



国际机械工程先进技术译丛

微机电系统 设计与加工

MEMS Design and Fabrication

(美) Mohamed Gad-el-Hak 编
张海霞 赵小林 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际机械工程先进技术译丛

微机电系统设计与加工

MEMS Design and Fabrication

(美) Mohamed Gad-el-Hak 编

张海霞 赵小林 等译



机械工业出版社

本书是 MEMS 系列图书的一本, 主要介绍 MEMS 技术中材料和加工方面的知识。内容包括: MEMS 中的材料, MEMS 制造, LIGA 及其微模压, 基于 X 射线的加工, EFAB 技术及其应用, 单晶 SiC MEMS 制造、特性与可靠性, 用于碳化硅体微加工的等离子体反应深刻蚀, 聚合物微系统: 材料和加工, 光诊断方法考察微流道的入口长度, 应用于航空航天微化学传感器, 恶劣环境下的 MEMS 器件封装技术, 纳机电系统制造技术, 分子自组装基本概念及应用。

本书主要面向 MEMS 专业的高年级本科生和研究生, 也可供 MEMS 技术研究人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

微机电系统设计与加工 / (美) 盖德 (Gad-el-Hak, M.) 编; 张海霞等译. —北京: 机械工业出版社, 2010. 1

(国际机械工程先进技术译丛)

MEMS Design and Fabrication

ISBN 978-7-111-28597-7

I. 微… II. ①盖…②张… III. ①微电机—系统设计②微电机—加工
IV. TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 189615 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 孔 劲 责任编辑: 庞 晖 版式设计: 霍永明

封面设计: 鞠 杨 责任校对: 张晓蓉 责任印制: 洪汉军

三河市宏达印刷有限公司印刷

2010 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·34.25 印张·4 插页·849 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-28597-7

定价: 63.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010)88379649

读者服务部: (010)68993821

封面无防伪标均为盗版

译 丛 序 言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是 20 世纪 80 年代提出的，由机械制造技术发展而来。通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及到机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术既有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等。
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等。
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方面发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流源远流长

近年来，国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到，我国制造业与工业发达国家相比，仍存在较大差距。因此必须加强原始创新，在实践中继承和创新，学习国外的先进制造技术和经验，提高自主创新能力，形成自己

的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史，可以追溯到唐朝甚至更远一些，唐玄奘去印度取经可以说是一段典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术及技术交流方式。早在 20 世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体，图书是一个海洋，虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段，但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性，看书总比在计算机上看资料更方便，不同层次的要求可以参考不同层次的图书，不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书，同时它具有比较长期的参考价值和收藏价值。当然，技术图书的交流具有时间上的滞后性，不够及时，翻译的质量也是个关键问题，需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者作出贡献，为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作，从而能够提升我国制造业的自主创新能力，引导和推进科研与实践水平不断进步。

三、选择严谨质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书，在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量，力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选择把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担，充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书，组成一套“国际制造业先进技术译丛”。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性，应能代表相关专业的技术前沿，对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业，例如机械、材料、能源等，既包括对传统技术的改进，又包括新的设计方法、制造工艺等。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员，高等院校的教师和学生，可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版“国际制造业先进技术译丛”的专家学者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐评审和翻译的知名专家，特别要感谢承担翻译工作的译者，对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意，同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

译 者 序

MEMS 的历史可以追溯到 20 世纪的五、六十年代。1959 年,著名物理学家 Richard P. Feynman 在加州理工学院发表了题为《There's Plenty of Room at the Bottom》的演讲,提出了系统微小型化的概念,并预言了这一技术的广阔前景。随后的 30 年间,研究者在硅的各向异性腐蚀技术、薄膜淀积技术等大的方面开展了大量的研究。1988 年,UC Berkely 的 Richard Muller 小组研制成功了世界上第一台硅静电马达,震惊了学术界,并带来了微机电系统的飞速发展。

目前成功的 MEMS 产品有防撞气囊加速度计、喷墨打印机打印头、计算机磁盘读写头、投影芯片、血压计、光开关、微泵、微阀、生物传感器、MEMS 微镜等。生物芯片、化学传感器、温度传感器、RF MEMS 以及纳米尺度的微机械部件等研究也相继得到了长足的发展和推进。另外,在远程通信(光通信和无线通信)、生物化学和自动控制方面等领域有着巨大的应用潜力。在未来几十年内, MEMS 技术将像微电子技术一样渗透进生活的各个角落。

随着 MEMS 发展春天的到来,学术界和产业界对 MEMS 领域的关注也在不断升温,因此有关介绍资料和研究书籍也逐渐增多,但是这是一个多学科交叉的领域,很难找到比较全面和深入介绍的专业书,因此,我最初拿到这两本书的时候,心情十分激动,因为终于为我给研究生上的“MEMS 器件与设计”课程找到了比较好的参考书,这套书恰如入夜的春雨,给正在蓬勃发展的 MEMS 专业从业人员带来了全面而完整的专业知识。

可是,等到开始翻译才发现这是一件庞大而复杂的工作,这套书的涉猎实在是太广了,从材料、加工到设计技术,从传统的 MEMS 传感器、执行器到新兴的微流控技术等,实在非小团队所能驾驭,这要感谢我们“微米纳米加工技术国家级重点实验室”的各位同仁。最终本书由北京大学微电子学研究院和上海交通大学微纳研究院的两个团队合作完成,北京大学负责硅基的加工技术,上海交通大学的重点在于非硅技术的研发,双方从 1996 年开始就有着非常多的互补和友好的合作,涉猎了 MEMS 研发的各个方面,这 12 年的积累在这套书的翻译中得到了充分的发挥,北京大学的金玉丰教授、上海交通大学的赵小林教授作为实验室的正副主任,对本书的翻译给予了大力支持,20 多位年轻的老师和博士参与了本书的翻译工作,这是一次大规模、高效率的合作,从 2007 年 10 月到 2008 年 4 月的半年时间里,大家通力合作、互相鼓励和帮助,一口气把这 200 多万字的两本厚书翻译、校对了三遍!掩卷沉思,为大家感动,为中国感动,相信 MEMS 的春天正在向我们走来!

本书主要是介绍 MEMS 的加工和设计技术,共分 14 章详细介绍了材料、加工技术、特殊加工方法以及化学、光学等在 MEMS 加工和设计中的应用,这些章节分别由来自加拿大、印度、以色列、意大利、韩国、瑞典、美国、中国台湾和中国香港的多位知名科学家合著而成,我们的翻译队伍则主要是由北京大学和上海交通大学的多位年轻学者组成,按照章节顺序依次是张海霞(第 1 章)陈兢(第 2 章)、缪旻、安萍、丁海涛等(第 3 章)、李以贵

(第4、5章)、丁桂甫(第6章)、孙广毅(第7、8章)、刘景全(第9章)、陈庆华(第10、11章)、张锦文(第12章)、刘丽月(第13章)、陈翔(第14章)等,白艳萍、吴文刚、张锦文、方东明等参加了主要章节的审阅和修改,张海霞、赵小林老师完成了最后的审校。

张海霞

目 录

译丛序言

译者序

第1章 绪论	1
参考文献	3
第2章 MEMS 中的材料	6
2.1 简介	6
2.2 单晶硅	6
2.3 多晶硅	8
2.4 二氧化硅	12
2.5 氮化硅	14
2.6 锗基材料	17
2.7 金属	18
2.8 碳化硅	19
2.9 金刚石	21
2.10 III-V 材料	23
2.11 压电材料	23
2.12 结论	24
参考文献	24
第3章 MEMS 制造	28
3.1 湿法体微加工工艺	28
3.2 历史沿革	29
3.3 硅晶体学	30
3.4 硅衬底	41
3.5 硅作为机械材料在 MEMS 中的应用	42
3.6 硅的其他传感特性	55
3.7 湿法各向同性及各向异性腐蚀	58
3.8 半导体在偏压和光照作用下的腐蚀	84
3.9 腐蚀停止技术	90
3.10 湿法体硅微加工工艺	99
3.11 计算机模拟软件	105
3.12 湿法体微加工实例	106
3.13 表面微加工简介	112
3.14 表面微加工工艺的历史沿革	114
3.15 薄膜的机械特性	115
3.16 表面微加工工艺	129
3.17 表面多晶硅微加工技术的改进	141
3.18 非多晶硅的表面微加工工艺	147

3.19 体硅与表面微加工技术的比较	155
3.20 材料的制备和特性	156
3.21 多晶硅表面微加工实例	174
参考文献	186
第4章 LIGA 及其微模压	208
4.1 引言	208
4.2 LIGA—背景	210
4.3 LIGA 及准 LIGA 工艺	216
4.4 应用实例	269
参考文献	274
第5章 基于 X 射线的加工	280
5.1 引言	280
5.2 DXRL 基本原理	282
5.3 制模	292
5.4 材料特性和改进	296
5.5 平坦化	300
5.6 突角和凹角的几何形状	301
5.7 多层 DXRL 工艺	303
5.8 牺牲层与组装	305
5.9 应用实例	306
5.10 结论	318
参考文献	318
第6章 EFAB 技术及其应用	325
6.1 引言	325
6.2 技术优势	327
6.3 EFAB 技术	329
6.4 EFAB 的应用	338
参考文献	341
第7章 单晶 SiC MEMS 制造、特性与可靠性	342
7.1 引言	342
7.2 6H-SiC 光电化学制造工艺	343
7.3 6H-SiC 量规因数的特征	347
7.4 高温金属化	353
7.5 传感器特性	361
7.6 可靠性评价	365
7.7 结论	369
致谢	370
参考文献	370
第8章 用于碳化硅体微加工的等离子体反应深刻蚀	373
8.1 引言	373
8.2 高密度等离子体刻蚀基本原理	374
8.3 SiC 刻蚀基本原理	375

8.4 SiC DRIE 的应用	377
8.5 结论	384
参考文献	384
第9章 聚合物微系统：材料和加工	386
9.1 引言	386
9.2 MEMS 中的聚合物材料	387
9.3 聚合物微加工技术	399
9.4 器件举例	409
9.5 未来的方向与挑战	415
参考文献	416
第10章 光诊断方法考察微流道的入口长度	420
10.1 引言	420
10.2 微尺度流体力学中的光诊断测量学	422
10.3 μ PIV 概况	426
10.4 微流道中流的入口长度测量	436
10.5 μ PIV 技术的拓展	442
参考文献	448
第11章 应用于航空航天微化学传感器	452
11.1 引言	452
11.2 航空航天应用	453
11.3 传感器制备技术	456
11.4 化学传感器开发	458
11.5 未来方向、传感器阵列以及商业化	467
11.6 商业应用	472
11.7 结论	472
致谢	472
参考文献	473
第12章 恶劣环境下的 MEMS 器件封装技术	475
12.1 引言	475
12.2 封装材料	476
12.3 圆片级封装	478
12.4 高温电气互连系统	478
12.5 粘合芯片结构的热机械特性	485
12.6 高温陶瓷封装系统	493
12.7 相关讨论	494
致谢	497
参考文献	497
第13章 纳机电系统制造技术	500
13.1 引言	500
13.2 NEMS 兼容的工艺技术	501
13.3 纳米机器的制备：与生物学的交叉	513
13.4 结论	517

参考文献	517
第 14 章 分子自组装基本概念及应用	521
14.1 引言	521
14.2 分子-分子的相互作用力	522
14.3 分子-基片之间的作用	525
14.4 功能化表面的应用	531
14.5 结论和前景展望	534
参考文献	534

第 1 章 绪 论

Mohamed Gad-el-Hak

弗吉尼亚联邦大学

制造工具是我们人类特有的能力，这种能力将人与地球上的所有其他物种区分开来，早在 40 万年前，古老的 *Homo sapiens* 人（智人，现代人的学名）就雕刻出了符合空气动力学的木制长矛，此后的数万年，人类制造了各种工具，尺寸从 10^{-4}m 到 10^2m 不等，如图 1-1 所示。如果纳入整个尺度范围，你会惊异地发现人类自身的尺寸恰好位于最小尺寸（亚原子粒子，约 10^{-26}m ）和可观测的最大尺寸（宇宙范围，量级为 10^{26}m ，即 150 亿光年）的正中间，这既不是日心说也不是地心说，而是以宇宙为中心的。人类的发展历史，是一部探索、制造和控制各种工具的奋斗史，我们不停地挑战着时间和空间的极限，作家 Jonathan Swift（1726）就在他著名的《格利佛游记》中，对世界上常规物理尺度的放大和缩小进行了大胆推测[⊖]。从宏观上看，公元前 2600 年，埃及建造的胡夫金字塔高达 147m，而 1931 年竣工的帝国大厦（1950 年加了广播电视天线后）高达 449m。在建筑物高度不断创下新的世界纪录的同时，我们人类的设计也在向着另外一个方向努力，一枚硬币的直径一般只略长于 2cm，从 13 世纪起，制表工匠就开始尝试微小型化工艺，17 世纪显微镜的发明则开辟了直接观察微生物、植物和动物细胞的途径，到 20 世纪后半叶，随着 1947 年晶体管的发明——集成电路技术的迅猛发展，不但把我们带入信息时代，也将我们带入了微纳米时代。

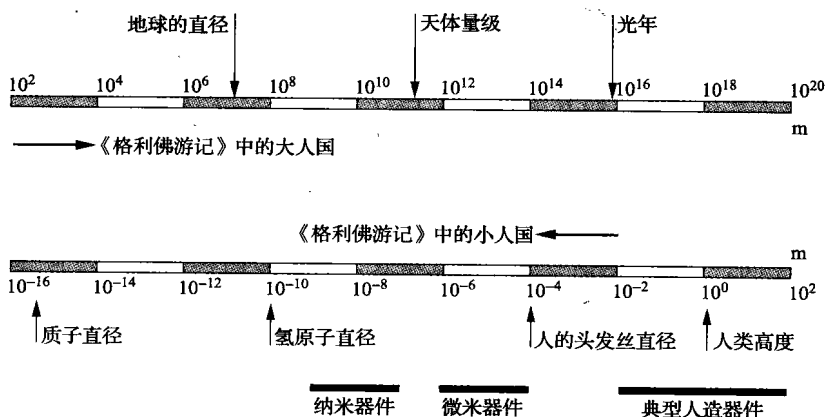


图 1-1 物质的量度，以 m 为单位。下方低刻度自左向右延伸至上方高刻度。 $1\text{m} = 10^6\mu\text{m}$ ， 10^9mm ， $10^{10}\text{\AA}$ 。

微机电系统（Microelectromechanical System，简称 MEMS）的起源，可以追溯到 1959

⊖ 《格利佛游记》最初被设计为将其中一部分撰写成讽刺人类知识滥用的讽刺文学。该故事的核心，是一个对人性的激进批评文学。其中采用了微妙的反讽技巧使读者抛弃任何先入为主的偏见并挑战他们对人的最初概念。

年,著名物理学家理查德-费曼教授在美国物理学会年度会议上发表了著名的演讲^①,“于细微处天地宽”,他提到“当我们在生活中需要处理一些非常细小且极易损坏的物品时,我们会情不自禁地想到如果能够制造一只机械蚂蚁来做就好了!”当时他并没有预见到微机械的众多实用价值,还感叹到“微小但活动的机械未必有用,不过制造它们一定会很有趣”。24年后,1983年2月23日费曼教授在喷气推进实验室提出了“超微小机械”,他说,“这些机器没什么用,所以我仍不明白为什么我会如此着迷于如何制造具有可动和可控部件的微小机器”。近年来,用于制造超精密机械的制造工艺有了长足进步,以硅加工为代表的一大批新型的加工技术在世界范围内得到了应用和推广,特征尺寸小于 $100\mu\text{m}$ 的各种各样的器件先后问世,如静电的、磁的、电磁的、气动的和热驱动的执行器、电动机、阀、齿轮、悬臂、振动膜和夹具等,广泛应用于测量压力、温度、流体、速率、声音以及化学成分;它们不单是作为传感器和执行器,还作为复杂系统的重要组成部分,例如,单片系统、机器人、微发动机以及微泵等。

微机电系统(MEMS)是指特征尺寸在 $1\sim 1000\mu\text{m}$ 之间、利用集成电路加工技术将机械和电子元件集成的器件,MEMS器件小于人的头发丝直径,近年来出现的MEMS则进一步推动了微小型技术的发展。目前,MEMS制造技术主要包括:硅表面微加工、体硅微细加工、光刻、电镀、LIGA和电火花加工(EDM)等,本书的制造技术部分由著名专家Kovacs(1998)和Madou(2002)提供了详细的资料。

当初费曼教授的一个设想,不但引出了一个新的学科MEMS,还在人类的社会生活中发挥了巨大的作用,MEMS在各种工业和医疗等领域占有越来越多的应用,例如,汽车安全气囊用的加速度计,无钥匙控制系统,用于高清晰光学显示的微镜阵列,用于单原子成像的扫描电子显微镜探针,电路冷却用的微换热器,分离生物细胞的反应器,血液分析仪,医学导管用的压力传感器,红外探测器用的微管道,半导体激光器,微型色谱仪,高频射流控制系统,喷墨打印技术,以及用于医学领域的微量药物的受控传输和监测等。备受关注的片上分析系统有望使生物和化学分析和处理的自动化程度与计算机相当。

全球投入微米和纳米技术研究的资金从1997年的4.32亿美元增涨五倍,至2002年的22亿美元。2004年,美国国家纳米技术计划的预算接近10亿美元,全球的研发投资超过35亿美元。据估计,在10~15年内,微米技术和纳米技术将在每年的材料市场占3400亿美元,电子市场占3000亿美元,药品市场占1800亿美元。

在过去10年间,MEMS的研究呈爆炸式增长,有许多期刊是专门为MEMS技术而创办的。以MEMS为主题的国际会议和研讨会也风靡世界。同时,很多研究型的微纳技术网站也非常受欢迎。

我们出版这一套微机电系统的丛书包括三个MEMS的多个方面,或者说,是一套关于机电产品小型化的艺术和科学的丛书,系统地讨论了微机电系统设计、制造和应用,包括材料、物理模型、输运现象和加工工艺,微机电系统的电气、结构、流体、运输以及控制等章节,还涵盖了MEMS在各个领域的应用。这三本书的内容较新,全面地反映了MEMS在近年来的最新研究成果,如研究热点微尺度流体力学领域,格子波尔兹曼模型,基于聚合物的传感器和致动器、诊断工具,微致动器,非线性电动装置和分子自组等。

① 所有演讲已在J. MEMS(微电子机械系统期刊)再版[1992, 1(1): 60-66; 1993, 2(1): 4-14.]。

本书共有 45 个章节, 由来自全球的 71 位权威科学家撰写, 他们分别来自加拿大、美国、印度、以色列、意大利、韩国、瑞典、中国台湾和中国香港。由于由多位作者参与编写, 难免在各章节的长短、深度、广度和文风上存在差异。

这套书作为 MEMS 手册出版, 对具有工程学或科学背景的读者, 具有很强的系统性和可读性, 为专业技术人员和研究者提供了 MEMS 这一新兴学科及其未来发展的概述。这三本书[⊖]将为丰富微机电系统领域的著作提供有用的指南和参考, 并全面介绍微细加工及微型器件的基础与应用。通过每本书的目录, 读者便可看出本套书偏重于微型器件物理学, 这是我们的理念: MEMS 技术相对我们对其所涉及的非传统物理学的了解, 已经走得太快了, 只有以掌握其根本原理作为坚实基础, MEMS 技术的发展才会切实受益, 如果对这些物理原理的了解可以更深入, 途径更经济和效率更高, 那么微器件便可以为达到各种现存的和理想的应用而设计、制造和操作出来。按照这一理论, 讨论控制理论、分布式控制与软件计算的章节被用来作为超前理论的支撑, 以达到节约大量的能源和改善车辆及其他人工装置的高效控制策略。

开卷有益, 现在你可以像格利佛一样开始在本书的各章节遨游了, 你将会遇到许多奇妙的微小世界, 你的旅行可能和《格利佛游记》中到“世界上几个偏远的国度”一样令人振奋和具有启发性!

参 考 文 献

- [1] Amato, I. (1998) "Formenting a Revolution, in Miniature," *Science* 282, no. 5388, 16 October, pp. 402-405.
- [2] Angell, J.B., Terry, S.C., and Barth, P.W. (1983) "Silicon Micromechanical Devices," *Faraday Transactions I* 68, pp. 744-748.
- [3] Ashley, S. (1996) "Getting a Microgrip in the Operating Room," *Mech. Eng.* 118, September, pp. 91-93.
- [4] Bryzek, J., Peterson, K., and McCulley, W. (1994) "Micromachines on the March," *IEEE Spectrum* 31, May, pp. 20-31.
- [5] Busch-Vishniac, I.J. (1998) "Trends in Electromechanical Transduction," *Phys. Today* 51, July, pp. 28-34.
- [6] Chalmers, P. (2001) "Relay Races," *Mech. Eng.* 123, January, pp. 66-68.
- [7] DeGaspari, J. (2003) "Mixing It Up," *Mech. Eng.* 125, August, pp. 34-38.
- [8] Ehrenman, G. (2004) "Shrinking the Lab Down to Size," *Mech. Eng.* 126, May, pp. 26-29.
- [9] Epstein, A.H. (2000) "The Inevitability of Small," *Aerospace Am.* 38, March, pp. 30-37.
- [10] Epstein, A.H., and Senturia, S.D. (1997) "Macro Power from Micro Machinery," *Science* 276, 23 May, p. 1211.
- [11] Epstein, A.H., Senturia, S.D., Al-Midani, O., Anathasuresh, G., Ayon, A., Breuer, K., Chen, K.-S., Ehrich, F.F., Esteve, E., Frechette, L., Gauba, G., Ghodssi, R., Groshenry, C., Jacobson, S.A., Kerrebrock, J.L., Lang, J.H., Lin, C.-C., London, A., Lopata, J., Mehra, A., Mur Miranda, J.O., Nagle, S., Orr, D.J., Piekos, E., Schmidt, M.A., Shirley, G., Spearing, S.M., Tan, C.S., Tzeng, Y.-S., and Waitz, I.A. (1997) "Micro-Heat Engines, Gas Turbines, and Rocket Engines — The MIT Microengine Project," AIAA Paper No. 97-1773, AIAA, Reston, Virginia.
- [12] Feder, T. (2004) "Scholars Probe Nanotechnology's Promise and Its Potential Problems," *Phys. Today* 57, June, pp. 30-33.

⊖ 本次引进版权的是这三本书中的两本, 所以译者序中, 译者才会写到“最初拿到这两本书的时候”。——编者注。

- [13] Feynman, R.P. (1961) "There's Plenty of Room at the Bottom," in *Miniaturization*, H.D. Gilbert, ed., pp. 282–296, Reinhold Publishing, New York.
- [14] Gabriel, K.J. (1995) "Engineering Microscopic Machines," *Sci. Am.* 260, September, pp. 150–153.
- [15] Gabriel, K.J., Jarvis, J., and Trimmer, W., eds. (1988) *Small Machines, Large Opportunities: A Report on the Emerging Field of Microdynamics*, National Science Foundation, published by AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey.
- [16] Gabriel, K.J., Tabata, O., Shimaoka, K., Sugiyama, S., and Fujita, H. (1992) "Surface-Normal Electrostatic/Pneumatic Actuator," in *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems '92*, pp. 128–131, 4–7 February, Travemünde, Germany.
- [17] Garcia, E.J., and Sniegowski, J.J. (1993) "The Design and Modelling of a Comb-Drive-Based Microengine for Mechanism Drive Applications," in *Proc. Seventh International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '93)*, pp. 763–766, Yokohama, Japan, 7–10 June.
- [18] Garcia, E.J., and Sniegowski, J.J. (1995) "Surface Micromachined Microengine," *Sensor. Actuator. A* 48, pp. 203–214.
- [19] Goldin, D.S., Venneri, S.L., and Noor, A.K. (2000) "The Great out of the Small," *Mech. Eng.* 122, November, pp. 70–79.
- [20] Gravesen, P., Branebjerg, J., and Jensen, O.S. (1993) "Microfluidics — A Review," *J. Micromech. Microeng.* 3, pp. 168–182.
- [21] Ho, C.-M., and Tai, Y.-C. (1996) "Review: MEMS and Its Applications for Flow Control," *J. Fluids Eng.* 118, pp. 437–447.
- [22] Ho, C.-M., and Tai, Y.-C. (1998) "Micro–Electro–Mechanical Systems (MEMS) and Fluid Flows," *Annu. Rev. Fluid Mech.* 30, pp. 579–612.
- [23] Hogan, H. (1996) "Invasion of the Micromachines," *New Sci.* 29, June, pp. 28–33.
- [24] Karniadakis, G.E., and Beskok A. (2002) *Microflows: Fundamentals and Simulation*, Springer-Verlag, New York.
- [25] Knight, J. (1999) "Dust Mite's Dilemma," *New Sci.* 162, no. 2180, 29 May, pp. 40–43.
- [26] Kovacs, G.T.A. (1998) *Micromachined Transducers Sourcebook*, McGraw-Hill, New York.
- [27] Lemay, S.G., Janssen, J.W., van den Hout, M., Mooij, M., Bronikowski, M.J., Willis, P.A., Smalley, R.E., Kouwenhoven, L.P., and Dekker, C. (2001) "Two-Dimensional Imaging of Electronic Wavefunctions in Carbon Nanotubes," *Nature* 412, 9 August, pp. 617–620.
- [28] Lipkin, R. (1993) "Micro Steam Engine Makes Forceful Debut," *Sci. News* 144, September, p. 197.
- [29] Madou, M. (2002) *Fundamentals of Microfabrication*, second edition, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- [30] Nguyen, N.-T., and Wereley, S.T. (2002) *Fundamentals and Applications of Microfluidics*, Artech House, Norwood, Massachusetts.
- [31] O'Connor, L. (1992) "MEMS: Micromechanical Systems," *Mech. Eng.* 114, February, pp. 40–47.
- [32] O'Connor, L., and Hutchinson, H. (2000) "Skyscrapers in a Microworld," *Mech. Eng.* 122, March, pp. 64–67.
- [33] Ouellette, J. (1996) "MEMS: Mega Promise for Micro Devices," *Mech. Eng.* 118, October, pp. 64–68.
- [34] Ouellette, J. (2003) "A New Wave of Microfluidic Devices," *Ind. Phys.* 9, no. 4, pp. 14–17.
- [35] Paula, G. (1996) "MEMS Sensors Branch Out," *Aerospace Am.* 34, September, pp. 26–32.
- [36] Pekola, J., Schoelkopf, R., and Ullom, J. (2004) "Cryogenics on a Chip," *Phys. Today* 57, May, pp. 41–47.
- [37] Robinson, E.Y., Helvajian, H., and Jansen, S.W. (1996a) "Small and Smaller: The World of MNT," *Aerospace Am.* 34, September, pp. 26–32.
- [38] Robinson, E.Y., Helvajian, H., and Jansen, S.W. (1996b) "Big Benefits from Tiny Technologies," *Aerospace Am.* 34, October, pp. 38–43.
- [39] Roco, M.C. (2001) "A Frontier for Engineering," *Mech. Eng.* 123, January, pp. 52–55.
- [40] Sharke, P. (2004) "Water, Paper, Glass," *Mech. Eng.* 126, May, pp. 30–32.
- [41] Sniegowski, J.J., and Garcia, E.J. (1996) "Surface Micromachined Gear Trains Driven by an On-Chip Electrostatic Microengine," *IEEE Electron Device Lett.* 17, July, p. 366.

-
- [42] Squires, T.M., and Quake, S.R. (2005) "Microfluidics: Fluid Physics at the Nanoliter Scale," *Rev. Mod. Phys.* 77, pp. 977–1026.
- [43] Stone, H.A., Stroock, A.D., and Ajdari, A. (2004) "Engineering Flows in Small Devices: Microfluidics Toward a Lab-on-a-Chip," *Annu. Rev. Fluid Mech.* 36, pp. 381–411.
- [44] Swift, J. (1726) *Gulliver's Travels*, 1840 reprinting of *Lemuel Gulliver's Travels into Several Remote Nations of the World*, Hayward & Moore, London, Great Britain.
- [45] Tang, W.C., and Lee, A.P. (2001) "Military Applications of Microsystems," *Ind. Phys.* 7, February, pp. 26–29.
- [46] Tien, N.C. (1997) "Silicon Micromachined Thermal Sensors and Actuators," *Microscale Thermophys. Eng.* 1, pp. 275–292.

第 2 章 MEMS 中的材料

Christian A. Zorman

Mehran Mehregany

Case Western Reserve University

2.1 简介

毋庸置疑，微机电系统（MEMS）领域是 20 世纪 90 年代发展最迅猛的技术领域之一。使用微机械工艺加工出来的机械和电学结构协同对环境进行感知和控制，这就是 MEMS。当然在 20 世纪 90 年代，MEMS 的迅速发展绝非偶然，因为它在工艺、设备和材料等诸多方面，都继承了 20 世纪 60 年代到 80 年代集成电路技术革命的成果。器件中每个材料的特性都影响着器件的性能，如果想要对 MEMS 有全面的了解，就必须对构成器件的材料进行深入的学习和掌握。通常，加工一个 MEMS 器件需要经过在衬底上生长结构层、牺牲层、掩膜层等多步工序，因此，与加工工序相关的刻蚀选择比、材料粘附性、微结构性质等就成为了设计过程必须考虑的因素。讨论 MEMS 中的材料实际上就是讨论 MEMS 中的材料系统，因为 MEMS 器件通常都由多种材料构成，而且每种材料都在其中发挥着不可替代的作用。本章不可能系统地介绍 MEMS 中使用到的所有材料，而是有重点地分类介绍 MEMS 中的主要材料，从而说明材料系统在 MEMS 中的重要性。

2.2 单晶硅

硅（Si）最早被用作微传感器可追溯到 1954 年，Smith 等人第一次在论文中描述了锗（Ge）和硅的压阻现象 [Smith, 1954]。实验表明，用这类材料做成的应变片，其应变范围比传统的金属应变片大 10~20 倍，这使得硅应变片在 20 世纪 50 年代后期得到了广泛的商业应用。从 20 世纪 60 年代到 20 世纪 70 年代初，硅衬底上的机械和化学微加工技术不断向微尺度发展，可以加工出任意结构的应变片，到了 20 世纪 70 年代中期，硅基压力传感器已经得到了大规模的商业化应用。然而，MEMS 的发展并不如集成电路（IC）技术那样为人所熟知，直至 20 世纪 80 年代，MEMS 和 IC 工艺的结合才真正意味着 MEMS 时代的来临，当然硅材料也成为 MEMS 的首选材料。

众所周知，硅是地球上含量最丰富的元素之一，也是目前使用最广泛的半导体材料，可以通过成熟工艺从砂石中提取出来，并加工成电子级纯度的单晶硅材料。目前常用的硅片面积已经很大（直径大于 8in），表面的缺陷密度也很低。

单晶硅的晶格为金刚石结构，它的电子禁带宽度为 1.1eV，同其他半导体材料一样，可以通过掺杂来改变其电导率。磷（P）是常用的 n 型杂质，而硼（B）为常用的 p 型杂质。