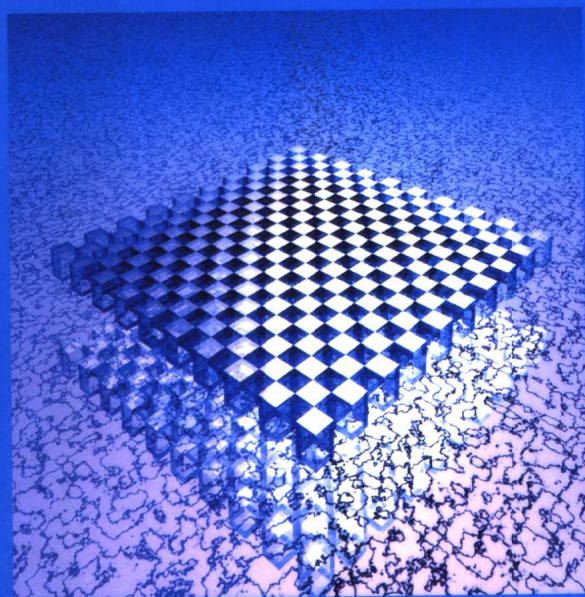


微系统技术

[德] W. Menz J. Mohr O. Paul

王春海 于 杰 等译

付建军 等审



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

微 系 统 技 术

[德] W. Menz J. Mohr O. Paul

王春海 于 杰 等译

付建军 等审

化 学 工 业 出 版 社

材 料 科 学 与 工 程 出 版 中 心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

微系统技术 / [德] W. Menz, J. Mohr, O. Paul, 王
春海, 于杰等译. —北京: 化学工业出版社, 2003. 7
书名原文: Microsystem Technology
ISBN 7-5025-4692-8

I. 微… II. ①W. …②J. …③O. …④王…⑤于…
III. 微电子技术 IV. TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 061528 号

Microsystem Technology/by W. Menz, J. Mohr, O. Paul
ISBN 3-527-29634-4

Copyright©2001 by WILEY-VCH All Rights Reserved.

本书中文简体翻译版由 WILEY 出版公司授权化学工业出版社独家出版发行。
未经出版者许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。
北京市版权局著作权合同登记号: 01-2003-2855

微系统技术

Microsystem Technology

[德] W. Menz J. Mohr O. Paul

王春海 于杰 等译

付建军 等审

责任编辑: 邢涛

文字编辑: 余德华

责任校对: 李林

封面设计: 潘峰

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 15 1/4 字数 392 千字

2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4692-8/TP·336

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

本书译者

王春海 第1章 第6章第1节 第6章第2节

第8章 第10章

于杰 第4章 第5章

孙东辉 第7章 第9章

庞国星 第2章 第3章

韩伟娜 第6章第3节 第6章第4节 第6章第5节

全书由付建军、赵先仲、樊锐审校。

致 Margrit、Sonja 和 Corinne

前 言

编写一本有关微系统技术方面的书是一项比较困难的工作，这是因为在此领域内相关新技术不断涌现，并且发展十分迅速。如果一个作者想使其书稿中包括该技术的最新内容，则需不断地重写其书稿，这样才可能不会出版类似的书籍。阻碍这类书籍出版的另一个原因是微系统技术的应用领域在不断扩大。以前主要是在度量技术中的应用，如民用、汽车行业或控制领域等，今天微系统技术在最小外科创伤手术、保健或生物化学等领域的市场份额都在不断地扩大。

在本书中，没有介绍微系统技术方面最新的科研和开发成果，因为这些最新的科研和开发成果将出版于相关的技术会议论文中。另外，我们也相信现在的工程师们已从微系统技术的开拓中积累了大量的经验。因此，编写这本书主要是为一些学生和感兴趣的工程师们提供一些该领域的基础知识和基本工艺方法。特别指出的是，我们主要希望介绍一些来源于微电子学，而经过发展又超越了微电子学的一些工艺方法，以及它们是如何在物理、化学、生物学等领域开辟新的空间的。在这样一个基础上，本书主要涉及了有关机械、光学、流体学、化学和生物化学的内容。相信总有一天微系统技术在这些领域内的应用会取得与微电子学一样的成功。

本书的内容已经在 Karlsruhe 大学，瑞士联邦工业大学（ETH 苏黎世）和 Freiburg 大学的新应用科学学院进行过讲授和完善。本书德文版为 VCH-Weinheim 出版社的“Mikrosystemtechnik für Ingenieure”，在该书的第二版中已经加入了一些本书内容的要点。基于微系统技术必须与国际交流的观点，我们又以英文出版了该书。我们对德文版中的内容进行了全面的修订，并且对第 6 章硅基微系统的内容进行了扩充。随着这些改进，我们希望本书通过国际的合作

努力，能为迷人的微系统技术增添一片奇葩。

最后，我们非常感激众多的同事和合作者。他们对本书提出了一些建议、帮助和建设性的批评。Dr. Eric Kay, Mendocino CA 为本书的出版发挥了较大的作用，他们从语言和技术上对本书进行了审核和修订。因此，我们也希望本书在英文技术文献市场上具有成功的竞争力。

Wolfgang Menz

Jürgen Mohr

Oliver Paul

2000年7月于 Freiburg

译者前言

微系统技术是最近二十几年发展起来的一种新技术，其涉及的相关领域包括物理学、化学、物理化学、生物学、生物化学和微电子学等学科，在技术上涉及了物理加工方法、化学加工方法、机械加工方法、系统技术、神经网络技术、控制技术、真空技术和封装技术等相关内容。因此可以说，微系统技术综合了众多学科的理论 and 知识，运用各种最先进的加工技术、控制技术、系统技术形成了一个新的技术领域。微系统技术将在航空、航天、医学、化学工业、食品行业和一般民用行业扮演越来越重要的角色，我们坚信微系统技术的发展将会带给世界更多的惊喜。

本书共分 10 章。前 4 章介绍微系统技术的基础知识，第 1 章主要介绍微结构技术、微系统技术及它们之间的相互关系；第 2 章介绍单晶硅的生产、微结构的基本加工过程、封装技术及洁净技术；第 3 章介绍微系统技术的物理和化学基础，主要包括晶体、电镀和微系统使用的材料；第 4 章介绍用于微系统的主要技术，包括真空技术、物理和化学敷层技术、膜和膜的表面分析技术。第 5~10 章是本书的核心内容，第 5 章主要介绍光刻技术，包括电子束光刻、离子束光刻、X 射线光刻相应的设计技术和工艺技术；第 6 章主要介绍硅技术，包括硅的湿蚀刻技术、干蚀刻技术及表面微加工技术；第 7 章主要介绍 LIGA 技术（X 射线电镀成型），包括掩模的生产、X 射线制版、电流沉积和塑料成型加工；第 8 章主要介绍一些其他的微结构加工技术，包括机械微加工技术、放电微加工技术和激光微加工技术；第 9 章主要介绍封装技术，包括混合封装技术、线连接技术、粘接技术和一些其他的新连接技术；第 10 章主要介绍系统技术，包括传感器、执行元件、信号处理、接口技术、微系统的模块化设计、模拟、集成和测试技术。

本书详细地介绍了微系统技术的基础知识和工艺方法，并给出了大量实例，可以作为高校相关专业高年级学生的选修课教材和课外读物，也适合微系统技术和专业人员及对微系统技术感兴趣的有关人员阅读。译者希望通过本书的出版，能够将微系统技术知识系统地介绍给广大读者，为我国微系统技术的研究和发展起到抛砖引玉的作用。

本书由华北航天工业学院王春海副教授、于杰副教授、孙东辉副教授、庞国星副教授和韩伟娜共同翻译。最后由王春海进行了全书的统稿，并完成了全书的中英文校对工作。在此特别感谢华北航天工业学院的付建军教授、赵先仲教授以及北京航空航天大学樊锐副教授，他们在百忙中审校了本书的全部译稿。

由于译者的水平有限，加之微系统技术是综合了诸多学科前沿技术的一门新技术，在译著中难免会有一些疏漏和错误，恳请读者加以指正。

译者

2003年3月于华北航天工业学院

内 容 提 要

本书是德国 WILEY-VCH 出版社“Microsystem Technology”一书的中译本，讲述微系统技术领域内的相关内容。全书分为 10 章，前 4 章介绍微系统技术的基础知识，如微系统与微结构间的相互关系、单晶硅的生产、微系统技术的物理和化学基础等；5~10 章为本书核心，详细介绍微系统技术的基本工艺方法，包括光刻技术、硅技术、LIGA 技术（X 射线电镀成型）、封装技术等。

本书可作为高校相关专业学生的选修课教材和课外读物，也适用于微系统技术的专业人员和微系统技术感兴趣的人员阅读。

目 录

第 1 章 微结构技术概述	1
1.1 什么是微结构技术	1
1.2 从微结构技术到微系统技术	9
第 2 章 微电子技术相关知识介绍	13
2.1 单晶硅片的生产	13
2.1.1 单晶硅的生产	15
2.1.2 GaAs 单晶的生产	21
2.2 基本工艺过程	23
2.2.1 薄膜沉积	24
2.2.2 光刻 (薄膜图形化)	26
2.2.3 表面改性	28
2.2.4 蚀刻 (薄膜去除)	31
2.3 封装技术	32
2.3.1 对封装技术的要求	32
2.3.2 混合技术	33
2.4 洁净室技术	35
第 3 章 微系统技术的物理和化学基础	41
3.1 晶体和晶体学	41
3.1.1 晶格和晶格类型	42
3.1.2 极射赤面投影	44
3.1.3 单晶硅	47
3.1.4 倒易晶格和晶体结构分析	50
3.2 确定晶体结构的方法	57
3.2.1 X 射线衍射	57
3.2.2 电子束衍射	59
3.3 电镀的基本概念	60
3.3.1 电极-电解液界面	64

3.3.2	极化和过电位	67
3.3.3	阴极金属沉积的机制	68
3.4	微系统技术的材料	75
3.4.1	用于微型机构成型的材料	77
3.4.2	用作传感器的材料	80
3.4.3	用于执行机构的材料	84
3.4.4	用于辅助应用的材料	96
第4章	MEMS 主要技术	101
4.1	真空技术的基本原理	101
4.1.1	平均自由轨迹	102
4.1.2	单层时间	104
4.1.3	原子和分子的速度	105
4.1.4	气体动力学	107
4.1.5	技术真空的分类	107
4.2	真空的生成	109
4.2.1	用于粗真空和细真空的泵	109
4.2.2	高真空泵和超高真空泵	111
4.3	真空测量	116
4.3.1	压力转换计	116
4.3.2	导热性真空计	117
4.3.3	摩擦型真空计	117
4.3.4	热电子电离真空计	118
4.3.5	冷阴极电离计(彭宁原理)	118
4.3.6	泄漏和裂缝探测	119
4.4	薄膜特性	120
4.4.1	结构区域模型	120
4.4.2	层的黏结强度	123
4.5	物理和化学覆层技术	124
4.5.1	蒸发	124
4.5.2	溅射法	126
4.5.3	离子电镀或等离子加速沉积	130
4.5.4	离子束技术	131
4.5.5	CVD 过程	134

4.5.6	外延	136
4.5.7	等离子聚合作用	138
4.5.8	氧化作用	138
4.6	利用干蚀刻过程完成薄膜构造	141
4.6.1	物理蚀刻技术	144
4.6.2	物理化学联合蚀刻技术	147
4.6.3	化学蚀刻技术	152
4.7	薄膜和表面分析	153
4.7.1	电子探针微分析	154
4.7.2	俄歇电子光谱法 (AES)	155
4.7.3	X射线光电子光谱法 (XPS)	157
4.7.4	次级离子质谱法 (SIMS)	157
4.7.5	次级中性粒子质谱法 (SNMS)	158
4.7.6	离子散射光谱法 (ISS)	158
4.7.7	卢瑟福反向散射光谱法 (RBS)	158
4.7.8	扫描隧道显微镜法	159
第5章	光刻	160
5.1	综述与发展历史	160
5.2	抗蚀剂	161
5.3	光刻过程	164
5.4	计算机辅助设计 (CAD)	165
5.4.1	CAD 设计	165
5.4.2	校准图形和测试结构	167
5.4.3	设计结构 (分级, 分层)	168
5.5	电子束光刻法	170
5.5.1	高斯波束	171
5.5.2	利用高斯波束的刻写方案	174
5.5.3	成形波束	175
5.5.4	后置处理	177
5.5.5	邻近效应	178
5.6	光学光刻法	180
5.6.1	掩模	181
5.6.2	投影法	182

5.6.3	成像投影法	184
5.6.4	光刻法的发展	185
5.6.5	用于微机械的光刻法	188
5.7	离子束光刻法	189
5.8	X射线光刻法	190
5.8.1	掩模	191
5.8.2	X射线源	192
5.8.3	同步加速器辐射	192
5.8.4	X射线光刻法的应用	196
第6章	硅微系统技术	197
6.1	硅技术	197
6.1.1	IC工艺和基底	198
6.1.2	铸造技术	202
6.2	硅的微加工	203
6.2.1	前言	203
6.2.2	湿蚀刻	208
6.2.3	基本的蚀刻形状	216
6.2.4	蚀刻控制	222
6.2.5	各向异性湿蚀刻剂特性	228
6.2.6	干法蚀刻	229
6.3	表面微加工	236
6.3.1	多晶硅的微加工	238
6.3.2	牺牲铝的微加工	241
6.3.3	牺牲聚合物的微加工	243
6.3.4	黏性	243
6.4	基于硅技术的微传感器和微系统	245
6.4.1	机械装置和系统	245
6.4.2	热微型装置和系统	251
6.4.3	处理辐射信号的装置和系统	259
6.4.4	磁性装置和系统	265
6.4.5	化学微传感器	267
6.4.6	处理电信号的微加工装置	272
6.5	总结与展望	273

第 7 章 LIGA 加工工艺	275
7.1 概述	275
7.2 掩模生产	277
7.2.1 掩模的构造原理	277
7.2.2 金属载体薄片的生产	279
7.2.3 X 射线中间掩模抗蚀剂的构造	281
7.2.4 X 射线掩模镀金	284
7.2.5 工艺掩模的生产	285
7.2.6 X 射线工艺掩模中的调整窗	286
7.3 X 射线光刻	287
7.3.1 厚抗蚀剂层的生产	287
7.3.2 光诱导反应与抗蚀剂曝光	289
7.3.3 对吸收辐射量的要求	292
7.3.4 影响结构品质的因素	296
7.4 电流沉积	301
7.4.1 为生产微结构而进行的镍的电沉积	302
7.4.2 型芯的制造	307
7.4.3 其他金属与合金的电镀沉积	308
7.5 LIGA 工艺中的塑料成型	310
7.5.1 使用反应注射成型方法的微结构生产	311
7.5.2 使用注射成型方法的微结构生产	314
7.5.3 使用热模压印方法的微结构生产	320
7.5.4 由已经塑造好的塑料结构生产金属微结构 (二次电镀)	322
7.6 LIGA 技术的变化和附加步骤	327
7.6.1 牺牲层技术	327
7.6.2 三维结构	330
7.6.3 利用成型方法的光导结构的产生	333
7.7 应用举例	335
7.7.1 刚性金属微结构	335
7.7.2 运动微结构、微传感器、微执行元件	338
7.7.3 流控微结构	351
7.7.4 光学用途的 LIGA 结构	354
第 8 章 其他微结构加工方法	366

8.1	机械微加工	366
8.1.1	生产过程和主要结构	366
8.1.2	应用实例	370
8.2	放电加工 (EDM)	377
8.2.1	放电加工基础	377
8.2.2	EDM 在微系统中的应用	379
8.3	激光微加工	380
第 9 章	封装和互连技术 (PIT)	385
9.1	混合技术	385
9.1.1	基底和膏剂	386
9.1.2	层的生产	388
9.1.3	电路元件的安放和焊接	390
9.1.4	硅管芯的装配和连接	393
9.2	引线连接技术	394
9.2.1	热压缩引线连接法 (热压焊接连接法)	394
9.2.2	超声波引线连接法 (超声波焊接法)	395
9.2.3	热声波引线连接法 (超声波热压焊接法)	395
9.2.4	球-楔连接法	396
9.2.5	楔-楔连接法	397
9.2.6	线连接工艺的优缺点	398
9.2.7	检验方法和备选方法	399
9.3	新连接技术	399
9.3.1	带自动焊接 (TAB) 技术	400
9.3.2	反转芯片焊接技术	401
9.4	粘接	403
9.4.1	各向同性粘接	403
9.4.2	各向异性粘接	405
9.5	阳极粘接法	406
9.5.1	晶片-玻璃粘接	406
9.5.2	晶片-晶片粘接	408
9.6	低温烧结陶瓷 (LTCC)	409
第 10 章	系统技术	412
10.1	系统的定义	412

10.2	传感器	414
10.3	执行元件	418
10.4	信号处理	420
10.4.1	微系统中传感器的信号处理	421
10.4.2	传感器阵列的神经数据处理	425
10.5	微系统的接口	430
10.5.1	IE (信息、能量) 传递	433
10.5.2	S (物质) 传递	436
10.6	微系统技术的模块概念	437
10.7	微系统的设计、模拟、集成和测试	443
参考文献	446

第 1 章 微结构技术概述

1.1 什么是微结构技术

微系统技术改变了传统的思维方式，将工程师引入一个超越自然认识的领域。作为一个该领域的工程师，他必须学会运用自己的经验处理遇到的新问题，但又不能任意将自己的经验强加于这门崭新的技术。在微电子学中已经存在这种思维转变，只不过由于电子工程师已习惯于处理诸如“电”类的抽象概念，所以当时这个问题并没有那样突出，与个人经验的真正冲突开始于具有机械结构概念的微电子学的出现。

今天微系统技术被处处提及，然而这不但无助于人们更清楚地理解这门技术，相反却使很多概念模糊不清，甚至引起人们的误解。首先，这里要澄清微结构技术与微系统技术的根本区别，尽管二者在用词上已明确地表明了它们的区别。

微结构技术是用于制造微米级物体特定几何结构的工具。然而在某些情况下，物体只有一个方向的尺寸是微米级的，另外两个方向的尺寸则是毫米级的；在另外一些情况下，这些尺寸可能已经达到亚微米级。不过物体的实际尺寸差别并不重要，我们关注的是这门源于微电子学并将人们带入微米级领域的新技术。纳米技术甚至比微米技术更难定义，当然若谈到尺寸为微米的几分之一结构时就使用纳米技术的概念，那就错了，纳米技术应是能够生产和测量纳米结构的技术。这两个技术的起源差别很大，因此不应错误地认为其中一门技术能够逐步发展成为另一门技术。

很多情况下，微结构技术与微系统技术两个词被人们混用，或者至少没有得到明确的定义。微结构技术用于制造微结构体即微型组件，而微系统技术则是将这些微型组件集成为阵列，加上信号处