

光机电一体化丛书

微机电系统设计与制造

莫锦秋 梁庆华 汪国宝 王石刚 编著

化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心
· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

微机电系统设计与制造/莫锦秋,梁庆华,汪国宝,
王石刚编著. —北京:化学工业出版社, 2004. 3
(光机电一体化丛书)
ISBN 7-5025-5237-5

I. 微… II. ①莫…②梁…③汪…④王… III. 微
机电 IV. ①TM38②TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 016820 号

光机电一体化丛书

微机电系统设计与制造

莫锦秋 梁庆华 汪国宝 王石刚 编著

责任编辑:任文斗

文字编辑:王金生

责任校对:蒋宇

封面设计:蒋艳君

*

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)

发行电话:(010) 64982530

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

*

新华书店北京发行所经销

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 11 $\frac{3}{4}$ 字数 283 千字

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5237-5/TH·186

定 价: 30.00 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

微机电系统 (MEMS, 即 Micro Electro Mechanical System) 是一门新兴的交叉科学, 与微电子学、信息学、材料科学和纳米技术的发展等密切相关。被公认为 21 世纪的重点发展学科, 受到极大重视, 是国家重点发展的高技术产业, 发展前景看好。

微机电系统是微电子技术的拓宽和延伸, 通过传感器、致动器、信号处理、控制等多项功能, 与外部世界有机地联系起来。微机电不仅可以感受运动、光、声、热、磁等自然界信号, 并将这些信号转换成微电子系统可以认识的电信号, 而且还可以通过微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。微机电系统将微电子技术和精密机械加工技术相互融合, 实现了微电子与机械融为一体的系统, 不仅可以降低机电系统的成本, 而且还可以完成许多大尺寸机电系统无法完成的任务。微机电系统将信息获取、处理和执行融为一体, 集中了微米尺度的机械、电子、光学元器件和各种传感器, 派生出多种新原理、新器件和新系统, 将进一步促进产品的微型化和智能化, 在空间、信息、汽车、工业控制、通信、大容量数据存储、光信息处理、仪表仪器和国防等领域有广泛用途。

本书主要从普及的角度介绍微机电系统及其相关技术, 全书共分为 12 章, 分别对微机电系统的定义、起源及研究现状、制造技术、系统构成、设计技术进行了深入浅出、通俗易懂的介绍。本书的特点是信息量大、系统全面, 包含了微机电系统制造过程中微机械加工、微封装、微检测各个环节; 微机电系统构成中的各种微传感器、微执行器、微构件、微系统的工作机理; 先进的微机电系统设计技术以及计算机辅助技术; 多种设计手段和实用软件。

本书可供希望了解或采用微型机电系统的工程技术人员阅读, 也可作为机械工程类学生学习专业选修课时的教学参考书。

本书的第 1、6、7、8、9 章由莫锦秋编写, 第 2、3、4 章由汪国宝编写, 第 5、10 章由王石刚编写, 第 11、12 章由梁庆华编写, 全书由莫锦秋统稿。在本书的编写过程中, 林焯、孙小文、顾华平、程志国、王颖峰、姜文华、王高中等同学给予了大力的支持和协助, 中科院微系统所车录锋老师给予了不少指教, 在此表示谢意。

由于我们水平有限, 且时间仓促, 难免的错误和不妥之处, 敬请批评指正。

编者

2004 年 1 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 微机电系统简介	1
1.2 微机电系统的起源	3
1.3 微机电系统的发展现状	4
1.3.1 国外的发展现状	4
1.3.2 国内的发展现状	5
第 2 章 微机电系统材料	8
2.1 硅材料	8
2.2 压电材料	10
2.3 形状记忆合金	10
2.4 超磁致伸缩材料	12
2.5 凝胶	13
2.6 电流变体	13
第 3 章 微机械加工技术	14
3.1 传统超精密与特种加工技术	14
3.1.1 超精密机械加工	14
3.1.2 微细电火花加工	15
3.1.3 高能束微机械加工技术	15
3.2 微机电系统常用的集成电路工艺	17
3.2.1 薄膜成形	17
3.2.2 掺杂技术	19
3.2.3 光刻技术	20
3.3 硅微机械加工技术	22
3.3.1 体微加工技术	22
3.3.2 表面微加工	27
3.3.3 键合技术	28
3.4 光刻电铸模造工艺	30
3.5 微机械加工实例	32
第 4 章 微封装	35
4.1 封装技术	36
4.1.1 晶片级封装	36
4.1.2 单芯片封装	37
4.1.3 多芯片与微系统封装	39
4.1.4 表面微加工法用于封装	39
4.2 三维堆装	40

4.3	未来微机电系统封装发展趋势和方向	40
第5章	微检测技术	41
5.1	微结构的材料特性检测技术	41
5.1.1	弹性模量的测定	41
5.1.2	微结构材料应力的检测	42
5.1.3	微结构材料热物性参数的检测	48
5.2	微机电系统构件的几何量检测	50
5.2.1	光学法测量几何尺寸	50
5.2.2	扫描隧道显微测量技术	54
5.2.3	薄膜构件的膜厚测量	55
5.3	微系统的性能检测	56
5.3.1	结构动态参数的识别	56
5.3.2	微执行器运动的检测	57
5.3.3	动态微结构的视觉检测法	58
第6章	微传感器	61
6.1	物理传感器	61
6.1.1	微型力学量传感器	61
6.1.2	微型光学量传感器	69
6.1.3	微型热学量传感器	70
6.1.4	微型声学量传感器	71
6.2	微型化学量传感器	72
6.2.1	微型气体传感器	72
6.2.2	微型离子敏传感器	74
6.3	微型生物传感器	75
6.3.1	生物传感器的分类	75
6.3.2	悬臂梁式生物传感器	78
第7章	微执行器	81
7.1	静电执行器	81
7.2	压电执行器	85
7.3	电磁执行器	87
7.4	SMA 执行器	89
7.5	热执行器	91
7.6	微流体执行器	92
第8章	微构件	94
8.1	结构梁	94
8.2	薄膜	97
8.3	铰链	101
8.3.1	平面柔性铰链微铰链	101
8.3.2	非平面表面微铰链	102
8.4	隧道探针	103

8.5	压阻换能器件	104
8.6	静电微构件	105
第9章	微系统应用	108
9.1	在汽车工业中的应用	108
9.1.1	压力传感器	108
9.1.2	硅加速度传感器	108
9.2	微机器人	109
9.3	微型飞行器	111
9.4	在航空航天中的应用	112
9.5	在医学中的应用	114
9.5.1	植入式人造器官	114
9.5.2	体内显微手术	114
9.5.3	微喷雾给药	115
9.6	在军事中的应用	116
9.7	在生物科学中的应用	118
9.7.1	DNA PCR 扩增芯片	119
9.7.2	DNA 毛细管电泳芯片	120
9.7.3	微型 DNA 流体控制芯片	120
9.7.4	集成 DNA 微系统芯片	120
9.8	在信息技术中的应用	120
9.8.1	微光机电器件	121
9.8.2	无线电微机电系统	123
第10章	微尺度效应	126
10.1	微摩擦基础	126
10.2	微尺度热学	127
10.2.1	热传导的尺度效应	127
10.2.2	热交换的尺度效应	129
10.2.3	热辐射的尺度效应	129
10.3	微流体的尺度效应	129
10.4	微执行器的尺度效应	131
10.4.1	静电执行器的尺度效应	132
10.4.2	电磁执行器的尺度效应	132
10.4.3	SMA 执行器的尺度效应	134
10.5	尺度效应的实例	134
第11章	微机电系统设计技术	135
11.1	引言	135
11.2	微机电系统设计的概念、任务及类型	139
11.2.1	微机电系统设计概念及本质	139
11.2.2	设计类型	140
11.2.3	微机电系统设计内容	140

11.2.4	VLSI、宏机械以及微机电系统设计	141
11.2.5	设计原则	142
11.3	微机电系统设计过程	143
11.4	微机电系统健壮性设计方法简介	145
11.4.1	健壮性设计理论	145
11.4.2	优化算法	147
11.4.3	设计实例——两自由度微谐振器	149
11.5	微机电系统设计方法学与发展方向	151
第12章	微机电系统计算机辅助技术	153
12.1	MEMS CAD 设计原则	154
12.2	MEMS CAD 结构体系	154
12.3	MEMS 建模与仿真	156
12.3.1	加工过程模拟	157
12.3.2	器件特性仿真	158
12.3.3	器件行为模型与系统仿真	159
12.4	宏模型	160
12.4.1	微机械宏模型技术现状及类型	160
12.4.2	宏模型设计的基本原则和常用方法	162
12.5	建模语言 VHDL-AMS 简介	162
12.5.1	VHDL-AMS 语言的起源：VHDL 语言	162
12.5.2	VHDL-AMS 语言基本特点	163
12.5.3	VHDL-AMS 语言的语法	163
12.5.4	微机械系统 VHDL-AMS 描述举例	167
12.6	常用软件介绍	168
12.6.1	SUGAR	168
12.6.2	AnsysMems	171
12.6.3	MEMS Pro	174
	参考文献	177

第 1 章 概 论

1.1 微机电系统简介

为了说明微机电系统 (Micro Electro Mechanical System, MEMS), 还是先从机电系统谈起。现代化的汽车就是一个典型的机电系统, 有几百只传感器、电子控制的点火装置、进油和进气量控制系统、制动系统、安全气囊, 甚至电子导航系统。由传感器检测出汽车的运行参数, 并以电信号的形式将信息传送给电子控制电路, 电子控制电路则根据这些信息作出判断并发出控制命令, 这些命令通过机械执行器实现对汽车运动状态的控制。由此可知机电系统的基本组成部分是传感器、电子控制电路 (微处理器) 和机械执行器。

人们在微电子技术的基础上发展了微机械加工技术, 如硅微加工、光刻电铸模造 (LIGA) 技术和精密机械加工等, 并将用微机械加工技术制成的微执行器与微电子器件甚至固态传感器有机地集成于一体, 发展出了微机电系统。

微机电系统的概念始于 20 世纪 80 年代, 一般泛指尺度在亚微米至亚毫米范围的装置, 目前定义尚未统一。对应于微机电系统有不同的相关术语及其解释。

(1) MEMS (Micro Elector Mechanical System) 美国北卡罗来纳微电子中心 (MCNC) 定义

微机电系统是由电子和机械组成的集成化器件或系统, 采用与集成电路兼容的大批量处理工艺制造, 尺寸在微米到毫米之间。尤其是将计算、传感与执行融合为一体, 从而改变了感知和控制自然界的方式。

(2) Micro System Technology 欧洲 NEXUS (The Network of Excellence in Multi-functional Microsystems) 定义

微结构产品具有微米级结构, 并具有微结构形状提供的技术功能。微系统由多个微元件组成, 并作为一个完整的系统进行优化, 以提供一种或多种特定功能, 在许多场合包括微电子功能。

(3) Micro Machine 日本微机械中心定义

微机械是由只有几毫米大小的功能元件组成的, 它能够执行复杂、细微的任务。

(4) Micro System 国际电工委员会 (ICE) 定义

微系统是微米量级内的设计和制造技术。它集成了多种元件, 并适于以低成本大批量生产。

这些术语及其解释虽然有一定的不同处, 但有一点是相同的, 即微机电系统是由关键尺寸在亚微米至亚毫米范围内的电子和机械元件组成的器件或系统, 它将传感、处理与执行融为一体, 以提供一种或多种特定功能。

微机电系统应通过尺寸和功能来定义, 而不应限定于任何制作工艺, 因为工艺技术是不断发展和完善的。微机电系统器件并不能完全用总尺寸来定义, 而应用特征尺寸来表征。特征尺寸是决定器件性质和加工工艺的关键尺寸, 如扩散硅压力传感器的膜厚。如图 1-1 所示, 特征尺寸在亚毫米以上的机械电子系统基本上属于传统机电一体化装置, 传统的机械加

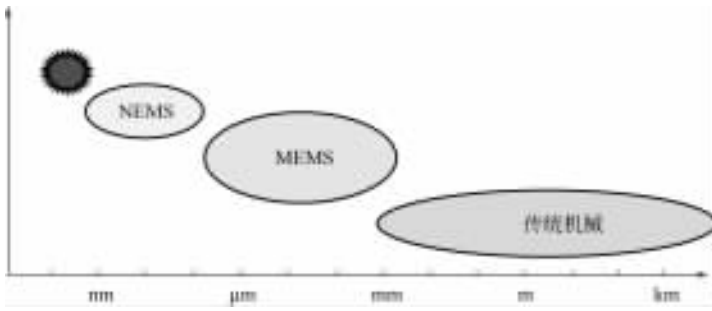


图 1-1 MEMS 的尺度范围

工技术已经能够满足要求。而特征尺寸在亚微米以下的机械电子系统，由于纳米效应、量子效应的作用，其理论基础与加工技术已经完全改变，应属于纳机电系统（Nano Electromechanical System, NEMS）。

由于微机电系统的基于微电子技术的背景，使其具有一般集成电子器件的共同优点，如适于批量加工、可低成本大批量生产，还有微型化带来的高速化、功耗低等优点，因此可以开拓出许多新的应用领域。国内外一些有实力的半导体公司和研究机构，纷纷投入力量，开发和生产了不少有特色的产品，其应用已广泛渗透到现代科技领域。

汽车内安装的微传感器已达几十甚至上百个，用于传感气囊、压力、温度、湿度、气体等的情况，以及进行智能控制。其中用于制导、卫星控制的微惯性传感器及微型惯性测量组合在汽车中也能应用于自动驾驶、防撞气囊、防抱死系统（ABS）、定控制等。

在生物医学方面，特别是现代生物医疗领域，微机电系统出色地解决了许多以前不能解决的问题，为人类作出了重要贡献。例如，增高体温法治疗癌症是利用超声波或无线电波的能量把身体某一部位加热到 43°C 以杀死癌细胞。在治疗时温度不够效果就不好，温度过高又会伤害周围的组织，但医生很难判断肿瘤部位是否达到了这个温度。美国斯坦福大学研究所研制的微型温度传感器可注射到肿瘤中去，而且只在加热时停留在那里。又如血管成形手术中，在动脉中推动一个小气球，以此来清除动脉壁上的硬化斑块，可用注射或吞服法将用微机械加工法制成的微型压力传感器放在气球后面，大夫通过它可以知道斑块清除工作进行得怎么样。通过微机械加工技术已经能制造出可以夹起一个红细胞的微型镊子。用微机械加工法制成的微型泵和阀，也可植入人体内，用于微推进、伤员救护的微流量系统和微分析仪，可按规定的剂量给出类似胰岛素那样的药物，以满足某种特殊疾病的治疗需要。

在信息领域中，现代计算机的外设摄像头、鼠标投影仪、喷墨打印机、高密度海量数据存储器等中广泛应用了微机电系统技术。同时，作为信息产业的新方向，光通信正在向有光交换功能的全光通信网络方向发展而无线通信则要求增强功能（如联网等）和减小功耗，包括美国朗讯公司在内的一些公司和大学正在研究全光通信网用的微系统及无线通信射频微系统。

军事领域是微机系统技术的最早应用领域，大量采用微米/纳米和微系统器件改进武器性能已成为发展新型高科技武器装备的方向。如微型加速度计已成功用于武器系统以改进武器性能。另外，军用微型陀螺、微型化学传感器均制备出样品，将在武器装备中试用。

在航空领域中，微机电系统技术用于改进飞机性能、保证飞机安全舒适、减少噪声。而在航天方面则用于天际信息网、微重力测量。目前的状况是用作运行参数测量的微加速度计已进行了地面辐照实验，正在进行飞行搭载实验，已全面展开微陀螺、微推进和微喷管等微

系统基础。

近年发展的能在硅片平面内作大范围的旋转与移动的新型微机械，标志着微机械加工技术已能解决诸如机器人运动关节等重要部件的制造，为成功设计制造单片式微型机器人系统迈出了关键的一步。已用此技术制成的微型涡轮机、微型机械手，堪称小巧玲珑，令人叹服，在生物医疗等当代尖端科技应用中有难以估量的作用。

以上是业已开发、生产的大批微机电产品中的几个典型例子，充分证明微机电系统确实是一个生机勃勃、潜力巨大的领域。

1.2 微机电系统的起源

(1) 微电子-MEMS 技术的基础

微机电系统的起源与微电子技术的发展密切相关。1947 年半导体晶体管的发明，20 世纪 50 年代末至 60 年代初半导体集成电路的研制，使人类得以在微米尺度上大规模制作电子元件、器件与电路。而集成电路的迅速发展，使硅成为了最重要的微电子材料，也为微机电系统技术的发展奠定了基础。

(2) 压阻现象——引入机械物理量，形成机电系统

1954 年史密斯发现了半导体压阻效应，1958 年人们采用硅单晶制成了半导体应变片，其灵敏系数比传统的金属应变片高出数十倍。由于半导体应变片是粘贴在弹性体上的，并且两种材料的温度膨胀系数不同，使半导体应变片式传感器存在较大的蠕变、滞后、温漂等误差。

20 世纪 60 年代末至 70 年代初，美、日等国先后以压阻效应为基础，研制出扩散压力传感器。扩散压力传感器采用制作集成电路的平面工艺技术，在硅片上光刻、扩散敏感电阻，又在硅片背面研磨加工出凹坑，形成 C 形硅膜片（又称硅杯）。由于敏感电阻和弹性体在同一硅片上，彻底消除了粘贴应变片所带来的误差，而且又可在硅片上制作补偿电阻和电路，使扩散硅压力传感器的精度大为提高。扩散硅压力传感器的发展使硅成为了优良的机械电子材料。

20 世纪 70 年代中期，美国 Kulite 压力传感器公司首先用光刻方法在硅片背面形成氧化硅或氮化硅掩膜，再用各向异性化学腐蚀代替机械研磨来制作扩散压力传感器膜片，并采用静电键合技术进行传感器组装。这种压力传感器可以认为是微型传感器的雏形。由于可以对大硅片进行各向异性化学腐蚀，使得压力传感器能够高精度地批量生产，同时又消除了研磨加工所带来的机械残余应力，提高了传感器的稳定性和成品率。为了加固边框，可将腐蚀加工后的硅片与玻璃静电键合在一起，然后再将整个硅片切割成压力传感器芯片，并封装成器件。这种加工技术能够将几何尺寸控制在微米级，同时又主要通过对硅的深腐蚀和硅片的整体键合来实现，故又称为体微加工技术（Bulk Micromachining）。

(3) 机械运动部件——真正的微机电系统

20 世纪 80 年代初、中期，美国加州大学 Berkeley 分校、威州大学 Madison 分校等单位研制出了仅从硅片正面对淀积生长的薄膜进行加工而形成微结构的方法。他们利用集成电路中已经广泛应用的多晶硅薄膜作为结构材料，以磷硅玻璃作为牺牲层，制成了压力传感器、硅梁和连杆、弹簧等机械运动零件。1982 年美国加州大学 Berkeley 分校采用表面牺牲层技术成功制作微型静电电机，使机械部件与集成电路集成制作成为现实，微机电系统进入新纪元。由于全部加工仅涉及到硅片正面的薄膜称为表面微加工（Surface Micromachining）技术，这一技术避免了体微加工所要求的双面对准、背面腐蚀等问题，使集成电路工艺的兼容

性大大提高。

与此同时，在德国卡尔斯鲁厄原子核研究所，诞生了以同步辐射 X 射线光刻、电镀和模铸为特征的光刻电铸模造（LIGA）技术，可以制成高为数百微米、横向尺寸仅约 $1\mu\text{m}$ 的微机械结构，加工材料也突破了传统的平面工艺限制，扩展到金属、塑料和陶瓷，大大增加了灵活性。用 LIGA 工艺制作的电磁电机，其转矩比静电电机大为提高。但是由于要使用同步辐射 X 射线光源，使这一技术的工业应用受到了限制。

体微加工、表面微加工和 LIGA 技术构成了微机械加工（Micromachining）技术的主体。通过硅工艺、大规模集成技术以及微机械加工技术，使人们能够把信息传感、数据处理、执行机械以及其他一些微器件，按照集成电路的制造原则，以高密度、低成本的方式集成在一起，产生了微机电系统这一概念。

（4）微机电系统深入应用

人们在发展微电子技术和微机械加工技术的过程中，不断地开发了一系列新的设计和制造原则，以及各种新技术和加工手段，当这些新的设计和制造技术用于传统上并不属于电子学领域里的问题时，如传感器、执行器、传动装置、流体机械（泵、阀等）、光学器件等，带来了革命性的变化。

20 世纪 90 年代喷墨打印头、硬盘读写头、硅加速度计和数字微镜器件等相继规模化生产充分展示了微系统技术及其微系统的巨大应用前景。90 年代初，美国 ADI 公司成功地将微加速度计商品化，并大批量应用于汽车防撞气囊。90 年代中出现了深槽刻蚀技术，围绕该技术发展了多种新型加工工艺，促进体硅工艺的快速发展，微米/纳米和微系统技术的发展达到了高峰。1999 年以来，国际上微米/纳米技术及微系统的专利数呈指数形式上长。90 年代末 Sandia 实验室五层多晶硅技术代表了当时的最高水平（见图 1-2）。



图 1-2 五层多晶硅

1.3 微机电系统的发展现状

1.3.1 国外的发展现状

由于有军事应用的牵引，微机电系统研究在国际上得到了迅速发展。其投资集中用于研究和先进材料、器件、系统和加工方法，从而使这些技术快速方便地向实用化转化。

⁴ 此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

美国国家自然科学基金、先进研究计划、国防部等投资 1.4 亿美元进行微机电系统技术研究。最新资料表明，美军已将今后微机电系统在军事领域的应用归纳为九大类，确定了利用 MEMS 技术改进武器性能的九大主攻方向。

- ① 武器制导和个人导航的惯性导航组合。
- ② 超小型、超低功率无线通讯（RF 微米/纳米和微系统）的机电信号处理。
- ③ 军需跟踪、环境监测、安全勘察和无人值守分布式传感器。
- ④ 小型分析仪器、推进和燃烧控制的集成流量系统。
- ⑤ 武器安全、保险和引信。
- ⑥ 有条件保养的嵌入式传感器和执行器。
- ⑦ 高密度、低功耗的大量数据存储器件。
- ⑧ 敌友识别系统、显示和光纤开关的集成微光学机械器件。
- ⑨ 用于飞机分布式空气动力学控制和自适应光学的主动共型表面。

美国的大学、国家实验室和公司已有大量的微机电系统研究小组，并有几种实用化的产品进入市场。如 Texas 公司已开发出的用于彩色图像投影显示的数字镜面器件（DMD）；Park 公司开发出的用于扫描隧道显微镜（STM）和原子显微镜（AFM）的微型传感器，由悬臂梁、微针尖以及信号检测和放大的集成电路组成。

欧共体为了加强各国之间的组织和合作，成立了 NEXUS（多功能微系统研究合作机构）组织。德国在 20 世纪 80 年代中期发展的 LIGA 工艺，可用来制作高宽比大于 200 的三维立体结构，并可实现大批量生产。目前德国的 LIGA 技术处于国际领先水平，其中有代表性的是 Karlsruhe 核研究中心、微技术研究所（IMM）和 Microparts 公司，研究人员已在实验室里制造出了微传感器、微电机、微执行器、集成光学和微光学元件、微型流量计以及直径为数百微米的金属双联齿轮等微机械零件。

日本曾制定了纳米制造计划（1985~1990）、埃技术计划（1992~2001）、微型机器人计划。目前日本共有以企业为中心的 60 多个微机电系统研究组，每年举行一次微机电系统国际研讨会。而 1990 年成立微机械中心（MMC）和微机械学会（MST），每年举行一次微机械展览会。

综上所述，微机电技术已经受到工业发达国家的高度重视。从微机电发展的总体水平看，许多关键技术已经突破，正处于从实验室研究走向实用化、产业化阶段。而各国在开发微机电技术时，也各有特点。德国是以采用 LIGA 技术为代表发展起来的；日本则以精密加工技术为特点；而美国则主推以集成电路加工技术为基础的硅体加工技术。

由于硅加工技术所取得的成就，目前国际上硅加工技术已成为微机电系统的技术集中在以下几点：

- ① 表面微加工技术向多层、集成化方向发展。
- ② 体微加工主要表现为键合与深刻蚀技术的组合，追求大质量块和低应力。
- ③ 表面微加工技术与体微加工技术进一步结合。
- ④ 设计手段向专用 CAD 工具方向发展。

1.3.2 国内的发展现状

我国的微系统研究起步并不晚，在基础研究和相关技术方面都取得了一些有特色的成果。目前我国从事微机电系统研究的单位已有 60 多个，主要集中在高校、中科院及信息产业部的研究所，所取得的主要进展如下。

① 加工技术 北京大学微电子所建立了五套比较成熟的硅基微机械加工艺，在 ICP Lag 效应抑制、金属剥离技术及硅化物在表面微机械中的应用等单项工艺技术取得了很大的进展。目前还在进行电路与微机电器件的集成化工艺研究，并已经取得了一些初步的成果。中科院上海微系统与信息技术研究所（原中科院上海冶金所）在原有重点实验室 2 英寸硅片加工工艺线的基础上，引进了多种专用设备，具有了比较完备的加工能力。信息产业部十三所也具有比较完备的加工设备，可以进行多种类型的器件加工，其中的熔硅工艺技术在国内外领先。清华大学微电子所在原有电路工艺实验室基础上开发相关的硅基微机电系统加工工艺，其中多孔硅的制备和腐蚀技术很有特色。上海交通大学主要开展了 LIGA 及准 LIGA 加工技术研究，开发出一套 DEM（Deep etching, electroforming and microreplication）工艺，具有工艺周期短、加工成本低等特点。

② 微陀螺 清华大学研制的振动轮式陀螺，利用熔硅工艺加工，具有机械耦合小，对外界加速度灵敏度低等特点。采用的“余弦”型弹性梁可以减小振动时的非线性。中科院上海微系统与信息技术研究所研制的电容式振动陀螺可以在空气环境下取得较高的 Q 值，不需要真空封装就可以很好的工作。复旦大学研制了一种利用相位检测的压阻式振动陀螺，与一般的振幅检测陀螺相比，具有高精度，低温度系数等特点。

③ 微型加速度计 国内研制微机械加速度计的单位有北京大学微电子所、清华大学、上海冶金所、信息产业部电子第十三所、信息产业部第四十九所，哈尔滨工业大学、华北工学院等十多家单位。一些微机械加速度计样机指标见表 1-1。

表 1-1 一些微机械加速度计样机指标

研究单位	量 程	灵 敏 度	线 性 度	分 辨 率	零 轴 稳 定 性
北京大学	-1~+1g	3V/g	0.391%	1mg	2×10^{-4} mg
清华大学	± 10 g	>0.4 V/g			
上海冶金所	$\pm 0.01 \sim \pm 1$ g	0.05%~0.1%			
信息产业部第十三所	>75 g	0.1V/g		1mg	

④ 射频微机电系统（RF MEMS） 总体水平离国际先进水平尚有一定差距。北京大学微电子所在 2000 年研制平面硅谐振器和侧向微机械继电器的基础上，2001 年开发出了微机械可调电容和采用新型三明治硅梁结构的 RF 开关。清华大学研制出了基于多孔硅牺牲层技术的微电感，并制作出了微机械天线和谐振器样品。重庆大学对用多晶硅技术制作微开关的技术进行了探索，并制作出了双 C 微带天线等样品。电子第五十五所利用表面工艺研制出了在 S 波段有很好射频性能的 RF 开关。电子第十三所用硅溶片工艺研制出纵向单晶硅梁微机械开关，并对开关的动态特性和失效模式进行了研究。华东师范大学研制出了基于牺牲层工艺的毫米波移相器。

⑤ 微光机电系统（MOEMS） 国内的研究工作主要集中在面向全光传送网的 MEMS 光开关、可变光衰减器，以及微小光学仪器等方面。北京大学开展了以扭转微镜为核心结构的光开关及其阵列化的研究，已基于普通硅衬底研制出了 2×2 光开关阵列。清华大学开展了以法布里-泊罗（F-P）微腔为核心结构的光开关、运用材料应力参与驱动的光开关、可变光衰减器等研究。上海冶金所开展了以上下垂直滑动微镜为核心结构的光开关及其阵列的研究。信息产业部电子第十三所开展了以水平滑动微镜为核心结构的光开关的研究。上海交通大学开展了基于非硅及硅材料的以电磁驱动微镜为核心结构的光衰减器的研究。重庆大学光电工程系开展了基于微机电系统的微光谱仪的研究。

⑥ 微机电系统计算机辅助技术 (MEMS CAD) 由北京大学牵头, 联合了东南大学、南开大学、华大公司、中国科技大学等国内优势单位, 在国家 973 计划资助下开展了“微系统设计方法、建模、数据库和仿真相关问题研究”, 在华大公司开发的版图设计系统 ZLE 的基础上, 对微机电系统器件的设计工具、器件仿真、虚拟加工等方面开展了大量的开拓性、基础性、系统性工作。目前, 已经建立了一个包括版图设计、工艺模拟、性能分析等主要功能的 MEMS CAD 原型系统 IMEE1.0。其他单位在 MEMS CAD 方面的研究主要集中在器件的建模和仿真上, 如西北工业大学、清华大学、东南大学、复旦大学、上海微系统所等。

我国虽已积累了一些基础技术, 取得了一些微传感器和微执行器的研究经验和科研成果, 但实用化研究刚刚开展。就目前在我国所取得的这些科研成果而言, 只有个别单位具备微压力传感器、微加速度传感器、微流量传感器等产品的小批量生产能力, 多数为实验室产品, 商品化工作刚刚起步, 离产业化要求相距甚远。北京大学微电子所以 IC 加工线为基础, 开展了体硅工艺和表面工艺研究, 研制了硅微加速度计、微化学传感器等, 并已得到环宇青鸟公司的资金投入。由东南大学和某国际风险投资合作成立的 E-Life 公司主要开发生产有自主知识产权的 DNA 分析芯片及其相配套的平台。

第 2 章 微机电系统材料

微机电系统中用于制造微结构的材料既要保证微机械性能要求，又必须满足微加工所需条件。微机电系统的材料随构件结构与制造工艺参数变化很大，通常应根据器件的功能和制造方法来选择。

按具体应用场合，微机电系统材料分为微结构材料、微致动材料以及微传感器材料。用于微致动的材料有电致伸缩材料、形状记忆合金材料等。用于微构件的材料，若是采用半导体微细加工技术，可选用单晶硅、多晶硅和氧化硅等硅材料，陶瓷等非金属材料，以及铝、钨等金属材料。对于 LIGA 加工方法，主要是选用铜、镍等金属材料和塑料等。

按性质，微机电系统材料可分为结构材料、功能材料和智能材料。结构材料是指具有一定机械强度，用于构造微机电器件结构基体的材料，如硅材料。功能材料是指具有特定功能的材料，如压电材料、光敏材料等。功能材料和结构材料可以是单一材料，也可以是材料组合体。智能材料则是模糊了结构和功能的界限，它一般具备传感、致动以及控制这三个要素，可以模仿人类或生物的某些行为，对外界信息激励具有强自适应能力。常见的智能材料有形状记忆合金、电致伸缩材料、电流变材料等。智能材料与智能结构为微机电研究开辟了新途径。

2.1 硅 材 料

微机械加工技术源于微电子集成制造，所以在微机电系统材料中，硅是最常用的材料。硅属硬脆材料，同时也有一定的弹性。硅材料常分为单晶硅、多晶硅和非晶硅。

单晶硅是指整个晶体内原子都是周期性的规则排列。单晶硅晶胞是面心立方晶格沿另一面心立方晶格的空间对角线位移四分之一长度套构而成的，每个原子被 4 个原子包围。由于晶体是由无数晶格规则排列而成，因此可以作出许多互相平行的晶面，组成了晶面族。习惯上用晶面密勒指数 (h, k, l) 来标记晶面。即选取晶胞中的顶角作为原点，以立方晶胞的边为坐标轴，假设一个平面，在 x 、 y 和 z 轴上的截距分别为 p 、 q 、 r ，取其倒数之比为

$$\frac{1}{p} : \frac{1}{q} : \frac{1}{r} = h : k : l$$

将 h, k, l 化为互质整数，称为密勒指数。当晶面与坐标轴平行测截距在无限远处，其值就为零。图 2-1 所示为硅晶胞的三个主要晶面 (100) 、 (010) 、 (001) ，它们虽然处在不同的方向上，但原子的排列相同，用 $\{ \}$ 表示这同类性质的晶面。同样还可在一个晶胞中得出方向不同而原子排列相同的六个 $\{110\}$ 、四个 $\{111\}$ 。垂直于晶面的法线方向叫晶向，用 $[]$ 表示， (100) 、 (110) 、 (111) 晶面的方向分别为 $[100]$ 、 $[110]$ 、 $[111]$ ，如图 2-2 所示。用 $\langle \rangle$ 表示同类性质的晶向，如 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ 等，其中， $\langle 111 \rangle$ 包括 $[110]$ 、 $[-110]$ 、 $[1-10]$ 、 $[011]$ 、 $[01-1]$ ，其他依此类推。

硅单晶在晶面上的原子密度是以 $(111) > (110) > (100)$ 的次序递减，导致了晶体的各向异性，如扩散速度、腐蚀速度均以 $(111) < (110) < (100)$ 方向递增。

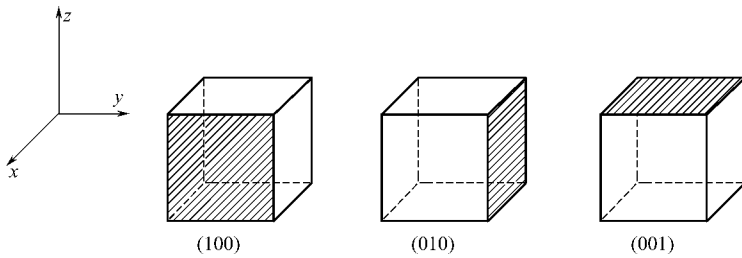


图 2-1 硅晶胞的主要晶面示意

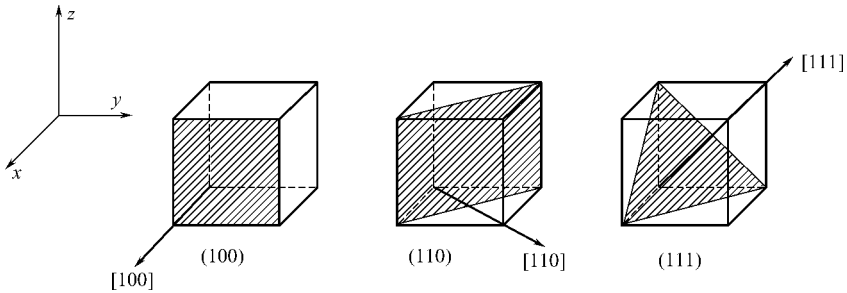


图 2-2 硅的主要晶向示意

单晶硅具有优良的机械、物理性质，其机械品质因数可高达 10^6 数量级，滞后和蠕变极小。纯净的单晶硅外观呈浅灰色，略有金属性质。

多晶硅是指晶体内各个局部区域内原子是周期性的规则排列，但不同区域之间原子的排列方向并不相同。因此，多晶体可以看作是由许多取向不同的小单晶体组成。多晶硅薄膜与单晶硅有相近的敏感特性、机械特性，它在微机械加工中多用作中间加工层材料。

硅具有良好的机电合一特性。它既有足够的机械强度，又有优良的电性能，便于实现机电器件的集成化。硅的加工精度比较高，容易生成绝缘薄膜。硅具有多种优异的传感特性，如压阻效应、霍尔效应等。硅材料质量轻，密度为不锈钢的 $1/3$ ，而弯曲强度却为不锈钢的 3.5 倍，它具有高的强度密度比和高的刚度密度比。

大部分微机械传感器都是用硅制作的另一个重要理由是应用硅微机械加工技术可以制作出尺寸从亚微米到毫微米级的微元件和微结构，并且可达到极高的加工精度。

硅结构的设计要点如下。

- ① 尽量减小硅单晶的表面、边缘和体内的缺陷以减少应力集中的可能。
- ② 经受较大磨损、摩擦或承受较大应力的构件，其尺寸尽量小以减少构件中晶体缺陷的总量。
- ③ 加工大硅片要尽量减少常规机械加工方法，以免造成边缘和表面缺陷。或者在操作后，用腐蚀法清除边缘和表面上受损伤较严重的部分。分离晶片尽量采用腐蚀法。
- ④ 同向异性腐蚀法形成的构件容易产生锐缘和尖角，从而导致应力集中。可采用各向同性腐蚀法或其他方法将锐缘和尖角打圆。
- ⑤ 硅片热加工时尽量避免采用高温。因为高温下硅片内部容易产生高应力，从而增加构件断裂的可能性。
- ⑥ 若在受力、磨损或严重腐蚀的环境下使用，硅片表面可以淀积、生长一层 SiC 或

Si_3N_4 钝化膜以保护表面。

2.2 压电材料

一些离子型晶体（如石英、钛酸钡）存在压电效应的性质。正压电效应如图 2-3 所示，在压电材料一定方向上施加外力使其发生变形时，会引起它内部正负电荷的转移而产生电极化，电极化的方向随应力的方向而改变，从而使其两个相对表面出现符号相反的束缚电荷 Q 。当外力消失时，晶体又恢复不带电的原始状态。逆压电效应（或称电致伸缩）如图 2-4 所示，若对压电材料施加电场作用时，会引起材料内部正负电荷中心的相对位移，导致材料变形，应变大小与电场成正比，应变的方向与电场方向有关，即电场反向时应变也改变方向。有些微传感器利用正压电效应来感知外界机械能，而压电微执行器则利用压电材料的逆压电效应实现驱动。

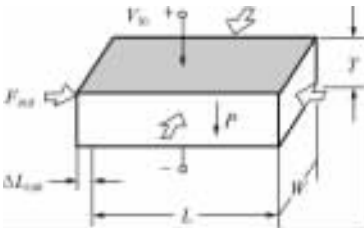


图 2-3 正压电效应示意

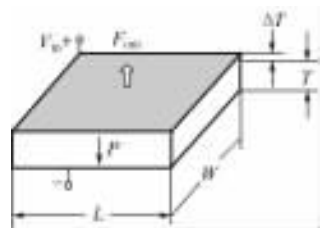


图 2-4 逆压电效应示意

压电材料可以大块使用也可以小块分散使用，既可以作为驱动器，又可作为传感器。作驱动器时，它的激励功率小，响应速度较快，是形状记忆合金的一万倍。压电器件可做得很小很薄，且组合灵活。

压电材料除了石英晶体外，还有压电陶瓷、压电高分子材料和压电半导体等。由于陶瓷材料的化学惰性、机械稳定性、热传导特性和热膨胀特性，使其成为微机电系统的主要基板材料，如氧化铝陶瓷。用于致动器和传感器元件的压电陶瓷，具有价廉、质轻小巧、易于与基体结合、响应速度快等优点。此外，它对结构的动力学特性的影响很小，并且通过分布排列可实现大规模的结构驱动，因而具有较强的驱动能力和控制作用。由于压电陶瓷具有微小位移且精度高这一突出优势，适应微机械、微机器人微小位移控制的要求，用作压电驱动器是比较理想的。常用压电陶瓷有钛酸钡（BT）、锆钛酸铅（BZT）、改性锆钛酸铅、偏铌酸铅（PN）、铌酸铅钡锂（PBLN）、改性钛酸铅（PT）等。压电陶瓷的极限应变小，目前还不能作为结构材料。

在微机电系统应用中，薄膜状态的压电材料对于开发微传感器和微驱动器甚为关键。小型化和同硅的集成化趋势导致了对薄膜的性能和制备的日益重视。由于尺寸效应，陶瓷薄膜与它们对应的块体陶瓷具有显著不同的性能。

2.3 形状记忆合金

形状记忆合金（SMA）在常温下为马氏体状态，当加热到相变温度之后成为奥氏体状态，当温度下降到相变温度以下时又回到马氏体状态。如果在马氏体状态下将 SMA 加工成一定形状，然后将其加热到相变温度以上，将使 SMA 记住该形状；而在低于金属相转变温度时，被加工成另一种形状，但是当温度达到或超过转变温度时，SMA 自动变化成原来记