

国外电子与通信教材系列

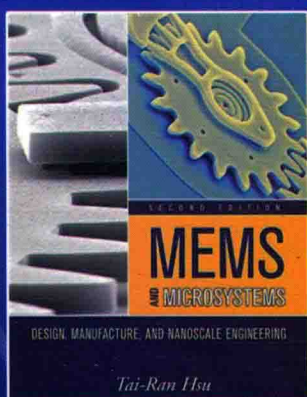
WILEY

MEMS与微系统

——设计、制造及纳尺度工程

(第二版)

**MEMS and Microsystems: Design,
Manufacture, and Nanoscale Engineering, Second Edition**



[美] Tai-Ran Hsu (徐泰然) 著

梁仁荣 刘立滨 等译

许军 审校



中国工信出版集团



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

MEMS 与微系统

——设计、制造及纳尺度工程(第二版)

MEMS and Microsystems: Design, Manufacture,
and Nanoscale Engineering, Second Edition

[美] Tai-Ran Hsu(徐泰然) 著

梁仁荣 刘立滨 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

本书从工程设计的角度讲解机电系统,并同时从电子与机械两个层面介绍相关的技术。作者对本书第一版进行了细致的修订,并额外增加了全新的一章来介绍纳尺度工程。本书首先对纳米技术的发展历史做了一个简要的回顾,然后对各种纳米结构在工程设计方面的基本原理做了详细的介绍,包括形成纳米结构的制造技术、基于分子动力学的工程设计原理以及纳尺度材料中的流体流动与热传导特性等。

本书可作为高校微电子、集成电路设计与集成系统等专业本科生和研究生相应课程的教科书或参考书,对于机械工程或电气工程专业的高年级本科生具有非常重要的参考价值,同时可供与集成电路制造技术有关的专业技术人员学习参考。

MEMS and Microsystems: Design, Manufacture, and Nanoscale Engineering, Second Edition

ISBN:978-0-470-08301-7

Tai-Ran Hsu

Copyright © 2008 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the back cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文字版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons, Inc. 授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封底贴有 John Wiley & Sons, Inc. 防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2009-5182

图书在版编目(CIP)数据

MEMS 与微系统:设计、制造及纳尺度工程:第二版/(美)徐泰然(Tai-Ran Hsu)著;梁仁荣等译.

北京:电子工业出版社,2017.3

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:MEMS and Microsystems: Design, Manufacture, and Nanoscale Engineering, Second Edition

ISBN 978-7-121-30499-6

I. ①M… II. ①徐… ②梁… III. ①微电机-高等学校-教材 IV. ①TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 287876 号

策划编辑:冯小贝

责任编辑:周宏敏

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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:24.25 字数:637 千字

版 次:2017 年 3 月第 1 版(原著第 2 版)

印 次:2017 年 3 月第 1 次印刷

定 价:79.00 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, 88258888。

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。

本书咨询联系方式:fengxiaobei@phei.com.cn。

译者序

半个多世纪以来,以半导体集成电路为代表的微电子技术所取得的长足发展和巨大成功在众多相关领域都引发了一场轰轰烈烈的微型化革命,可以毫不夸张地说,微型化技术已经成为当前以及今后一段时期内科学技术发展的重要方向之一,而微电子机械系统(MEMS)技术则是利用集成电路芯片的微加工技术,在硅晶圆片上大批量地实现各种集成化的微机械、微结构、微能源、微传感器、微执行器以及信号采集、处理、传输、存储、控制等单元电路,最终形成一个完整的、能够完成特定功能且具有一定智能的微型器件或系统。当前国际上 MEMS 技术正在逐步从实验室研究阶段走向实用化应用阶段,未来 MEMS 技术将对工业、农业、国防等领域以及信息、环境、能源、生物工程、医疗、精密仪器、空间科学技术等学科的发展产生重大影响。为了提高我国 MEMS 与微系统领域人才培养的质量和教学水平,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部分老师和研究生同学共同翻译了美国加州圣何塞州立大学机械与航天工程系徐泰然教授的这本《MEMS 与微系统——设计、制造及纳尺度工程(第二版)》教材。

作为一本介绍 MEMS 工程化设计方法的教材,本书既包含了电气技术方面的相关内容,又涵盖了机械力学方面的相关知识。在该书第一版发行之后的五年里,微型化科学与技术领域又发生了很多巨大的变化,包括微系统技术和纳米技术等。为了满足广大工程技术人员日益增长的获取这些相关领域基本知识和经验的迫切需求,作者对这本畅销教材又做了仔细的修订、补充和更新,包括增加了全新的介绍纳尺度工程的相关章节。此外新修订的第二版教材还具有下述一些特点:(1)将微细加工所涵盖的范围进一步扩展到包含了组装技术和封装技术;(2)增加了关于微陀螺仪、微型麦克风以及热管的介绍;(3)增加了关于热致动多层结构器件单元的设计方法学;(4)补充了关于使用常见的 SU-8 聚合物材料方面的相关内容。无论是对于我国高等院校 MEMS 专业的教学工作而言,还是对于我国 MEMS 产业的广大科技工作者来说,本书都堪称是一本选材得当、内容丰富的重要参考书。

本书由清华大学微电子学研究所的梁仁荣、刘立滨等多位老师及研究生同学共同翻译,全书最后由许军进行统一审校,参与翻译工作的有谭桢、万欣、赵连锋、陈宏雷、郑君、严利人、周卫、王玉东、付军、刘荣华。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。

许军

2016年11月于清华园

前 言

自本书第一版出版至今已经过去了5年,在这段时间里我们都目睹了在包括微系统技术和纳米技术在内的有关微型化的科学与技术方面所发生的巨大变化。世界各国的研究机构和工业界已经开发并生产出了多种纳米技术产品,甚至有很多这样的产品已经进入消费市场,其性能也给人们留下了深刻的印象。

为了满足工程师们这种日益增长的获取纳米技术领域相关知识和经验的需求,我们在本书的新版本中增加了一章关于纳米尺度工程的介绍。这一章首先简略地介绍了纳米技术的发展历史和近期的研究进展,接下来概要描述了用于制备诸如量子点、纳米线和纳米管等各种纳米技术产品的相关制造技术。这些纳米技术产品都具有其各自与众不同的特性和应用领域。

新增加的这一章中还介绍了有关纳米尺度物质中的分子动力学、流体流动以及热传输等方面的工程设计原理,这些分析手段给工程师们提供了一个概要性的有关纳米结构工程设计的基础,这一点与第4章和第5章中介绍的有关微米尺度和介观尺度的分析方法是截然不同的。这一章中还讨论了诸如纳米结构的自组装技术——这是纳米结构在实现批量化生产的过程中必须最终解决的一个基本要素——以及纳米技术在社会经济学方面给人类带来的潜在影响等论题。

新版本对于第11章中有关 MEMS 和微系统的组装、封装与测试技术 (APT) 也做了大量扩充。20 多年来在 MEMS 和微系统技术产业化领域所取得的各种成功案例都已经清楚地表明 APT 技术是微系统产品实现批量化生产和高性价比封装的一个主要障碍,需要投入大量的研究与开发工作才能攻克这个前进道路上的拦路虎。这一章既提出了大量与微组装技术相关的重要课题,同时也讨论了使得键合与密封技术能够应用于微米尺度产品的科学基础。为了提高 MEMS 与微系统产品在结构和性能上的可靠性,在其生产和后期制作过程中的现场测试工作看起来也是一个需要工程师和科学家们进行研究开发的主要领域。

此外,新版本还在第2章中增加了有关微陀螺仪和微热导管方面的介绍,在第4章中增加了有关热致动多层带状结构的设计方法学的内容,在第7章中增加了关于常见的 SU-8 聚合物材料的应用。

对于国内外那些采用本书第一版作为授课教材的同行们所反馈的大量建设性的意见和建议,我在此表示衷心的感谢。本书第一版被翻译成中文繁体字版和简体字版后也带来了许多教师和读者的宝贵意见。我的同事 Ji Wang 教授对本书第一版的全文进行了认真的校对,并提出了很有价值的进一步改进建议,对此我也深表谢意。所有这些意见和建议都促使我在这个新版本中对 MEMS 和微系统这两个新兴的微型化技术给予了更多篇幅的介绍。

由于 McGraw-Hill 出版公司已经将其图书出版政策调整为专门出版大学高年级以上的教科书,因此我要感谢该公司将本书第一版的版权归还给我,同时我也要感谢英国工程技术研究院 (Institution of Engineering and Technology in the United Kingdom) 允许我大量使用 *MEMS Packaging* (MEMS 封装技术) 一书中的材料,我在 2004 年有幸参与了该书的编辑工作。最后我还要对 John Wiley & Sons 出版公司承诺出版本书第二版表示感谢。

Tai-Ran Hsu

圣何塞,加利福尼亚

2007年4月

第一版前言

在过去的十年里,无论是在发展速度还是在新的应用方面,微系统工程的技术进步都给人们留下了非常深刻的印象。微系统工程涉及微机电系统(MEMS)及其外部相关器件的设计、制造和封装技术。微系统技术在宇航、汽车、生物技术、消费类产品、国防、环境保护和安全、医疗保健、制药以及远程通信产业等方面都有广泛的应用,这一事实使得许多专家能够对微系统及相关产业在2000年取得令人惊异的820亿美元的营业收入给出一个合理的解释。

快速增长的市场对于MEMS和微系统的迫切需求既使人们对这一学科产生了强烈的兴趣,同时也要求工程教育人员在他们各自的机构内部提供有关这个学科的课程。很多在职的工程师也表现出了类似的兴趣,他们同样希望在有关微系统的设计和制造方面获得必要的知识和经验。但是由于微系统工程是一个无论在科学还是在工程方面均涉及较宽领域的学科,而目前在这方面尚缺少能够全面介绍相关知识的综合性书籍,因此这些在职工程师们要实现他们的理想和目标还面临着较大的困难。由此可见,目前急需一本能够向读者提供有关微系统技术方面的综合性知识以及有关各类微系统产品设计、制造和封装方法学的书籍,正是这样一种需求激发我完成了这本教材的写作。

本书的写作目的是给机械、电机、制造以及相关工程学科的大学高年级本科生和刚入学的研究生提供有关微系统设计、制造与封装技术方面必要的基础知识和经验。学习的重点放在将学生前几年已经获得的各种知识和经验应用于微系统的设计和制造方面。书中相关论题的编排和组织方法以及其中给出的大量设计实例同样也会引导在职的工程师们进入到微系统工程的研究领域。

无论是作为大学本科生还是研究生级别的教材,本书都是准备作为一个15周的学期来使用的。学生应该具备大学数学、物理和化学以及基本的材料科学、电子学和机械设计等工程学科的预备知识。

本书包含以下11章:

第1章首先介绍微系统的概述和微加工技术的发展,由此引出微系统的生产,最后预测了不同类型微系统产品当前的以及潜在的市场情况。

第2章列举了目前已有的各类微系统中的微传感器、微致动器与微马达、微型阀、微型泵以及微流体控制技术的工作原理。

第3章给出了适用于微系统设计和加工制造的相关工程科学论题的概述。

第4章包括与微系统设计和封装技术相关的工程力学知识。这一章讨论的课题包括可变形的固体力学和机械振动理论,此外还包括微结构中常见的薄膜之间界面的热力学和断裂力学的基本方程。本章最后概要介绍了用于应力分析的有限元方法。

第5章讨论了热流体工程原理在微系统设计中的应用。首先概要介绍了流体力学理论和微流体流动的毛细管效应,接着介绍了各种气体在亚微米和纳米尺度的稀疏效应,最后给出了在亚微米尺度的系统中有关热传导特性的修正方程。

第6章论述了广泛应用于微器件与微系统理论设计工作中的等比例定律。学生们将会认识到通过等比例缩小微系统中某些相关的物理量,可能会给器件性能带来正面的影响,也可能带来负面的影响。

第7章讨论了微型元器件中常用的各类材料,介绍了各种有源衬底和无源衬底以及封装材料。对微系统中用到的其他材料,例如压阻、压电和聚合物材料,也进行了描述。

第8章给出了有关微制造技术中的各类微加工工艺的概要介绍。

第9章涵盖了3种常用的微制造技术,即体微制造技术、表面微加工技术和LIGA工艺。

第10章和第11章介绍了与微系统设计和封装技术相关的一些基本要素,给出了CAD工具和有限元分析方法在上述工作中的应用。精选出的几个有关微压力传感器和微流体技术的设计与封装案例研究及例题展示了这些方法在产品设计和封装中的应用。

要在一个15周的学期里通过每星期讲授3小时的课程来覆盖本书中多种不同类型的论题,这对授课教师来说是一个很严峻的挑战。有鉴于此,在接下来的部分中给出了一个“给教师的建议”,这是基于我个人在给两类不同水平的学生讲授这门课程的经验总结出来的,在这个建议中同时也给出了按15周或10周的学期来教授MEMS或微系统课程的授课选题建议。

要依靠一个人的能力来完成这么大篇幅的一本书的准备工作几乎是不可能的。我很荣幸能够有机会与像擅长于纳米流体动力学研究的Ali Beskok教授以及专攻微流体毛细管电泳设计和建模工作的Krishnamoorthy博士这样的专家学者进行交流沟通。能够拥有像Ta-jen Tai、Valerie Barker、Mathew Smith、Jeanette Wood、Jacob Griego和Yen-chang Hu这样一些既具有专业能力又具有献身精神的学生,我也感到非常欣慰,正是他们在我为本书所设计的大量例题中补充了许多详细的计算过程并仔细检查了各个数据的精度。我还要感谢Mindy Kwan帮助我实现了本书中大量照片和插图的数字化工作。同时也要感谢国内外MEMS产业界的众多公司提供了本书中所收录的很多重要照片和插图。这本书的完成也是1995—1998年我领衔负责的一门本科生机械电子学课程开发项目的一部分。最后非常感谢美国国家科学基金会(NSF)本科生教育部门对该项目的资助。

我还要感谢下面所列的各位评审人的不知疲倦的努力,他们在使得这本书尽可能全面和明晰方面,做出了很多超出其职责范围的工作。

Norman Tien, 康奈尔大学

Robert S. Keynton, 路易斯维尔大学

Imin Kao, 纽约州立大学石溪分校

Dennis Polla, 明尼苏达大学

Zeynep Celik-Butler, 南卫理公会大学

Ashok Srivastava, 路易斯安那州立大学

Ryszard Pryputniewicz, 伍斯特理工学院

Michael Y. Wang, 马里兰大学

Michael Hestand, 科罗拉多州立大学

Liwei Lin, 加州大学伯克利分校

Masood Tabib-Azar, 凯斯西储大学

George F. Watson, 技术编辑

我还要特别感谢新加坡 Ngee Ann 理工大学的 Cheah Choo Lek, 他对本书手稿进行了非常认真的阅读和深入细致的思考, 并提出了很多改进的建议。最后, 还要感谢 McGraw-Hill 出版公司的编辑部及其全体职员提供的出色服务, 我也非常感谢 Jonathan 工厂的支持和有效的帮助。

Tai-Ran Hsu

圣何塞, 加利福尼亚

给教师的建议

这本书是为大学高年级本科生和刚入学的一年级研究生编写的教材，它也可以用作参考书，以引导在职的工程师们进入微系统与纳米尺度工程这样一个不断增长的领域。本书的内容是为 15 周的学期课程而设计的，它可以同时适合大学本科生和研究生的教学水平。在舍弃了相当多的材料之后，本书也可以用于 10 周的课程教学。

这本教材将对具有下述学术背景和经验的学生的教学工作特别有效：

1. 较好地掌握了大学数学、物理和化学知识的大学高年级本科生。
2. 已经先修过基本的电机与电子工程、材料科学、工程力学和机械设计等课程或具有相当知识的学生。
3. 有过使用 MathCAD 和 MATLAB 等数学类软件经验的学生。

要在一个 15 周或 10 周的学期内通过每周讲授 3 小时来完成这样一门含有众多不同论题的 MEMS 与纳米技术入门课程的授课任务，这对教师来说是一个严峻的挑战。何况在同一个班级中，很可能不同学生之间的学术背景和经验的差异也非常大，这就会使上述问题变得更加复杂。下面的教学日程表 A 和教学日程表 B 分别给教师在不同学期长度的授课工作提供了授课主题选择方面的建议。授课教师也可以根据自己的判断将下述教学日程表中未列出的章节指定为省略的教学内容或学生的课外阅读材料。

对应于 15 周的学期的教学日程表 A

周数	本科生班级	研究生班级
1	第 2 章	第 2 章
2	3.3 节、3.5 节、3.6 节、3.7 节、3.8 节	3.3 节、3.5 节、3.6 节、3.7 节、3.8 节
3	4.1 节、4.2 节、4.3 节	4.1 节、4.2 节、4.3 节、4.4 节
4	4.4 节、4.6 节、4.7 节、5.1 节	第 4 章剩余部分及 5.1 节、5.2 节
5	5.6 节、5.7 节、5.8 节	第 5 章剩余部分
6	第 6 章	第 6 章及 7.1 节~7.3 节
7	7.1 节~7.5 节	7.4 节~7.11 节
8	7.6 节~7.11 节	8.1 节~8.5 节
9	8.1 节~8.5 节	8.6 节~8.10 节
10	8.6 节~8.10 节	第 9 章及 10.1 节、10.2 节
11	第 9 章	第 10 章剩余部分
12	10.2 节、10.3 节、10.4 节、10.7 节、10.8 节	11.1 节~11.8 节
13	11.1 节~11.8 节	11.9 节~11.19 节
14	11.9 节~11.19 节	12.1 节~12.8 节
15	12.1 节~12.6 节及 12.9 节~12.12 节	第 12 章剩余部分

对应于 10 周的学期的教学日程表 B

周数	本科生班级	研究生班级
1	2.2 节~2.6 节	
2	3.5 节~3.7 节及 4.2.3 节、4.4.3 节	3.5 节~3.7 节, 4.2.3 节、4.4.3 节及 5.1 节、5.4 节~5.9 节
3	5.4 节、5.6 节及 5.7 节	第 6 章
4	7.1 节~7.9 节	第 7 章
5	7.10 节、7.11 节及 8.1 节~8.3 节	8.1 节~8.5 节
6	8.4 节~8.10 节	8.6 节~8.10 节及 9.1 节、9.2 节
7	第 9 章	9.3 节、9.4 节及 10.1 节~10.4 节
8	10.2 节、10.4 节、10.5.2 节、10.7 节、10.8 节	10.2 节、10.3 节、10.4 节、10.5.2 节、10.7 节、10.8 节
9	11.2 节~11.9 节、11.11 节~11.14 节、11.16 节、11.21 节	11.2 节~11.9 节、11.11 节~11.14 节、11.16 节、11.21 节
10	12.2 节~12.5 节、12.11 节、12.12 节	第 12 章

任课教师们当然也可以根据自己的判断来选择授课的主题, 而不一定非要局限于上述教学日程表中建议的情况, 这样可能会更适合他们自己特定的偏好和教学安排。

作者鼓励教师使用黑板来讲解教材中提供的例题, 而不是简单地使用图片或投影幻灯片来向学生快速地展示这些例题。对于学生深入学习并掌握诸如某些特定的微加工工艺等主题的知识来说, 通过精心选题的设计项目而获得的经验也是非常宝贵的。这些设计项目可以分配给包含两个或三个学生的小组来完成。必须给这些设计项目计入适当的分数, 例如可以计入整个课程成绩的 20%。为了完成全班所有学生设计项目的互评, 还可以专门为这些设计项目的陈述报告保留一个额外的时间段或者安排一个“项目日”。这些陈述报告会使得班里所有的学生都从中受益, 因为他们可以通过各自的陈述报告以及随后的积极讨论和提问彼此之间相互学习。授课教师也可以不断收集这些设计项目产生的新想法和结果, 作为他们未来授课材料的补充内容。

目 录

第 1 章 MEMS 与微系统概述	1
1.1 MEMS 与微系统	1
1.2 典型的 MEMS 与微系统产品	4
1.2.1 微齿轮	4
1.2.2 微马达	5
1.2.3 微涡轮	5
1.2.4 微光学元件	5
1.3 微加工技术的发展	6
1.4 微系统与微电子学	7
1.5 微系统设计与制造的多学科特点	8
1.6 微系统与小型化	10
1.7 微系统在汽车工业中的应用	13
1.7.1 安全性	15
1.7.2 发动机和动力传动系统	15
1.7.3 舒适性和便利性	16
1.7.4 汽车诊断和健康监测	16
1.7.5 未来汽车应用	16
1.8 微系统在其他工业中的应用	18
1.8.1 在卫生保健工业中的应用	18
1.8.2 在航空航天工业中的应用	18
1.8.3 在工业产品中的应用	19
1.8.4 在消费类产品中的应用	19
1.8.5 在远程通信中的应用	19
1.9 微系统产品的市场	20
本章习题	21
第 2 章 微系统的工作原理	23
2.1 引言	23
2.2 微传感器	23
2.2.1 声学波传感器	23
2.2.2 生物医学传感器和生物传感器	24
2.2.3 化学传感器	27
2.2.4 光学传感器	28
2.2.5 压力传感器	30
2.2.6 热传感器	34

2.3	微致动	35
2.3.1	利用热力的致动	36
2.3.2	利用形状记忆合金的致动	36
2.3.3	利用压电效应的致动	37
2.3.4	利用静电力的致动	38
2.4	带有微致动器的 MEMS 器件	40
2.4.1	微夹钳	40
2.4.2	微型麦克风	41
2.4.3	微型电动机	43
2.5	具有机械惯性的微致动器	44
2.5.1	微加速度计	44
2.5.2	微陀螺仪	46
2.6	微流体器件	48
2.6.1	微型阀	50
2.6.2	微型泵	51
2.6.3	微型热管	51
	本章习题	52
第3章	微系统设计与制造的工程科学	56
3.1	引言	56
3.2	物质的原子结构	56
3.3	离子和离子化	58
3.4	物质的分子理论和分子间力	58
3.5	半导体材料的掺杂	60
3.6	扩散工艺	62
3.7	等离子体物理	67
3.8	电化学	68
3.8.1	电解	68
3.8.2	电液动力学	69
	本章习题	71
第4章	微系统设计中的工程力学	74
4.1	引言	74
4.2	薄板的静力弯曲	75
4.2.1	周边固定圆板的弯曲	76
4.2.2	四边固定矩形板的弯曲	77
4.2.3	四边固定正方形板的弯曲	78
4.3	机械振动	80
4.3.1	基本公式	80
4.3.2	共振	83
4.3.3	微加速度计	84

4.3.4	加速度计的设计理论	85
4.3.5	阻尼系数	91
4.3.6	谐振式微传感器	98
4.4	热力学	101
4.4.1	材料机械强度的热效应	102
4.4.2	蠕变变形	102
4.4.3	热应力	103
4.5	断裂力学	112
4.5.1	应力强度因子	113
4.5.2	断裂韧性	114
4.5.3	界面断裂力学	115
4.6	薄膜力学	117
4.7	有限元应力分析概述	118
4.7.1	原理	118
4.7.2	工程应用	119
4.7.3	有限元分析(FEA)的输入信息	120
4.7.4	有限元分析(FEA)的输出信息	120
4.7.5	图形化输出	120
4.7.6	总体评论	121
	本章习题	122
第5章	热流体工程与微系统设计	125
5.1	引言	125
5.2	宏观和介观流体力学基础回顾	125
5.2.1	流体的黏性	126
5.2.2	流线和流管	127
5.2.3	控制体和控制面	127
5.2.4	流动模式和雷诺数	127
5.3	连续介质流体动力学基本方程	128
5.3.1	连续性方程	128
5.3.2	动量方程	129
5.3.3	运动方程	131
5.4	圆形导管中的层流体流动	133
5.5	计算流体力学	135
5.6	微导管中不可压缩流体的流动	136
5.6.1	表面张力	136
5.6.2	毛细管效应	138
5.6.3	微型泵	139
5.7	固体中的热传导概述	139
5.7.1	热传导的一般性原理	140

5.7.2	热传导的傅里叶定律	140
5.7.3	热传导方程	141
5.7.4	牛顿冷却定律	142
5.7.5	固体-流体之间的相互作用	143
5.7.6	边界条件	143
5.8	多层薄膜中的热传导	147
5.9	亚微米尺度下固体中的热传导	150
	本章习题	150
第 6 章	微型化中的按比例缩小法则	154
6.1	按比例缩小法则简介	154
6.2	几何结构的按比例缩小	154
6.3	刚体动力学中的按比例缩小	155
6.3.1	动态作用力的比例关系	156
6.3.2	Trimmer 力缩比矢量	156
6.4	静电力中的缩比特性	158
6.5	电磁力的缩比特性	159
6.6	电学中的缩比特性	161
6.7	流体力学中的缩比特性	161
6.8	热传输过程中的缩比特性	163
6.8.1	热传导过程中的缩比特性	164
6.8.2	热对流中的缩比特性	164
	本章习题	165
第 7 章	用于 MEMS 和微系统的材料	166
7.1	引言	166
7.2	衬底和晶圆片	166
7.3	有源衬底材料	167
7.4	作为衬底材料的硅	167
7.4.1	用于 MEMS 的理想衬底	167
7.4.2	单晶硅和晶圆片	168
7.4.3	晶体结构	169
7.4.4	密勒指数	171
7.4.5	硅的机械性能	173
7.5	硅的化合物	174
7.5.1	二氧化硅	174
7.5.2	碳化硅	175
7.5.3	氮化硅	175
7.5.4	多晶硅	176
7.6	硅压电电阻	176
7.7	砷化镓	179

7.8	石英	180
7.9	压电晶体	181
7.10	聚合物	185
7.10.1	作为工业材料的聚合物	185
7.10.2	用于 MEMS 和微系统的聚合物	186
7.10.3	导电聚合物	186
7.10.4	LB(Langmuir-Blodgett)膜	187
7.10.5	SU-8 光致抗蚀剂	188
7.11	封装材料	190
	本章习题	190
第 8 章	微系统制造工艺	194
8.1	引言	194
8.2	光刻	194
8.2.1	概述	194
8.2.2	光刻胶及其应用	195
8.2.3	光源	196
8.2.4	光刻胶的显影	197
8.2.5	光刻胶的去除和烘烤	197
8.3	离子注入	197
8.4	扩散	199
8.5	氧化	201
8.5.1	热氧化工艺	201
8.5.2	二氧化硅	202
8.5.3	热氧化的速率	202
8.5.4	由颜色来确定氧化层厚度	205
8.6	化学气相淀积	205
8.6.1	CVD 的工作原理	206
8.6.2	CVD 工艺中的化学反应	206
8.6.3	淀积的速率	207
8.6.4	增强型的 CVD	212
8.7	物理气相淀积——溅射	213
8.8	外延淀积	214
8.9	腐蚀	215
8.9.1	化学腐蚀	216
8.9.2	等离子体刻蚀	216
8.10	微加工技术小结	217
	本章习题	217
第 9 章	微制造概述	221
9.1	引言	221

9.2	体硅微制造技术	221
9.2.1	腐蚀工艺概述	222
9.2.2	各向同性腐蚀与各向异性腐蚀	222
9.2.3	湿法腐蚀剂	223
9.2.4	自停止腐蚀	225
9.2.5	干法刻蚀	225
9.2.6	湿法腐蚀工艺与干法刻蚀工艺的比较	228
9.3	表面微加工技术	229
9.3.1	概述	229
9.3.2	工艺过程	229
9.3.3	表面微加工技术中的力学问题	230
9.4	LIGA 工艺	232
9.4.1	LIGA 工艺概述	233
9.4.2	用作衬底和光刻胶的材料	234
9.4.3	电镀	234
9.4.4	SLIGA 工艺	235
9.5	微制造技术总结	235
9.5.1	体硅微制造工艺	235
9.5.2	表面微加工技术	235
9.5.3	LIGA 工艺	236
	本章习题	236
第 10 章	微系统设计	239
10.1	引言	239
10.2	设计考虑	239
10.2.1	设计约束	240
10.2.2	材料的选择	241
10.2.3	制造工艺的选取	243
10.2.4	信号转换方式的选择	244
10.2.5	机电系统	245
10.2.6	封装	246
10.3	工艺设计	246
10.3.1	光刻	246
10.3.2	薄膜加工	247
10.3.3	结构成型	248
10.4	力学设计	248
10.4.1	MEMS 元件的几何结构	248
10.4.2	热力学负载	249
10.4.3	热力学应力分析	250
10.4.4	动力学分析	250

10.4.5	界面断裂分析	253
10.5	使用有限元方法的力学设计	254
10.5.1	有限元方程	254
10.5.2	微制造工艺模拟	258
10.6	微压力传感器硅芯片的设计	259
10.7	微流体网络系统的设计	262
10.7.1	微管道中的流动阻力	263
10.7.2	毛细管电泳网络系统	266
10.7.3	毛细管电泳网络系统的数学模型	267
10.7.4	设计案例: 毛细管电泳网络系统	268
10.7.5	弯曲管道中的毛细管电泳现象	271
10.7.6	毛细管电泳过程中的设计问题	271
10.8	计算机辅助设计	272
10.8.1	为什么要用计算机辅助设计	272
10.8.2	用于微系统的 CAD 软件包是什么	272
10.8.3	如何选择 CAD 软件包	274
10.8.4	利用 CAD 软件完成的设计实例	274
	本章习题	277
第 11 章	微系统的组装、封装与测试	281
11.1	引言	281
11.2	微组装概述	282
11.3	微组装的高成本	283
11.4	微组装工艺过程	284
11.5	微组装中主要的技术问题	286
11.5.1	微组装的容差	286
11.5.2	设备与夹具	288
11.5.3	微组装工具中的接触问题	289
11.6	微组装工作单元	290
11.7	微组装技术中的挑战	291
11.8	微系统封装概述	292
11.9	封装设计的一般考虑	293
11.10	微系统封装的三个层次	294
11.10.1	芯片级封装	294
11.10.2	器件级封装	296
11.10.3	系统级封装	296
11.11	微系统封装的接口问题	296
11.12	基本的封装技术	297
11.13	芯片准备	298
11.14	表面键合	298