工程、化学、机械、物理和材料科学等领域的一本优秀教材,可应用于微电子、微机电系统(MEMS)、光电子或相关新兴领域。

Sami Franssila: **Introduction to Microfabrication.**

ISBN 0-470-85106-6

Copyright © 2004, John Wiley & Sons, Inc. All Rights Reserved.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Simplified Chinese translation edition Copyright © 2006 by Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体字翻译版由Wiley Publishing, Inc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。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2005-1637

图书在版编目(CIP)数据

微加工导论/(芬兰)弗兰西拉(Franssila, S.)著;陈迪等译.-北京:电子工业出版社, 2006.1

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Introduction to Microfabrication

ISBN 7-121-01981-7

I. 微... II. ①弗... ②陈... III. 特种加工 IV. TG66

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第137839号

责任编辑:李秦华

印 刷:北京天竺颖华印刷厂

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:29 字数:742千字

印 次:2006年1月第1次印刷

定 价:65.00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zltz@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。

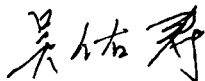
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老教师和专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,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
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

21 世纪将是微电子技术及其相关产业持续发展的新世纪,本书从微加工角度出发,介绍了微加工的材料、基本工艺、结构、工艺集成、设备和制造等各个方面。其中材料部分包括了硅、薄膜材料及其制备工艺和结构;基本工艺部分包括了薄膜制备、外延、光刻、刻蚀、热氧化、扩散、离子注入、化学机械抛光、键合、浇铸和冲压等;结构部分包括了自对准结构、等离子体刻蚀结构、湿法刻蚀的硅结构、牺牲层结构和沉积的结构,工艺集成部分包括了互补金属氧化物半导体晶体管制造、双极技术、多层金属化和微机电系统等;设备部分包括了热工艺、真空和等离子体、化学气相沉积和外延等设备;本书还介绍了微加工技术涉及的净化室、成品率、晶圆厂、摩尔定律等。本书既介绍了微电子制造工艺技术,也涉及了微机电系统(MEMS)、微流体、微光学和纳米技术等领域。

本书将是想学习关于微结构和微加工技术的电子工程、化学、机械、物理和材料科学等领域的一本优秀教材,可应用于微电子、微机电系统或相关新兴领域。

Sami Franssila 博士 1995 年获芬兰赫尔辛基工业大学电子工程学院博士学位,1986 年至 1998 年在 VTT Microelectronics 工作,其中 1993 年至 1994 年在比利时 IMEC 工作,1998 年起,他在赫尔辛基工业大学微电子中心工作。他的主要研究领域是 CMOS 和 BiCMOS 集成电路工艺(IC),聚合物晶体管,绝缘体上的硅-微机电系统(SOI-MEMS)和微流体器件,发表期刊论文 30 余篇,会议论文 50 余篇。Sami Franssila 博士多年从事微加工技术的研究工作,在微加工领域具有深厚的理论基础和扎实的实践经验。

本书由上海交通大学陈迪教授组织翻译,其中,序言和第 1 章至第 3 章由陈迪翻译,第 4 章至第 5 章由张晔翻译,第 6 章至第 7 章由靖向萌翻译,第 8 章至第 18 章由刘景全翻译,第 19 章至第 29 章和索引由程秀兰翻译,第 30 章至第 39 章和附录由朱军翻译,全书由程秀兰和陈迪审校。很多研究生参与了翻译工作,他们是杨斌、方华斌、孙洪文、顾盼、周广华和段炼等。

由于时间仓促,本书翻译中存在一些错误在所难免,欢迎读者批评指正。

序 言

微加工是非常普遍的:它的应用包含了集成电路(IC)、微机电系统(MEMS)、微流体、微光学、纳米技术和无数其他领域。微加工以不同的方式与所有的这些应用均有关系:电镀对于亚微米集成电路金属布线和 LIGA 微结构而言,均属最基本的工艺;深反应离子刻蚀(deep-RIE)在沟道 DRAM 和微机电系统(MEMS)中是关键技术;压印光刻应用于典型尺寸为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的微流体和特征尺寸小至 10 nm 的纳米技术。本书的独特之处在于,它只论述微加工,与应用无关,所以它可以用于电子工程、材料科学、物理和化学。

本书的重点不在于对器件的分析,而是集中于晶圆片上的微结构:如线条和沟槽、隔膜和悬臂梁、空穴和喷嘴、扩散和外延层等。线条有时是孤立的,有时是密集阵列,与线宽无关;隔膜可以通过刻蚀时间或通过刻蚀自动停止的方法来制备;源/漏扩散可以与栅通过光刻机或自对准方式来进行对准;氧化对于平坦的表面是容易的;但在图形上进行氧化是棘手的。从微结构的角度来分析微加工,是一种保持技术不落后的解决方案: $100\text{ }\mu\text{m}$ 的流体管道和 100 nm 的 CMOS 栅均需考虑对准;刻蚀底切的目标值可以是 10 nm 或 $10\text{ }\mu\text{m}$;掺杂物将在高温退火时扩散,但结深可控制在数十纳米或数十微米的范围内。

过去,教材的共同特征是较专注于物理和化学方面:如等离子体电势、边界层、扩散机理、瑞利分辨率、热力学稳定性等。这的确是在快速发展的技术中对抗落伍的保证,但微结构是一门工程学科,不是物理学和化学。CMOS 的缩小趋势事实上比过去 40 年基本物理和化学更让人信服:光学光刻被预测不能刻蚀亚微米线条,今天栅氧化层的厚度比 20 世纪 70 年代想像的极限还要薄。从教育学的角度来看,展示化学气相沉积(CVD)薄膜的应用比先介绍压力与沉积速率相关性更好,讨论金属薄膜功能性比先着手分析溅射产率模型更好。

在本书中,另一个讨论的重点是材料。材料是通用的,并且不会很快过时。现在一直在引进新材料,如对于低电介质材料、高电介质材料、 SnO_2 传感器薄膜、金刚石外壳和 $100\text{ }\mu\text{m}$ 厚光刻胶等,需考虑其材料的一些基本特性,如电阻率、介电常数、热膨胀系数、弹性模量等。硅、氧化硅、氮化硅、铝、钨、铜和光刻胶在不同的应用中相遇:氮化物不仅应用在 LOCOS 隔离,也应用在 MEMS 热隔离;铝不仅作为集成电路的导体,它也是 MOEMS 的镜子;铜用于集成电路金属布线,也作为在 MEMS 中镍底部的牺牲层;光刻胶作为光敏材料,它也可用做晶圆片键合时的黏合剂。

当然,本书也会对器件进行讨论;但从加工角度,不完全从器件物理角度来讨论。统一的想法是讨论加工工艺的通用性和普遍性。电阻和电容可作为对准顺序、设计规则或界面稳定性的例子。在介绍基本工艺和相关概念后,工艺集成的例子在很宽范围内展示了全部工艺流程:例如太阳能电池,压阻式压力传感器,CMOS,AFM 悬臂梁探针,微流体平面外针和超自对准双极型晶体管等。小型工艺顺序的例子包括不同的结构:替换栅、沟槽密封、自对准转子和双大马士革(Damascene)低电介质材料的选择等。

旧的教材将微加工描述为 MEMS 的工具箱或 CMOS 制造技术,这两种方法均导致对微加工领域的教材不能令人满意。十年前,化学机械抛光(CMP)在教材中的介绍不够详细;五年前化学机械抛光包含在多层金属布线的章节中;今天,化学机械抛光是一种通用的技术,它在

CMOS 前道器件绝缘和表面微机械中均得到了广泛应用,它也可用于制造光子晶体和超导器件,所以它应作为独立的一章(与目前的和潜在的应用无关)。同样地,晶圆片清洗用于氧化准备步骤,但它也用于外延、晶圆片键合和化学机械抛光(CMP)。从器件角度来看问题,人们会仅限于理解工艺技术与材料在 CMOS 和相关器件中的应用,而对其在其他的应用领域中的重要应用并不了解。

本书的目的是使学生在工厂和实验室中均能感到自如,这必须包含研究为导向和制造驱动两方面的内容。为了使本书内容易于操作,省略了很多东西:如高密度等离子体仅被提及,但重点限于等离子体工艺;描述了 KOH 和 TMAH 刻蚀,但讨论了二者间的共性,而很少分析二者间的差异;讨论了压印光刻和热压,但忽略了聚合物流变学;提及了不同光学光刻方法,但对其仅进行了极简短的讨论。所以,本书的重点是通用的和概念的,而不是最新的技术,这样希望能延伸本书的使用寿命。

本书的组织结构

本书的组织结构与传统教材的组织结构在很多地方有所区别。开始时,讨论单个工艺步骤;接下来的章节描述完整的工艺,实际应用的介绍将贯穿始终。为了将基本概念和当前的实际情况分离开来,我们将设备章节与工艺章节分开来讲。

第 1 章包含了材料、工艺、器件和产业;接着介绍测试,微加工所需的很多的测试例子在每个章节中均有介绍。然后,介绍一个普通的模拟问题,更多特定的模拟例子在后续章节中得到讲解。

接下来介绍微加工的材料:硅和薄膜。硅晶体生长的描述很简短,且很初步;主要讨论晶圆片和晶圆片上的结构:硅切片工艺和所获得硅片性能是该章的重点。而后一章,讨论了外延,CVD,PVD,旋转涂覆和电镀,以获得材料性能和微结构,而不是依赖于设备本身。紧接着介绍的是光刻和刻蚀,这种介绍的顺序可讨论更多的实际例子。

下一个主题将要讨论硅技术中的基本步骤,如氧化、扩散和离子注入,接着介绍 CMP 和键合、模压和冲压技术。与旧的教材和以 CMOS 器件作为重点的教材相比,本书在后道工序的内容被强化了,包括薄膜、刻蚀、平整化和新材料。这反映了集成电路中的多层金属布线正日益变得与普通的刻蚀和沉积工艺一样重要。封装不包含晶圆级微加工,也不包含立体光刻和很多小型的传统技术,如微电火花放电加工等。

微加工是一门工科学科,必须讨论微器件的批量制造。对工艺设备的讨论经常陷于不同的设计:学生们是否知道 13.56 MHz 二极管刻蚀机,三极管刻蚀机,微波,ECR,ICP 和 helicon 等离子体,APCVD,LPCVD,SA-CVD,UHV-CVD 和 PECVD 反应器是否需要介绍?在本书中,工艺设备的讨论受晶圆片结构的约束,优于设备本身:这里讨论了真空与薄膜纯度的相互影响;考虑了 RTP 温度非均匀性对晶圆片应力的作用;分析了在不同的 CVD 反应器中,表面反应与质量传输控制生长的关系。本书也研究了净化室技术、晶圆片代工厂的运转、成品率和成本等内容。使学生认识了摩尔定律,以及现在和将来的微加工工艺、材料和应用趋势。

在很多情况下,我们将相关内容分为两个章节进行处理:如第 5 章论述薄膜基础,第 7 章论述更先进的主题;光刻和刻蚀也类似地分开介绍,这可以将本书设计成较短或较长的课程。教师可以通过互联网获得本书的附图,请通过 Wiley 出版社(www.wileyeurope.com/go/microfabrication)注册。

对学生的建议

本书是导论性的教材,只需要大学物理和化学的知识,且具有材料科学和电子学课程背景,将使学生更易于理解书中的内容,但这不是必需的。本书包含了 250 道习题,微加工作为独立的学科,习题内容多与加工工艺和微结构有关,而与器件无关。习题主要分为三种类型:工艺设计与分析、模拟和理论计算。用模拟器求解的习题用“S”标记,要使用一个简单的一维模拟器。普通的习题是为了使学生对微观世界的尺寸有一定的感觉:线宽、电阻、薄膜厚度、沉积速率、应力等,只要知道一个工艺可以在某秒、某分或某小时内完成即可;或了解电阻是 $m\Omega$, Ω 或 $K\Omega$ 。读者必须学习提出简单的假设,并且能与不确定的数据打交道。在互联网上寻找答案不能替代简单的几分钟的计算,因为与互联网获得的答案相比,简单的估计经常是准确的(或不准确的)。在习题中,一些常数并没有给出:如一个小组测试获得硅的熔解温度是 1408°C ,另一个小组为 1410°C ,有 7 个小组为 1412°C ,8 个小组为 1413°C ,3 个小组为 1416°C ,如果查阅以前的工作,其值从 1396°C 至 1444°C 不等。薄膜材料的性能与沉积工艺相关,不同的工作者测试获得的值有所不同,如电阻率或热导率。区别较大的值突然出现,如果存在相变时,如金属薄膜从体心(body-centered)立方变为 β 相时,材料性能会有较大的变化:电阻率的温度系数可以相差 10 倍。聚合物材料在其性能和工艺方面也显示出很大的差异。也有从微加工的经济角度进行的计算:晶圆片成本、芯片尺寸和成品率等。存储器的一个比特不值多少钱,但大量生产该芯片的加工厂(fab, fabrication facility)是非常昂贵的。

附录 A 给出了部分习题的注释和提示,在附录 B 中可以找到有用的物理常数,硅材料性能和单位换算系数。

致谢

写一本书很费时间,很多人在撰写本书中贡献了他们的时间和努力。Jyrki Kaitila, Andreas Englmüller, Olli Anttila, Risto Mutikainen, Joni Mellin, Ari Lehto 和 Tarja Rahikainen 阅读了本书的初稿,并且为本书提供了基本内容。非常感谢他们对本书细节和结构两方面的贡献。

一个更大的小组在本书中提供了数据、图表和照片;他们帮我找到有用的原始资料,指出缺陷和审阅我的原文。感谢 Bo Bångtsson, Martin Kulawski, Klas Hjort, Arturo Ayon, Pekka Seppälä, Robert Eichinger-Heue, Marin Alexe, Markku Tilli, Juha Rantala, Jyrki Kiihamäki, Weileun Fang, Mikko Ritala, Martti Blomberg, Jaakko Saarilahti, Hannu Kattelus, Mikko Kiviranta, Veli-Matti Airaksinen, Paula Heikkilä, Harri Pohjonen, Jouni Ahopelto, Antti Lipsanen, Jari Likonen, Eero Haimi, Ulrika Gyllenberg, Kostas Grigoras 和 Victor Ovtchinnikov. Charlotta Tuovinen 提供了大量计算机方面的帮助。

我的学生和教学助手 Tuuli Juvonen, Antti Niskanen, Santeri Tuomikoski, Esa Tuovinen 和 Seppo Marttila 阅读了原稿和习题,他们在本书的撰写上花费了大量的时间和精力。

特别感谢 Pekka Kuivalainen 和 Ari Sihvola 在教学和撰写本书方面的鼓励。

感谢 Wiley 出版社的 Peter Mitchell, Kathryn Sharples, Céline Durand 和 Susan Barclay,是他们通过面对面的会议和无数的电子邮件使得本书能够完成。

遗漏和事实上的错误在所难免。

Sami Franssila

赫尔辛基, 2004 年 2 月 29 日

目 录

第一部分 绪 论

第 1 章 概述	2
1.1 微加工学科分类	2
1.2 基片	3
1.3 材料	3
1.4 表面和界面	4
1.5 工艺	4
1.6 横向尺度	6
1.7 垂直尺寸	7
1.8 器件	7
1.9 金属氧化物半导体晶体管	11
1.10 净化和成品率	11
1.11 产业	13
1.12 习题	14
参考文献与相关阅读材料	15
第 2 章 微测量和材料表征	16
2.1 显微法和可视化	16
2.2 横向和垂直尺寸	17
2.3 电学测试	18
2.4 物理和化学分析	20
2.5 X 射线衍射	21
2.6 全反射 X 射线荧光	21
2.7 二次离子质谱	21
2.8 俄歇电子波谱法	22
2.9 X 射线光电子波谱法	22
2.10 卢瑟福背散射能谱法	23
2.11 电子微探针分析/能量分散 X 射线分析	23
2.12 其他方法	24
2.13 分析面积和深度	25
2.14 微测试实用要点	26
2.15 习题	27
参考文献与相关阅读材料	28

第 3 章 微加工工艺模拟	29
3.1 模拟类型	29
3.2 一维模拟	30
3.3 二维模拟	31
3.4 三维模拟	32
3.5 习题	34
参考文献与相关阅读材料	34

第二部分 材 料

第 4 章 硅	36
4.1 硅材料性能	36
4.2 硅的晶体生长	38
4.3 硅的晶体结构	41
4.4 硅切片工艺	43
4.5 硅晶体中的缺陷和非理想状态	45
4.6 习题	47
第 5 章 薄膜材料和工艺	49
5.1 薄膜与块状材料	49
5.2 物理气相沉积	51
5.3 蒸发和分子束外延生长	52
5.4 溅射	53
5.5 化学气相沉积	54
5.6 其他沉积方法	57
5.7 金属薄膜	60
5.8 介电薄膜	62
5.9 介电薄膜的性能	63
5.10 多晶硅	68
5.11 硅化物	69
5.12 习题	69
参考文献与相关阅读材料	70
第 6 章 外延	71
6.1 异质外延	72
6.2 硅的 CVD 同质外延	73
6.3 外延的模拟	76
6.4 外延的先进应用	77
6.5 习题	77
参考文献和相关阅读材料	78

第 7 章 薄膜生长和结构	79
7.1 薄膜工艺的一般特征	79
7.2 PVD 膜的生成和结构	80
7.3 CVD 膜的生成和结构	83
7.4 表面和界面	85
7.5 黏附层和阻挡层	87
7.6 多层膜	89
7.7 应力	90
7.8 薄膜上方形貌:台阶覆盖	93
7.9 薄膜沉积的模拟	95
7.10 习题	97
参考文献与相关阅读材料	98

第三部分 基 本 工 艺

第 8 章 图形发生器	100
8.1 粒子束刻蚀法	100
8.2 电子束的物理特性	101
8.3 掩模版的制造	102
8.4 将掩模版作为工具	103
8.5 掩模版检查、缺陷和修复	104
8.6 习题	105
参考文献与相关阅读材料	106
第 9 章 光刻	107
9.1 光刻设备(对准和曝光)	107
9.2 分辨率	110
9.3 基本图形形状	111
9.4 对准和套准	112
9.5 习题	113
参考文献与相关阅读材料	113
第 10 章 光刻图形化	114
10.1 光刻胶的应用	114
10.2 光刻胶化学	116
10.3 光刻胶薄膜光学	118
10.4 光学光刻延伸技术	120
10.5 光学光刻模拟	122
10.6 光刻的实践	124
10.7 光刻胶去胶或灰化	125
10.8 习题	126

参考文献与相关阅读材料	126
第 11 章 刻蚀	127
11.1 湿法刻蚀	128
11.2 电化学刻蚀	132
11.3 各向异性湿法刻蚀	134
11.4 等离子体刻蚀	134
11.5 刻蚀工艺表征	138
11.6 常用材料的刻蚀工艺	138
11.7 刻蚀时间和边墙	140
11.8 湿法刻蚀、各向异性湿法刻蚀以及等离子体刻蚀的比较	140
11.9 习题	141
参考文献与相关阅读材料	142
第 12 章 晶圆片清洗和表面预处理	143
12.1 杂质的形式	143
12.2 湿法清洗	145
12.3 颗粒污染	146
12.4 有机杂质	148
12.5 金属杂质	150
12.6 冲洗和烘干	152
12.7 物理清洗法	152
12.8 习题	152
参考文献与相关阅读材料	153
第 13 章 热氧化	154
13.1 氧化过程	154
13.2 迪尔-格罗夫(Deal-Grove)氧化模型	155
13.3 氧化物的结构	157
13.4 氧化过程的模拟	158
13.5 硅的局部氧化	160
13.6 氧化时应力和图形的影响	160
13.7 习题	163
参考文献与相关阅读材料	163
第 14 章 扩散	164
14.1 扩散机理	166
14.2 扩散时的掺杂剖面形貌	167
14.3 扩散模拟	168
14.4 扩散应用	170
14.5 习题	171
参考文献与相关阅读材料	171

第 15 章 离子注入	172
15.1 注入工艺	172
15.2 注入损伤和损伤退火	174
15.3 离子注入模拟	175
15.4 离子注入的工具	176
15.5 SIMOX:通过离子注入来制造绝缘体上的硅	178
15.6 习题	179
参考文献与相关阅读材料	179
第 16 章 化学机械抛光	180
16.1 CMP 工艺和设备	181
16.2 CMP 的力学	183
16.3 CMP 的化学	184
16.4 CMP 的应用	185
16.5 CMP 控制测量	187
16.6 CMP 中的非理想情况	188
16.7 习题	189
参考文献与相关阅读材料	189
第 17 章 键合和图层转移	190
17.1 硅熔融键合	192
17.2 阳极键合	194
17.3 其他键合技术	195
17.4 键合力学	196
17.5 结构化晶圆片的键合	197
17.6 SOI 晶圆片工厂中的键合	198
17.7 图层转移	199
17.8 习题	200
参考文献与相关阅读材料	200
第 18 章 浇铸和压印	201
18.1 铸造	202
18.2 二维表面压印	205
18.3 三维体压印	206
18.4 与光刻的比较	207
18.5 习题	208
参考文献与相关阅读材料	208

第四部分 结 构

第 19 章 自对准结构	210
19.1 MOS 栅模块	210

19.2	自对准双阱	211
19.3	边墙与自对准硅化物	212
19.4	自对准结	215
19.5	习题	215
	参考文献与相关阅读材料	216
第 20 章	等离子体刻蚀结构	217
20.1	多步刻蚀	217
20.2	多层刻蚀	218
20.3	刻蚀中的光刻胶效应	220
20.4	无掩膜的刻蚀	220
20.5	图形尺寸和图形密度效应	222
20.6	刻蚀残留和损伤	223
20.7	习题	223
	参考文献与相关阅读材料	224
第 21 章	湿法刻蚀的硅结构	225
21.1	< 100 > 硅基片的基本结构	225
21.2	刻蚀剂	225
21.3	刻蚀掩膜和保护层	227
21.4	刻蚀速率与刻蚀自动终止	227
21.5	隔膜的制备	229
21.6	在 < 100 > 硅片上的刻蚀形成具有复杂形状的结构	230
21.7	硅片正面的体微加工	233
21.8	边角补偿	234
21.9	< 110 > 硅片的刻蚀	234
21.10	< 111 > 硅片的刻蚀	236
21.11	< 100 > 硅、< 110 > 硅与 < 111 > 硅湿法刻蚀的比较	238
21.12	习题	238
	参考文献与相关阅读材料	239
第 22 章	牺牲层与释放型结构	240
22.1	结构层与牺牲层	240
22.2	单结构层	241
22.3	黏滞	242
22.4	双结构层工艺	244
22.5	旋转结构	246
22.6	绞链结构	247
22.7	使用多孔硅的牺牲层结构	247
22.8	习题	248
	参考文献与相关阅读材料	249

第 23 章 沉积结构	250
23.1 电镀结构	250
23.2 剥离金属化	252
23.3 特殊沉积的应用	253
23.4 局部沉积	254
23.5 腔穴的密封	256
23.6 习题	258
参考文献与相关阅读材料	258

第五部分 集成

第 24 章 工艺集成	260
24.1 太阳能电池的工艺集成	261
24.2 晶圆片的选择	262
24.3 图形	266
24.4 设计规则	268
24.5 污染预算	274
24.6 热工艺	275
24.7 热预算	276
24.8 金属化	277
24.9 可靠性	278
24.10 习题	281
参考文献与相关阅读材料	282
第 25 章 CMOS 晶体管制造	283
25.1 5 μm 多晶硅栅 CMOS 工艺	284
25.2 MOS 晶体管的按比例缩小	287
25.3 先进 CMOS 的问题	290
25.4 栅模块	292
25.5 与硅的接触	296
25.6 习题	297
参考文献与相关阅读材料	298
第 26 章 双极工艺技术	299
26.1 SBC 双极型晶体管的加工工艺	300
26.2 先进双极结构	302
26.3 BiCMOS 工艺技术	305
26.4 习题	306
参考文献与相关阅读材料	307
第 27 章 多层金属布线	308
27.1 双层金属布线	308