

微电子 机械系统

姜岩峰 编著

MEMS
MEMS



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

内容提要

本书主要讲述MEMS器件的制造工艺、封装技术、测试技术、应用等。全书共分五章。第一章介绍MEMS器件的概述；第二章介绍MEMS器件的制造工艺；第三章介绍MEMS器件的封装技术；第四章介绍MEMS器件的测试技术；第五章介绍MEMS器件的应用。本书可作为高等院校相关专业教材，也可供从事MEMS器件工作的工程技术人员参考。

微电子 机械系统

姜岩峰 编著

MEMS



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

北京·

内 容 提 要

本书介绍了微电子机械系统 (MEMS) 相关的基础知识、主要工艺和器件结构等方面内容, 对该领域的热点研究问题进行了探讨。主要内容分为五个部分, 首先讲述了 MEMS 的相关力学量测量方法, 然后介绍了 MEMS 中的主要工艺, 在此基础上, 系统介绍了 MEMS 系统中的传感器, 包括传感器的原理、结构和实现方法, 另外对 MEMS 器件的使用方法和应用范围进行了讨论, 最后阐述了 MEMS 系统仿真方面的内容。

本书适合于高等院校微电子专业本科生或研究生教学参考使用, 也可供从事 MEMS 领域研究的科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

微电子机械系统/姜岩峰编著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 1
ISBN 7-5025-8158-8

I. 微… II. 姜… III. 微电子技术-电子机械-机械系统 IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 000298 号

微电子机械系统

姜岩峰 编著

责任编辑: 刘 哲 宋 辉

责任校对: 周梦华

封面设计: 尹琳琳

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

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

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 310 千字

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8158-8

定 价: 28.00 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

前 言

微电子机械系统 (Microelectro-Mechanical System, 简称为 MEMS) 的出现, 极大地扩展了微电子领域的研究空间。从广义上讲, MEMS 是指集微型传感器、微型执行器以及信号处理和控制电路、接口电路、通信和电源于一体的完整系统。

MEMS 主要包含微型传感器、执行器和相应的处理电路三部分。作为输入信号的自然界的各种信息, 首先通过传感器转换成电信号, 经过信号处理以后, 再通过微执行器对外部世界发生作用。传感器可以把能量从一种形式转化为另一种形式, 从而将现实世界的信号 (如热、运动等信号) 转化为系统可以处理的信号 (如电信号)。执行器根据信号处理电路发出的指令完成人们所需要的操作。信号处理器则可以对信号进行转换、放大和计算等处理。

MEMS 构成了典型的交叉学科, 它涉及了微电子技术、机械技术、材料科学与技术、自动控制技术、生物技术、物理与化学等学科, 集合了各种学科的最新成果。同时, 很多宏观定律在微小范围内不再成立, MEMS 的发展带来了许多科学问题, 从而成为传统基础学科的研究前沿。

MEMS 结合了小型化、多元件和微电子技术的优点。小型化带来了重量轻、耗能低、惯性小、响应时间短等优点, 使从前不可能实现的系统成为可能; 多元件的集合使系统的性能大为提高; 而微电子技术则可以大批量制造, 从而实现高性能价格比的产品。因此, MEMS 是真正意义上的高科技。

目前, 全世界范围内兴起了研究 MEMS 的热潮, 国内相关高校和科研院所也做了很多工作, 作者在编写此书时, 借鉴和参考了大量公开发表的研究成果, 在这里向国内相关领域的各位老师和科研工作者表示感谢, 并希望各位专家能够对本书提出批评意见。

本书的主要内容分为五个部分, 首先讲述了 MEMS 的相关力学量测量方法, 使读者对力学量方面的知识有详细的了解, 然后介绍了 MEMS 中的主要工艺, 在此基础上, 系统介绍了 MEMS 系统中的传感器部分, 包括传感器的原理、结构和实现方法, 另外对 MEMS 器件的使用方法和应用范围进行了讨论, 最后阐述了 MEMS 系统仿真方面的内容。

本书的编写过程得到了电子科技大学 (成都) 谢孟贤先生、北方工业大学张晓波老师的大力帮助, 特此致谢。

由于编著者水平所限, 不妥之处在所难免, 恳请读者指正。

编者

2005 年 12 月

目 录

第 1 章 MEMS 系统简介	1
1.1 MEMS 技术现状及前景	1
1.1.1 MEMS 的基本概念与发展历史	1
1.1.2 MEMS 的应用	5
1.1.3 MEMS 技术和器件的研究进展	7
1.2 MEMS 器件及系统的研究进展	9
1.3 MEMS 技术的应用前景	12
第 2 章 微机电系统 (MEMS) 相关力学知识及测量力学量的方法	14
2.1 弹性力学基础知识	14
2.2 微结构机械参数测量方法	19
2.2.1 简介	19
2.2.2 在线监测薄膜机械参数的方法列举	20
2.2.3 微机械材料特性检测	22
参考文献	40
第 3 章 微机电系统 (MEMS) 主要工艺	43
3.1 体硅加工工艺	43
3.1.1 腐蚀工艺	44
3.1.2 湿法腐蚀	45
3.1.3 干法腐蚀	49
3.2 硅片键合工艺	51
3.2.1 简介	51
3.2.2 硅熔融键合 (SFB)	52
3.2.3 阳极键合	58
3.2.4 低温键合	64
3.2.5 键合工艺应用举例	65
3.3 LIGA 技术	70
3.3.1 LIGA 技术基本原理	70
3.3.2 活动结构制作原理	71
3.3.3 复杂的三维结构的制作原理	72
3.3.4 技术要求	73
3.3.5 LIGA 技术研究现状	74
3.3.6 准 LIGA 技术	75
3.3.7 LIGA 技术在工程中的应用	77
参考文献	80

第4章 传感器部分	82
4.1 传感器的分类、构成与发展动向	82
4.1.1 基本概念	82
4.1.2 传感器的分类	82
4.1.3 传感器的构成	83
4.2 传感器材料	84
4.2.1 传感器敏感材料	84
4.2.2 仿生材料	86
4.3 硅电容式微传感器	88
4.3.1 加速度微传感器	88
4.3.2 压力微传感器	91
4.4 静电激振法	92
4.4.1 工作原理	92
4.4.2 谐振式传感器	93
4.4.3 热激励谐振式传感器	94
4.4.4 光激谐振式传感器	95
4.4.5 静电激励谐振式传感器	97
4.5 声表面波传感器	99
4.5.1 SAW 传感器	100
4.5.2 声表面波器件内连技术	101
4.5.3 典型 SAW 传感器	104
4.6 薄膜传感器	107
4.6.1 薄膜	107
4.6.2 膜片	108
4.6.3 “扯带”试验	109
4.6.4 导热测试	109
4.6.5 金属薄膜电阻	113
4.6.6 薄膜磁阻元件	114
4.6.7 铁电薄膜元件	116
4.7 隧道传感器	118
4.7.1 隧道加速度计	119
4.7.2 微机械电子隧道红外探测器	120
4.7.3 微机械电子隧道磁强计	121
4.7.4 隧道传感器的发展方向	122
4.8 生物传感器	122
4.8.1 生物化学传感器	123
4.8.2 生物芯片	128
第5章 MEMS 器件的应用	130
5.1 用于通信领域的 MEMS 器件	130
5.1.1 RF MEMS 的概念	130
5.1.2 用于通信领域中的 MEMS 器件简介	131

5.2 用于生化医学领域的 MEMS 器件	135
5.2.1 医疗领域 MEMS 的发展趋势	135
5.2.2 生化领域 MEMS 的发展趋势	137
5.2.3 MEMS 气敏传感器	137
5.2.4 生物微机电系统	139
5.3 用于光通信领域的 MEMS 器件	143
5.3.1 MEMS 器件在光通信领域中的应用概述	143
5.3.2 光开关的工作原理	144
5.3.3 MEMS 光开关分类	147
5.4 用于惯性测量用的 MEMS 器件	149
5.4.1 加速度计	149
5.4.2 陀螺仪	155
5.5 几种 MEMS 微执行器	156
5.5.1 MEMS 微执行器简介	156
5.5.2 静电式微执行器	157
5.5.3 压电微执行器	159
5.5.4 磁致伸缩微执行器	161
5.5.5 电磁微执行器	162
5.5.6 形状记忆合金 (SMA) 微执行器	163
5.5.7 热执行器	164
5.5.8 电子流变式微执行器	165
参考文献	166
第 6 章 MEMS 器件的仿真和计算机辅助设计	167
6.1 概述	167
6.1.1 器件级仿真	168
6.1.2 加工及装配过程仿真	169
6.1.3 系统级仿真	170
6.1.4 相关技术展望	171
6.2 硅各向异性腐蚀工艺模拟	172
6.2.1 简介	172
6.2.2 硅各向异性腐蚀模型	173
6.2.3 硅各向异性腐蚀模拟软件	175
6.2.4 硅在 KOH 中各向异性腐蚀的物理模型	176
6.2.5 各向异性腐蚀表面粗糙度的“应力模型”	181
6.2.6 各向异性腐蚀模拟算法	186
6.2.7 各向异性腐蚀工艺模拟软件结构	191
参考文献	194

第 1 章

MEMS 系统简介

1.1 MEMS 技术现状及前景

1.1.1 MEMS 的基本概念与发展历史

硅已经在集成电路领域显示出巨大的魅力，并使人类跨入了信息社会，成了技术进步的动力，这主要得益于硅工艺的完美和杰出的电特性，正因为如此，世界上的主要工业化国家都对微电子技术进行了大量的投资，以求在该领域占有一席之地，这种竞争进一步促进了微电子技术的发展。

但是，微电子技术作为一种资源，并没有得到充分的利用，可以说目前仅利用了它的百分之几，是极大的浪费。因此，如何充分利用这一资源是极其重要的研究课题，半导体微机械加工技术就是拓宽微电子技术应用领域一个成功的例子，这一技术充分利用了极为丰富的微电子技术资源，用它替代传统的机械加工方法来实现各种机械结构，使得将传感器、执行器和处理器集成在同一芯片上制作出微电子机械系统（MEMS）成为可能，这在传统机械加工领域是不可想象的。因此自 1988 年用微电子技术制作出世界上第一个微马达以来，关于 MEMS 的研究越来越引起人们的兴趣。

事实上，硅不仅有良好的电特性，还是一种极好的机械材料，表 1-1 给出了有关材料的机械特性，从表中可以看出，硅有很好的弹性及机械强度，非常适合制作机械部件。目前利用微机械技术不仅制作出了各种传感器，而且还制作出了执行器、微机械光学元件及各种微机械构件，显示出硅作为机械材料应用具有极为广泛的前景。

各国对微电子机械系统（MEMS）有不同的称呼，在美国，用 Micro-Electro-Mechanical-Systems（缩写为 MEMS）表示，译为微电子机械系统或微机电系统。在欧洲，用 Microsystem Technology（缩写为 MST）表示，译为微系统技术。在日本，用 Micromachine 表示，译为微机械。

有关微机械系统的历史，可以追溯到 1959 年 12 月，美国物理学家、诺贝尔奖获得者 R. P. Feynman 在美国加州理工学院举行的美国物理协会年度会议上的科普演讲中，首次提出了 MEMS 概念。

表 1-1 几种材料的机械特性

物 质	屈服强度 /(10^9 N/m^2)	努氏硬度 /(kg/mm^2)	弹性模量 /(10^{11} N/m^2)	密度 /(g/cm^3)	热导率 /[$\text{W/(cm} \cdot ^\circ\text{C)}$]	线胀系数 /($\text{ppm}^\circ/\text{C}$)
金刚石	53	7000	10.35	3.5	20	1
碳化硅	21	2480	7	3.2	3.5	3.3
氮化硅	14	3486	3.85	3.1	0.19	0.8
铁	12.6	400	1.96	7.8	0.803	12
硅	7	850	1.9	2.3	1.57	2.33
钨	4	485	4.1	19.3	1.78	4.5
不锈钢	2.1	660	2	7.9	0.329	17.3
钼	2.1	275	3.43	10.3	1.38	5
铝	0.17	130	0.7	2.7	2.36	25

① $1\text{ppm}=10^{-6}$ ，全书同。

事实上，在 Feynman 演讲之前，科学家们已成功地研制出指甲盖大小的电机；然而，Feynman 认为，这些研究成果在小型化的道路上还很原始、粗糙，尚处于技术的初期阶段。他的结论是：“在这以后还有更加令人震惊的微小世界”，他设想可以将整个 24 卷大英百科全书写在针尖上，要做到这件事只需要将尺寸缩小 $1/25000$ 即可。Feynman 坚信存在微小化的可能性，因为在生物中有众多丰富的写信息微小化的例子。“对于生物学家来说，在一个极其微小的空间可以携带巨量信息是一个事实，我们要解决的问题是揭开在微小的细胞中一个复杂的生物体（就像我们自己的全部信息）是如何存储的。”人的细胞是活性的，能够完成各种物质的制造、移动和信息存储。基于这一点，他设想一种微小但可以活动的机器（就是人们现在所说的 MEMS），可以在量子尺度进行计算，排列单个原子，甚至有一天可以在人体内执行外科手术。历史证实了 Feynman 的远见卓识，纳米科技、MEMS 及量子计算和分子自组装等领域向人们展示了微小世界的巨大潜力。从量的角度看，微小本身是一个很含混的概念。

1987 年研制出的微型马达原理来自该演讲的思想，因此，人们普遍认为 MEMS 研究的时间起点为 1959 年。

1962 年 Tufte 等人报道了硅微压力传感器。它的特征是用硅膜、压敏电阻和体硅腐蚀。它是 MEMS 微传感器的起始点，同时也是 MEMS 体加工（bulk micromachining）的起始点。

1967 年，美国西屋研究实验室 Nathanson 等人报道了硅谐振栅晶体管。它的特征是用静电激励引起栅振动。它是 MEMS 微执行器的起始点。

1968 年，美国 Mallory 公司 Wallis 等人报道了硅/玻璃静电键合技术，该技术后来成为微传感器封装的主要技术之一。

1973 年，美国 IBM 的 Bassous 等人报道了硅微喷嘴。它是 MEMS 微结构的起点。

1979~1985 年，以集成传感器为主要对象的 MEMS 领域第一次成为热点。当时的主要背景为：①20 世纪 70 年代末期，IC（集成电路）的快速发展，使得对信号的处理、存储、计算等已经达到较高的性能价格比。很多系统的性能与价格的主要障碍不再是微处理器或存储器，而是与之有关的接口功能（主要是传感器）。②当时的传感器主要用石英、陶瓷薄膜等材料制作，存在均匀性、重复性、可靠性等问题，而且要单个校准与标定，价格高且性能

差。人们把当时的传感器形容为“真空管时代”。③将分离的元器件集成在一起形成的集成电路再次给人们启示，即将微传感器与电路结合形成集成传感器，同时采用业已成熟的 IC 产业基础设施。④硅材料成本低廉，加工技术先进且成熟，同时硅又有良好的机械特性，对多种非电信号敏感。因此，硅基集成传感器的研究成为主流。

20 世纪 80 年代中期，各种新型的 MEMS 加工技术出现，如：

a. 1985 年 U. C. Berkeley 以 R. T. Howe 为代表的多晶硅表面微机械加工技术；

b. 1985~1986 年，IBM 和东芝公司的硅片直接键合技术；

c. 1986 年，德国 Becker 等人实现 LIGA（光刻电铸成型）技术，以及由 LIGA 衍生出来的多种深刻蚀/电镀技术，使得非硅微机械加工和高深宽比的结构制备成为可能。

d. 1987 年，U. C. Berkeley、AT&T 等实验室研制出微型马达、微型齿轮、微型连杆机构。真正意义上的 MEMS 出现并开始了快速发展。

从系统的角度上讲，现在微机电系统（MEMS）是指在单片上包括有微传感器、微执行器、微结构、微机械和电路的一种系统。

MEMS 特征尺寸常指 $0.1\sim1000\mu\text{m}$ 大小范围。其各部分功能如下。

微传感器（Microsensor）是指把非电信号（如力、光、磁、温度、化学等）转换为电信号的微小型器件。例如，微压力传感器把压力转换为电信号。

微执行器（Microactuator）是指把电能（或光能、热能、磁能等）转换为机械动作的微小型器件。例如，微静电马达把电能转换成旋转的机械动作。

微结构（Microstructure）是在单片上的微小结构。例如微型管道。

微机械（Micromachine）是在单片上的微小机械。例如微齿轮、微连杆等。

电路（Circuit）包括了有源器件和无源器件（如电阻、电容、电感等），能实现某种功能（如信号处理、存储等）。这里指集成电路。

MEMS 将电子系统和外部世界有机地联系起来，它不仅可以感受运动、光、声、热、磁等自然界信号，并将这些信号转换成电子系统可以识别的电信号，而且还可以通过电子系统控制这些信号，进而发出指令，控制执行部件完成所需要的操作。从广义上讲，MEMS 是指集微型传感器、微型执行器以及信号处理和电路、接口电路、通信和电源于一体的完整微电子机械系统。

MEMS 主要包含微型传感器、执行器和相应的处理电路 3 部分，图 1-1 给出了典型的 MEMS 系统与外部对象相互作用的示意图。作为输入信号的各种信息首先通过传感器转换成电信号，经过信号处理（模拟/数字）以后，再通过微执行器对外部世界发生作用。

传感器可以把能量从一种形式转化为另一种形式，从而将现实世界的信号（如热、运动等信号）转化为系统可以处理的信号（如电信号）。执行器根据信号处理电路发出的指令完成人们所需要的操作。信号处理器则可以对信号进行转换、放大和计算等处理。

MEMS 是典型的交叉学科，它涉及微电子技术、机械技术、材料科学与技术、自动控制技术、生物技术、物理与化学等学科，集合了各种学科的最新成果。同时，很多宏观定律在微小范围内不再成立，MEMS 的发展带来了许多科学问题，从而成为传统基础学科的研究

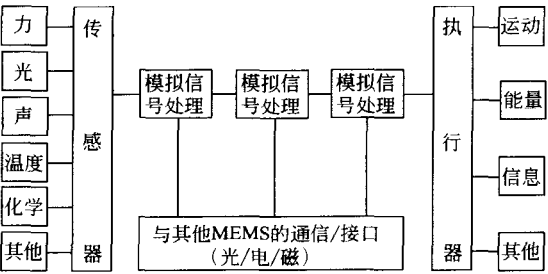


图 1-1 典型的 MEMS 与外部对象相互作用示意图

究前沿。

MEMS 结合了小型化、多元件和微电子技术的优点。小型化带来了重量轻、耗能低、惯性小、响应时间短等优点,使从前不可能实现的系统成为可能;多元件的集合使系统的性能大为提高;而微电子技术则可以大批量制造,从而实现高性能价格比的产品。因此, MEMS 是真正意义上的高科技。

MEMS 的高性能价格比对改造或改进军事装备和传统行业(如汽车工业、仪器仪表行业、医疗、信息技术、生物技术、航空航天技术、自动控制、环境监控等)起关键作用。发展 MEMS,本身就可以形成产业。因此, MEMS 研究可以促进相关行业的技术进步,对我国国防能力提高、经济发展有重大意义。

同时 MEMS 又是一种技术能力,它可以使以前不可能实现的系统成为可能。这一点比 MEMS 本身更重要。例如,扫描隧道显微镜中微加工尖,批量生产时成本只有几美元,然而它却是价值 10 万美元显微系统的关键部件;又例如,用在汽车安全气囊的微加速度仪仅值 5 美元,但它却使价值 200 美元的安全气囊系统成为可能。这一点, MEMS 可以和 IC 技术相比较, IC 中的微处理器使计算机发生了革命。

MEMS 是受集成电路工艺的启发发展起来的,它具有集成电路系统的许多优点,同时又集约了多种学科发展的尖端成果。MEMS 具有以下特点。

① 微型化。MEMS 器件体积小、重量轻、耗能低、惯性小、谐振频率高、响应时间短。

② 以硅为主要材料,机械电气性能优良。硅材料的强度、硬度和弹性模量与铁相当,密度类似铝,热传导率接近钨和钨。

③ 可批量生产。用硅微加工工艺在一片硅片上可以同时制造成百上千个微机械部件或完整的 MEMS,批量生产可以大大降低生产成本。

④ 集成化。可以把不同功能、不同敏感方向和致动方向的多个传感器或执行器集成于一体,形成微传感器阵列或微执行器阵列,甚至可以把多种器件集成在一起以形成更为复杂的微系统。微传感器、微执行器和 IC 集成在一起可以制造出高可靠性和高稳定性的 MEMS。

⑤ 多学科交叉。MEMS 的制造涉及电子、机械、材料、信息与自动控制、物理、化学和生物等多种学科,同时 MEMS 也为上述学科的进一步研究和发展提供了有力的工具。

贝尔实验室在 20 世纪 50 年代初发现了硅和锗的压阻效应,从而导致了硅基 MEMS 传感器的诞生和发展。在随后的几十年里, MEMS 得到飞速发展。1982 年, Petersen 在 Proc. IEEE Electron Devices 上发表了题为“Silicon as a mechanical materials”的文章,这篇文章总结了硅在微电子机械中的应用情况,概括了代表当时 MEMS 最高水平的微加工技术和微机械器件,被看作是 MEMS 研究进入系统化阶段的里程碑。目前 MEMS 的研究主要集中在微机械加工技术以及新型 MEMS 器件和系统的设计、制作方面,同时为了适应未来 MEMS 的发展,人们也对微观、宏观下的一些基本理论进行了研究。

所有的主要工业化国家都已认识到微电子机械系统技术的重要性。日本、德国、美国已经实施了许多 MEMS 项目,不过这些国家各自的目标相差甚远。1991 年,世界范围内大约有 300 多企业和研究所积极进行 MEMS 项目。到 1998,有超过 8000 家公司参与 MEMS 产品的研究和制造,另有 11000 家计划在接下来几年开始研制。大多数 MEMS 项目(从企业和研究单位数量上考虑)在美国,其次在日本和德国。世界范围内 MEMS 产品以及基于

MEMS 技术的产品正在迅速增长, 预计到 2002 年, 美国、欧洲、日本之间市场份额分配预计大约为 40 : 35 : 25, 全世界 MEMS 的市场将达到 120 亿~140 亿美元, 而与之相关的市场将达到 1000 亿美元。

1.1.2 MEMS 的应用

人们不仅要开发制造 MEMS 的各种技术, 更重要的是如何将制成的 MEMS 器件应用于实际系统中, 并从中受益。目前可以预见的应用领域包括汽车、航空航天、信息通信、生物化学、医疗、自动控制、消费品及国防等, 下面仅就其中一些应用加以介绍。

(1) 医疗技术 目前, 医疗领域是 MEMS 的可供选择的最佳应用对象。由于新型且经常是非寻常的基于 MEMS 方法的理论和方法的不断发展, 很多传统的医疗学部分正在经历一场巨大的变化, 例如, 微伤害治疗法是一个基于 MEMS 发展的新方法, 它用很小的切口甚至是自然孔通向病灶。为了实施这一治疗, 正在研制多种方法, 从提高现有设备到活动内窥镜, 乃至设计微机器人。而微机器人能测量、监测和手术, 这将使相对较大的伤口外科手术在以后可望得到改善。再如, 内窥镜方法极有希望用于微伤害手术, 内窥镜给医学带来的巨大发展与变化是其他医疗设备所无法比拟的, 它可以把一个带有冷光源和摄像机(内窥镜)的纤维电缆插入到人体自然腔或小切口内, 使手术医生可以看见手术环境, 如有可能, 可以切出微小切口, 使其他一些微型化的设备, 如钳子、针、吊钩、手术刀、吮吸器等插入, 因而 MEMS 将使在一台现行的内窥镜上集成多种用途手术设备成为可能。

(2) 环境与生物技术 化学物质的分析是环境技术的一个重要方面。其目的是为了防止污染的产生与排放, 并且迅速准确地检测环境中的污染, 使得污染的排放量达到最小。只有通过连续、实时的分析才能解决目前的环境问题, 这也是惟一能及时避免损害的方法; 同时, 还希望这种分析技术能降低危险过程的风险以及对环境的影响。一个能够完成上述要求的分析系统必须集成很多功能, 如提取样本、参数测量、信号处理、数据输出和后续控制。在这一系列功能中, 最薄弱的环节是决定着整个系统可靠性的测量部分, 它包括多种化学微传感器和微探针。同样, 对环境中毒素和污染大表面的扩散效应的模拟和测试对环境技术有重大的意义。然而, 只有研制出廉价的分析仪器, 才可能实现。这里, 用非常小的样本进行分析很重要, 这是由于所分析的物质往往量不充裕、昂贵或有毒。为了采集样本, 经常把微泵集成到微传感器之上, 这样, 测量位置的微量样本可以用微泵以精确的量进行传输。在生物技术中, 需要一些专门的微工具在显微镜下完成像装卸、夹持、运输、分离、切片和注入等微操作, 在许多生物技术领域, 如基因研究和育种, 这些工具对细胞微操作是很重要的。由于细胞是危险物质存在的一个良好指示剂, 因此这些显微镜下的操作也可用到环境检测。由于人手太粗糙, 因此实现这些微操作部分或全部自动化非常必要。装备有精巧工具的多种静态微操作系统和可移动的机器人已在研制中。

(3) 汽车技术 世界上每年大约生产 3500 万台汽车, 在这些汽车上配备的复杂控制和安全系统日益增多。用户对汽车舒服性和安全性的高要求促使在汽车上安装的电子设备越来越多, 如 BMW700 装有 73 个电子发动机, 50 个继电器, 1567 个开关接头和 25 套控制设备。反阻塞系统、自动平稳控制、功率调整、发动机功效管理、空调、中心锁紧系统, 诊断系统等都用电气控制。不久司机就可以想像自己在驾驶的不是一个汽车而是一块巨大的芯片。目前, 汽车总重的 10% 由电子电气部件组成, 汽车总成本的 15% 是电子电气部件, 这

意味着电气设备必须进一步小型化，实际上就是要用 MEMS。

传感器构件的迅速微小型化对于未来汽车工业尤为重要。20 世纪 70 年代，汽车上没有安装传感器，而今日依据制造与车型要安装 20~80 个。随着人们对舒适和安全性的要求提高，这种趋势还将上升。另外值得考虑的事实是，关于禁止超过一定限度气体排放量和燃料消耗汽车的讨论。目前，已经研制出监视发动机、控制气体排放、监视刹车功能的传感器，不久会有更多由传感器维护的任务。

汽车控制完全网络化是最终目标。数据网络将使得车辆数据显示更加紧凑，并把未来交通信息系统以无线电接口形式提供给司机。控制气囊的微传感器（加速度传感器）目前有很大的市场需求，在不久的将来，这个需求将更加广大，高级气囊控制系统虽然已经在汽车工业中存在着很长时间，但采用硅基批量加工方法和 LIGA 技术所制造的微加速度计的价格预计将低于 10 美元，同时避免大量使用机械电子开关。硅碰撞传感器批量生产首先由美国开始研制，现在欧洲同样也能生产。典型测量二维加速度的微系统，有两个电容加速度传感器，X、Y 方向上各一个。这些传感器用镍通过 LIGA 制造而成。一种带有附加传感器能测量 Z 方向加速度的三维加速度传感器也开始被研制。

微型的角速度传感器也将有成功的前景，它是人工导航和控制系统的的基本组成部分。整个美国加速度计和角加速度计市场预计将从 1995 年的 1700 万美元增加到 2000 年的 11400 万美元。像 Motorola 和 Analog Device 这样的公司，计划到 1998 年使微机械式的陀螺仪成为汽车的标准装置。很多大型汽车制造商已经开始在他们的汽车上安装多种硅微压力传感器用以优化燃料消耗。这些公司还计划安装测量燃料油、空气和发动机与变速装置的液压系统压力的微传感器。由于这些传感器将会开辟重要的市场，因此很多汽车供应商已经开始这一领域的研究活动。

开发者们预计有一天，装备有传感器的微型诊断系统，以自动行走或遥控方式在燃料管路中寻找泄漏，而另一些系统通过直接测量燃烧室的工作参数优化低污染发动机的燃烧过程。装在汽车前后保险杠的位置传感器不仅能帮助停车（这些已在大型豪华轿车安装），而且同样有助于汽车避免身体出现压痕。安装上微传感器阵列而不是单个传统的传感器，能避免少数传感器失效而引起严重后果。

（4）制造与测量 传统的扫描电子显微镜（SEM）和激光扫描显微镜（物体由直径为 $1\mu\text{m}$ 的光束扫描），以及新兴的扫描探针显微镜（SPM）的相继出现，使物体表面质量控制发生了重大进展。扫描探针显微镜使人们的观察达到亚纳米范围的微小物质结构。而传统的光学显微镜往往显得无能为力，它不能检测到晶体的原子缺陷和集成电路中的缺陷。这些缺陷的结构典型的尺寸只有几个纳米。扫描探针显微镜有特别高的分辨率，到目前为止还达不到上述尺寸，但能够下降到原子级。这种技术对研究局部缺陷情况打开新的途径。SPM 设备可以当作原子力显微镜或扫描隧道显微镜使用。其测量是非破坏性的，而且可以实现尺寸从微米到纳米任何表面结构的非接触式测量，公差为纳米级。这促使人们对材料和表面物理与化学性能的认识进一步深化，最终将提高微构件的质量。SPM 有着十分高的分辨率，大约为 0.3nm ，甚至能操纵单个原子。

为了在纳米世界内工作，需要有长度仅为几个微米的微机械探针。这些探针能在距离表面 1nm 左右扫描微构件表面。STM 测量原理是量子力学中所谓的隧道效应。当两个导电介质之间加一定电压时，就会发生隧道效应；介质表面之间由绝缘体或真空相互隔离开来，扫描探针尖（附着一个三维的压电转换器）和扫描表面之间的隧道电流可以被测量出来。要

使隧道电流保持恒定，就必须使测量间距为常数，它是通过给压电转换机构通以保持测量针尖位置所需的电流完成的。由此，每一个压电转换机构的位移对应一个表面结构的指示值。

扫描力显微镜（SFM）利用了探针头和在微构件表面上原子之间的吸引力。SFM 设备的探针不是固定在压电转换器上，而是紧固到一个微小的、弹性常数很小的悬臂梁上，使悬臂梁振动并引导它从结构表面上划过。最终，原子吸引力导致悬臂力发生偏转。偏移量直接用压阻或压电力传感器测量，也可间接运用电容式或光学测量方法。

MEMS 在生产技术中还有其他一些可以想象到的用途。在工业生产中，用传感器引导的装配工具和低振动的加工机械需要很高精度。如磨削设备，往往在工件和刀具之间会产生振动，明显降低磨削设备的性能，可能会引起工件表面高度差为几个微米的褶皱。为了解决这个问题，可用微驱动降低振动。

MEMS 的许多潜在的用途，几乎能够应用到人类生活的方方面面。例如，用户电子产品和计算技术提供给 MEMS 很多用途。打印机喷墨头和磁盘驱动头是仅仅几个已经大规模生产的微构件较好的例子。目前研究的微机器人的整个领域将可能在医药、精密制造、测量、生物技术和其他许多领域得到应用。

随着微/纳米技术的不断发展，以本身形状尺寸微小或操作尺度极小为特征的微机械已成为人们在微观领域认识和改造客观世界的一种高新技术。微机械由于具有能够在狭小空间内进行作业，而又不扰乱工作环境和对象的特点，在航空航天、精密仪器、生物医学等领域有着广阔的应用潜力，且是实现纳米技术（Nanotechnology）的重要环节，因而受到人们的高度重视，被列为 21 世纪关键技术之首。

1.1.3 MEMS 技术和器件的研究进展

完整的 MEMS 是由微传感器、微执行器、信号处理和控制电路、通信接口和电源等部件组成的一体化的微型器件系统。其目标是把信息的获取、处理和执行集成在一起，组成具有多功能的微型系统，完成大尺寸机电系统所不能完成的任务，也可以嵌入大尺寸系统中，从而大幅度地提高系统的自动化、智能化和可靠性水平。正如集成电路技术把我们带入信息时代一样，很多科学家都认为，MEMS 会给人类社会带来另一次技术革命，它将对 21 世纪的科学技术、生产方式和人类生活质量产生深远影响，因而被认为是关系到国家科技发展、国防安全和经济繁荣的关键技术。

在器件设计方面相应地发展了一些设计工具，如 MEMSCAD、Intel lisense、Memscap/Mentor 等。目前正在开发的多场耦合的 CAD 系统，其仿真必须打破专业不同所造成的阻隔，希望实现流体-热-电-机-光-磁-化学-铁电等的整体设计。从制造技术上看，目前制作 MEMS 主要是基于对硅、玻璃等材料的二维和三维加工，包括 LIGA、各向异性腐蚀、等离子体刻蚀、自停止腐蚀，表面微机械加工、摩擦控制等。现在对微管路、微腔室、微阀、微泵等微部件内部的表面改性或化学修饰又提出了更新或更高的要求。

就实现硅基 MEMS 而言，现在几乎所有的表面加工元件都是使用 3 层或少于 3 层的构造材料设计并制造的。通常，设计人员可以利用的结构材料层数越多，可能制成的器件的复杂性也就越高。目前 5 层多晶硅表面微加工工艺可以制造更为可靠、能够完成更为复杂作业的微机电系统。此项技术首先在美国能源部所属桑迪亚（Sandia）国家实验室实现，可望成为工业界的新标准，并将取代现在普遍采用的 2 层或 3 层多晶硅表面微细加工技术。5 层工

艺可以制成 4 层结构薄膜和一层导电层。采用该工艺可以制成复杂的多层 MEMS 系统。该工艺技术扩展了当前制造技术的能力,使得在运动的平台上,可以制造出具有相互作用机制的复杂系统。为了实现这一目标,仍然存在一些需要克服的困难。最严重的是如何减少表面的缺陷。随着层数的增加,表面出现的纹理也越多。因为在最高的层次上反映出了所有以下各层次上的缺陷,包括突起的和陷入的斑点。于是产生了称为“寄生机械构造”的“突出缺陷”,它从上一结构层伸入下面的区域,并对机构的正常运动产生影响。为了克服上述困难,采用经过改进的化学机械抛光工艺来平整表面。

MEMS 的制作主要基于两大技术:IC 技术和微机械加工技术,其中 IC 技术主要用于制作 MEMS 中的信号处理和控制系统,与传统的 IC 工艺没有太大区别。微机械加工技术是在 IC 工艺的基础上发展起来的,主要包括体微机械加工技术、表面微机械加工技术、LIGA 技术、准 LIGA 技术和微机械组装技术等。

以硅为基础的微机械加工工艺也分为多种,传统上往往将其归纳为两大类,即体硅加工(bulk micro-machining)工艺和表面硅加工(surface micro-machining)工艺。由于当前硅微机械加工工艺的飞速发展,不断有新的工艺方法出现,许多工艺方法可以同时用于体加工和平面加工,有些方法则兼具体加工和表面加工两者的特点,很难给予确切分类,因此我们不采用这种分类方法。

在以硅为基础的 MEMS 加工技术中,最关键的加工工艺主要包括高宽比的各向异性腐蚀技术、键合技术和表面牺牲层技术等。

(1) 各向异性腐蚀技术 各向异性腐蚀技术是体微机械加工的关键技术。湿法化学腐蚀是最早用于微机械结构制造的加工方法。常用的进行硅各向异性腐蚀的腐蚀液主要有 EPW 和 KOH 等。湿法化学腐蚀得到的微机械结构的厚度可以达到整个硅片的厚度,具有较高的机械灵敏度,但该方法与集成电路工艺不兼容,难以与集成电路进行集成,且存在难以准确控制横向尺寸精度及器件尺寸较大等缺点。为了克服湿法化学腐蚀的缺点,采用干法等离子体刻蚀技术已经成为微机械加工技术的主流。随着集成电路工艺的发展,干法刻蚀高深宽比的硅槽已不再是难题。例如采用 ICP(感应耦合等离子体)、高密度等离子体刻蚀设备等都可以得到比较理想的高宽比的硅槽。

(2) 键合技术 键合是指不利用任何黏合剂,只是通过化学键和物理作用将硅片与硅片、硅片玻璃或其他材料紧密地结合起来的方法。键合虽然不是微机械结构加工的直接手段,却在微机械加工中有着重要的地位。它往往与其他手段结合使用,既可以对微结构进行支撑和保护,又可以实现机械结构之间或机械结构与集成电路之间的电学连接。在 MEMS 工艺中,最常用的是硅/硅直接键合和硅/玻璃静电键合技术,最近又发展了多种新的键合技术,如硅化物键合、有机物键合等。

(3) 表面牺牲层技术 牺牲层工艺是表面微机械技术的主要工艺,其基本思路为:首先在衬底上淀积牺牲层材料,并利用光刻,刻蚀形成一定的图形,然后淀积作为机械结构的材料并光刻出所需要的图形,最后再将支撑结构层的牺牲层材料腐蚀掉。这样就形成了悬浮的可动的微机械结构部件。常用的结构材料有多晶硅、单晶硅、氮化硅、氧化硅和金属等,常用的牺牲层材料主要有氧化硅、多晶硅、光刻胶等。

表面微机械技术利用 IC 工艺(如氧化、扩散、光刻、薄膜淀积等)和一些专门技术(如牺牲层技术等),其典型加工厚度为几微米,优点是 IC 工艺兼容性好,特别适合于集成电路集成,是现在应用较广泛的微机械加工技术,如目前的数字处理电路电容式压力传感

器、电容式加速度计和最早的可移动微机械部件等就是利用这种工艺加工的，表面微机械技术的主要缺点是纵向尺寸小。

这里值得一提的是 SOI 晶片和外延层技术，这两类技术与体微机械加工技术和表面微机械技术相结合，有可能成为 MEMS 加工的一种主要技术。它们既可以弥补体微机械加工技术工艺可靠性和重复性较差的缺点，同时 SOI 晶片中的二氧化硅夹层能用于微机械传感器中电路部分与待测环境的隔离，是用于微传感器制作的理想晶片。对于表面微机械技术，它们也能够克服表面微机械技术纵向尺寸太小、无法满足高深宽比的缺点，并将表面微机械加工技术的纵向加工能力推进到了十微米量级，从而扩大了表面微机械技术的应用范围。

LIGA 技术是德文 Lithograph Galvanformung und Abformug 的简称，它主要利用 X 射线深层曝光、电铸、成型等技术进行微机械加工。LIGA 技术是采用深度 X 射线光刻、微电铸成型和塑料铸模等技术相结合的一种综合性加工技术，它是进行非硅材料三维立体微细加工的首选工艺。LIGA 技术制作各种微图形的过程主要由两步关键工艺组成，即首先利用同步辐射 X 射线光刻技术光刻出所要求的图形，然后利用电铸方法制作出与光刻胶图形相反的金属模具，再利用微塑铸制备微结构。LIGA 技术补偿了表面微机械技术的不足，为 MEMS 技术提供了一种新的加工手段。利用 LIGA 技术可以制造出由各种金属、塑料和陶瓷零件组成的三维微机电系统，并且得到的器件结构具有深宽比大、结构精细、侧壁陡峭、表面光滑等特点，这些都是其他微加工工艺很难达到的。LIGA 技术可以制造高深宽比的结构，宽度可小到 $1\mu\text{m}$ ，深度可达数百微米，甚至毫米级，非常适合于制作复杂的微机械结构，但是 LIGA 技术所需的工艺设备比较昂贵，而且与 IC 工艺不完全兼容，不能有效利用 IC 工业现有的设备和加工能力，因此产品成本高，短时期内难以形成产业化。

准 LIGA 技术是改进的 LIGA 技术，采用传统的深紫外线曝光、厚光刻胶作掩膜和电铸技术，加工厚度为数微米至数十微米，且与 IC 工艺兼容性好。在集成电路部分制作之后，准 LIGA 技术还能够用来制作后续的微机械系统，是一种很有发展前途的 MEMS 制作技术，因而越来越引起人们的兴趣。

微机械组装技术也被称为二次集成技术，它是将零部件、单元和连接件等通过搬运、融合、固化、胶合、密封等工艺组合成的复杂的微电子机械系统。常用的搬运方法有两种：①利用玻璃针尖以真空吸附和吹气的方式进行组装；②利用微夹钳以夹持和安放的方式进行组装。封装中需用的融合、固化、胶合、密封等技术都是微电子封装技术在 MEMS 领域的拓展。微机械组装技术在 MEMS 技术中处于一种非常尴尬的境界，它始终是 MEMS 制作过程的瓶颈，然而，无论微机械集成制造技术多么先进，微机组装技术始终是 MEMS 制作技术的必要补充，是完成更复杂的 MEMS 系统的必需途径。

在未来的 MEMS 制作技术中，MEMS 技术同 IC 技术的结合将更加紧密，这除了需用 IC 工艺来制造 MEMS 的电路部分的技术之外，更主要的是可以利用 IC 的大量昂贵设备来降低 MEMS 的开发和生产成本。

1.2 MEMS 器件及系统的研究进展

目前，MEMS 正处于蓬勃发展的时期，不断有新的器件和原理见诸报道，特别是一些 MEMS 的初级产品（如硅压力传感器、硅微机械加速度传感器等）已逐渐进入产业化，因而更增加了人们对 MEMS 的研究信心。

(1) 微马达 微马达是 MEMS 的一种重要动力源, 它的作用是把电信号转换成机械运动, 是 MEMS 研究中最活跃的分支之一。从微马达驱动机理方面看, 微马达可以分为静电马达、电磁马达和压电马达 3 种。

静电马达是最早提出的微马达, 1988 年 7 月, 美国加州大学制成了第一台厚度为 $1\sim 1.5\mu\text{m}$, 直径 $100\mu\text{m}$ 的静电微马达。1993 年以来, 我国清华大学和上海微系统与信息技术研究所分别研制出了静电微马达, 清华大学研制的静电微马达转子直径为 $120\mu\text{m}$, 转速 1200r/min , 上海微系统与信息技术研究所研制的静电微马达直径 $100\mu\text{m}$, 转速 $0.001\sim 10\text{r/min}$ 。静电微马达的转子和定子可以在同一平面内制造, 由于微马达与集成电路的兼容性较好, 可以进行批量生产, 因而成本较低。缺点是驱动力矩小, 但是由于单位质量的静电力与马达尺寸成反比, 因此, 尺寸愈小, 静电的作用力愈大。随着微马达尺度的进一步缩小, 静电微马达将具有更大优势。

电磁型微马达的优点是驱动力矩大, 可作为微型机器人和微型飞机的动力源, 缺点是需要用到 LIGA 或准 LIGA 技术, 加工难度较大。电磁型微马达和静电微马达的不同之处还在于随着体积缩小, 电磁能转换过程的体积效应得不到充分利用, 从而将造成电磁型微马达的驱动转换效率降低。美国 Wisconsin 大学的 Guckel 等人和 Georgia 理工学院、德国 IMM 公司、日本东芝公司都已分别研制出自己的电磁微马达, 其中东芝公司的电磁型微马达直径为 0.8mm , 质量仅 4mg , 转速在 $60\sim 1000\text{r/min}$ 。我国上海交通大学也研制出了直径 2mm 、速度可调、转向可逆的电磁型微马达。

压电马达分为行波型和驻波型, 它们的共同优点是结构简单, 能够实现低速运转, 成本低且无噪声。1993 年 Racine 等人报道了混合结构的压电微型马达 (定子采用微机械加工, 转子采用手工加工)。1997 年, 瑞士 Dellmann 等人报道了采用微机械电铸工艺制作压电马达转子的结果, 体现了当时微机械压电马达研究的最新进展。中科院上海微系统与信息技术研究所等单位也开展了微型压电马达的研究工作, 并于 1998 年报道了微机械压电行波马达的研究结果, 该电压行波马达的定子和转子分别采用微机械加工工艺, 通过微组装技术得到完整的一个微机械压电马达。马达定子、转子的尺寸均为 2mm , 在小于 10V 的交流信号激励下, 马达转速可达 50r/min 。

(2) 微压力传感器 微机械压力传感器是最早开始研制的微机械产品, 也是微机械技术中最成熟、最早开始产业化的产品。从信号检测方式来看, 微压力传感器可分为压阻式和电容式两类, 分别以体微机械加工技术和牺牲层技术为主要制造技术; 从敏感膜结构来看, 微压力传感器可分为圆形、方形、矩形、E 形等多种结构。1995 年, 微机械压力传感器已经占有 10 亿美元的市场份额, 预计在 2005 年, 这一数字将增加到 25 亿美元。

目前微机械压力传感器的主要发展方向为: 一是扩展其在汽车、工业测量控制、医疗仪器等方面的应用, 加速产业化进程; 二是将压敏器件与信号处理、校准、补偿、微控制单元进行单片集成, 以形成智能化的压力传感器。这一方面, Motorola 公司的 Yoshii Y 等人在 Transducer'97 上报道的单片集成智能压力传感器堪称典范。这种传感器在一个 SOI 晶片上集成了压阻式压力传感器、温度传感器、用于信号调整的 CMOS 模拟电路、电压、电流调制器、8 位 MCU 内核 (68H05)、10 位模数转换器 (A/D)、8 位数模转换器 (D/A)、2K 字节 EPROM、128 字节 RAM、启动系统 (Boot) ROM 和用于数据通信的外围电路接口等多种功能单元, 其输出特性可以由 MCU 进行软件校准和补偿, 这种器件在相当宽的范围内容具有极高的精度和良好的线性。