

微机电系统技术与应用丛书

# 微弱信号检测技术

刘俊 张斌珍 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书主要阐述微机电系统中微器件的微弱信号检测技术。本书先由微机电系统入手，然后介绍微弱信号检测的一些背景知识，重点阐述了微弱信号检测的方法与技术，以及针对微器件不同的检测方式，详述其检测原理与检测方法，最后选取典型的微器件介绍了其微弱信号检测的实用电路。

本书可作为微电子、自动化、电子工程、物理、生物医学工程、测试技术与仪器等专业的研究生和高年级本科生教材，也可作为涉及电子噪声、低噪声设计、电磁兼容性、微弱信号检测的工程技术人员参考读物。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

微弱信号检测技术 / 刘俊, 张斌珍编著. —北京: 电子工业出版社, 2005.10  
(微机电系统技术与应用丛书)

ISBN 7-121-01857-8

I. 微… II. ①刘… ②张… III. 信号检测—技术 IV. TN911.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 120707 号

责任编辑: 刘志红

印 刷: 北京市顺义兴华印刷厂

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

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×980 1/16 印张: 16.25 字数: 330 千字

印 次: 2005 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 29.80 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。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



刘俊,男,1968年9月生,工学博士,教授,博士生导师,享受国务院政府津贴。现任中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室常务副主任。从事微惯性技术,动态测试及智能仪器技术研究。先后在国际、国内的重要学术刊物上发表相关学术论文37篇(被SCI、EI检索14篇),翻译出版《微传感器与执行器》、《微米技术的潜在应用前景》两本,获国家、省部级奖12项。获“全国五一劳动奖章”,“山西省模范教师”,“教育部新世纪优秀人才”等荣誉称号。

# 前 言

微机电系统 (MEMS) 技术, 是在 20 世纪 80 年代后期国际上兴起的一项高新技术。其主要特点是器件结构尺寸微小, 由于微尺寸效应, 导致 MEMS 器件中的信息的检测、传输输出量达到微弱信号级。因此, 把微弱的有用信号从噪声背景下提取出来, 并得到有效的传输是保证微机电系统取得成功的关键所在。

自从 1962 年第一台锁相放大器问世以来的四十多年时间里, 微弱信号检测技术得到了长足的发展, 信噪改善比 (SNIR) 得到不断提高。目前, 微弱信号检测的原理、方法和设备已经成为很多领域中进行现代科学技术研究不可缺少的手段, MEMS 技术的发展对微弱信号提出更高的要求, 同时也拓宽了微弱信号检测的新领域。

本书共 5 章。第 1 章对微机电系统 (MEMS) 进行了较为全面的概括, 通过展望 MEMS 的发展前景, 引出微弱信号检测 (WSD) 在 MEMS 器件发展过程中的重要性, 并且指出微电子线路与微结构的一体化研究是微机电系统发展的方向。第 2 章通过对微弱信号和噪声的分别介绍可以了解噪声的特点, 继而研究噪声的来源、种类和统计特征这些基本知识。第 3 章详细介绍了常规微弱信号检测的方法与技术。第 4 章则针对 MEMS 器件, 根据其检测方式分类, 分别对每种检测方式的理论基础、检测方法及在 MEMS 器件检测中的应用进行了详细的论述, 并且对检测中的关键技术进行了探讨。第 5 章主要针对常用的 MEMS 器件, 根据其不同的检测方式分别通过实例电路进行逐一的分析, 通过理论与实践相结合的方法使读者对实际应用中的微弱信号检测电路有一定了解。

微弱信号检测方法与技术仍在持续发展, 基于人工神经网络、小波变换、混沌理论的微弱信号检测理论和方法目前都取得较大的进展, 限于篇幅, 本书不予介绍。

本书由中北大学刘俊教授组织编写。第1章由石云波编写，第2章由王玲编写，第3章由张斌珍、王昊宇编写，第4章由刘俊、王玲编写，第5章由张斌珍、杨林森编写。

本书在编写过程中参考了一些兄弟院校的有关资料，也得到有关院校领导和同行的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

作者

2005年10月1日

# 目 录

第 1 章 微机电系统概述	(1)
1.1 微机电系统基本概念	(1)
1.2 微机电系统的基本研究内容	(1)
1.2.1 微机电系统的理论基础研究	(1)
1.2.2 微机电系统的技术基础研究	(3)
1.2.3 微机电系统的主要加工工艺	(6)
1.3 微机电系统的发展及应用	(9)
1.3.1 微机电系统的研究现状	(9)
1.3.2 微机电系统在军事领域的发展与应用	(14)
1.3.3 微机电系统在汽车上的应用	(21)
1.3.3 微机电系统的发展趋势及所面临的问题	(23)
1.4 MEMS 弱信号检测概述	(24)
第 2 章 微弱信号检测的背景知识	(27)
2.1 微弱信号和噪声性质及分类	(27)
2.1.1 信号的描述方式及分类	(27)
2.1.2 噪声的一般性质	(28)
2.2 常见的噪声类型	(31)
2.2.1 热噪声	(31)
2.2.2 散粒噪声	(33)
2.2.3 g-r 噪声	(35)
2.2.4 1/f 噪声	(36)

2.3	噪声的统计特征	(40)
2.3.1	噪声的概率分布	(40)
2.3.2	噪声的功率谱密度	(41)
2.3.3	噪声的相关函数	(41)
2.3.4	噪声源的相关性	(42)
2.4	噪声通过电路的响应	(43)
2.4.1	噪声通过线性电路响应	(44)
2.4.2	非平稳噪声通过线性电路响应	(45)
2.4.3	噪声通过非线性电路响应	(45)
2.5	信号噪声比 (SNR) 及信噪改善比 (SNIR)	(50)
<b>第3章</b>	<b>微弱信号检测方法</b>	<b>(51)</b>
3.1	概述	(51)
3.2	低噪声前置放大器	(52)
3.2.1	低噪声电子设计的基本原则	(53)
3.2.2	直接耦合方式的有源器件及工作点选择	(54)
3.2.3	噪声匹配网络及设计	(60)
3.3	滤波技术	(66)
3.3.1	无源低通滤波器	(68)
3.3.2	有源低通滤波器	(69)
3.3.3	巴特沃兹滤波器	(70)
3.3.4	高通、带通及带阻滤波器	(72)
3.3.5	窄带滤波器	(75)
3.4	相关检测技术	(75)
3.4.1	相关原理与相关函数	(75)
3.4.2	相关接收技术	(77)
3.4.3	锁定接收法	(79)
3.4.4	同步相干检测-锁定放大器	(80)
3.4.5	锁相环技术	(89)

3.5	同步积累法	(90)
3.5.1	同步积累原理	(90)
3.5.2	同步积分器	(92)
3.5.3	取样积分器	(94)
3.5.4	数字多点平均器	(97)
3.6	开关-电容网络	(99)
3.7	双路消噪法	(101)
3.8	基于混沌振子的微弱信号检测	(102)
3.8.1	Duffing 振子的特性分析	(103)
3.8.2	Duffing 振子检测微弱特征信号的原理	(104)
3.8.3	Duffing 振子检测微弱信号的实验应用	(105)
3.9	光子计数器	(107)
3.9.1	光子计数器检测概述	(107)
3.9.2	光子计数原理	(109)
3.9.3	光子计数器	(112)
3.9.4	光子计数器的信噪比	(120)
<b>第 4 章</b>	<b>MEMS 器件微弱信号检测技术</b>	<b>(123)</b>
4.1	电容检测	(123)
4.1.1	电容检测的基本方法	(123)
4.1.2	电容检测在 MEMS 器件中的应用	(125)
4.1.3	微小差分电容的检测	(132)
4.2	压阻检测	(148)
4.2.1	压阻检测理论基础——压阻效应	(148)
4.2.2	压阻检测在 MEMS 器件中的应用	(149)
4.2.3	压阻检测方法	(151)
4.2.4	压阻检测的温度补偿技术	(153)
4.3	压电检测	(158)
4.3.1	压电检测的理论基础——压电效应	(158)



4.3.2	压电检测在 MEMS 器件中的典型应用	(162)
4.3.3	压电检测方法	(165)
4.4	隧道检测	(168)
4.4.1	隧道检测理论基础——隧道效应	(168)
4.4.2	隧道检测技术的应用	(169)
4.4.3	隧道检测电路	(173)
4.5	热流式检测技术	(181)
4.5.1	热对流加速度传感器	(181)
4.5.2	热对流加速度传感器原理	(182)
4.6	谐振式检测技术	(185)
4.6.1	谐振式检测的基本原理	(185)
4.6.2	谐振检测在 MEMS 器件中的应用	(187)
4.6.3	谐振检测电路	(191)
4.7	光纤式检测技术	(199)
4.7.1	光纤检测的理论基础	(199)
4.7.2	光纤检测的应用	(202)
<b>第 5 章</b>	<b>常用微机电器件的微弱信号检测电路</b>	<b>(211)</b>
5.1	电容式信号检测电路	(211)
5.1.1	ADXL150/250 加速度计的实用电路	(211)
5.1.2	相敏检波微弱电容信号检测电路	(215)
5.1.3	利用 C-F 变换原理的微电容检测电路	(221)
5.2	压阻式信号检测电路	(222)
5.2.1	压阻式加速度计的信号检测电路	(222)
5.2.2	压阻式压力传感器的信号检测电路	(223)
5.2.3	单芯片 MAX1450 型集成压力信号调理器	(224)
5.2.4	MPX700 型数字压力测量仪	(228)
5.3	压电式信号检测电路	(230)
5.3.1	PV-96 压电式加速度传感器电路	(230)

5.3.2	GIA 型压电加速度检测电路	(230)
5.4	隧道式信号检测电路	(231)
5.4.1	A-V 转换的隧道式检测电路	(231)
5.4.2	高频率 A-V 转换的隧道式检测电路	(232)
5.4.3	微机械隧道效应加速度传感器的弱信号检测电路	(232)
5.5	谐振式信号检测电路	(235)
5.5.1	振动式微机械陀螺仪的驱动与信号检测电路	(235)
5.5.2	音叉振子压力传感器测量电路	(236)
5.5.3	谐振膜压力传感器测量电路	(238)
5.6	光纤式信号检测电路	(240)
5.6.1	光纤光栅振动加速度测量系统的结构	(240)
5.6.2	FBG 传感光电检测电路	(244)
5.7	热流式信号检测电路	(246)
	参考文献	(249)

## 微机电系统概述

### 1.1 微机电系统基本概念

微机电系统 (Micro-electro Mechanical Systems, MEMS), 这一新概念在国际上尚未有统一的名称定义。美国在这一方面的研究是在半导体集成电路工艺技术基础上延伸和拓展而来的, 故称之为 MEMS, 这也是目前广为使用的名称。欧洲称之为 Microsystem, 即微系统。这一称谓更强调系统的观点, 即如何将多个微型化的传感器、执行器、处理电路等元件集成为一个智能化的有机整体。在精密机械加工方面有传统优势的日本则称之为 Micromachine, 即微机器。

MEMS 系统主要包括微型传感器、执行器和相应的处理电路三部分。作为输入信号的自然界各种信息首先通过传感器转换成电信号, 经过信号处理后 (包括模拟/数字信号间的变换) 再通过微执行器对外部世界发生作用。执行器则根据信号处理电路发出的指令自动完成人们所需要的操作。信号处理部分则可以进行信号转换、放大和计算等处理。这一系统还能够以光、电等形式与外界进行通信, 并输出信号以供显示, 或与其他系统协同工作, 构成一个更大的系统。图 1.1 给出了一个典型的 MEMS 系统与外部世界的相互作用示意图。

### 1.2 微机电系统的基本研究内容

#### 1.2.1 微机电系统的理论基础研究

当尺寸缩小到一定范围时, 许多物理现象将与宏观世界有很大差别, 一些常规理论将做一些修正。目前, MEMS 的研究主要还是依赖经验和反复试探, 完整的微观尺度下的理论体系尚未建立, 这已经严重地阻碍了 MEMS 技术的进一步发展。因此, 微观尺度下的基

基础性理论研究显得尤为重要。

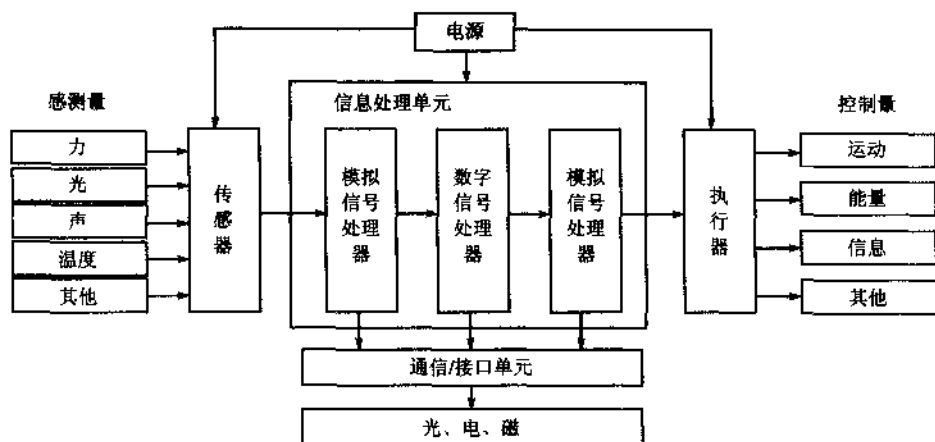


图 1.1 MEMS 系统与外部世界的相互作用示意图

微小型化的尺寸效应和微小型化理论基础包括力的尺寸效应、微结构表面效应、微观摩擦机理、热传导、误差效应和微构件材料性能等。随着尺寸减小，需要进一步研究微结构学、微动力学、微液体力学、微摩擦学、微电子学、微光学和微生物学等。目前，基础理论的研究尚处于起步阶段。

### 1. 尺度效应和表面效应

尺度效应研究已有较长的时间。力的尺度效应和表面效应说明，在宏观领域作用微小的力和现象，在微观领域可能起着重要的作用。在微小尺寸领域，与特征尺寸  $L$  的高次方成比例的惯性力、电磁力 ( $L^3$ ) 等的作用相对减小，而与尺寸的低次方成比例的黏性力、弹性力 ( $L^2$ )、表面张力 ( $L^1$ )、静电力 ( $L^0$ ) 等的作用相对增大。随着尺寸的减小，表面积 ( $L^2$ ) 与体积 ( $L^3$ ) 之比相对增大，表面力学、表面物理效应将起主导作用。尺度效应的研究将有助于 MEMS 的创新。

### 2. 微流体力学

微流体现象与宏观规律有相当的差别，有的规律需要进行较大的补充和修正。例如：微细通道内流动是否还符合 Navier-Stokes 方程；微小装置中流体驱动机制可用表面张力和黏性力，其阻力特性也有所不同，微小装置中流体的相变点（饱和压力和温度）不再是常

数, 而随尺度减小而降低; 微细管道固液界面的微观物理化学特性所产生的化学效应, 如电泳、电渗, 对微流体的力学行为有重要影响。

### 3. 力学和热力学基础

微观领域中的力学和热力学问题的基础研究可分为两大类: 一类是当物体尺度缩小至与粒子运行的平均自由程同一量级时, 则介质连续性等宏观假定不再成立; 另一类, 虽然连续介质等宏观假定仍然成立, 但由于物体尺度的微小化, 各种作用力的相对重要性产生了逆转, 从而导致了宏观规律的变化。

在微型光机电系统研究中主要需考虑的是第二类情况, 其具体特点有: 材料的失效模式, 不仅与材料的本征关系有关, 而且与材料的微结构有关。

必须发展介于宏观与微观之间的研究方法, 如宏微观力学、宏微观热力学等。此外还应注意电磁、机械、力学和热学相结合的交叉学科研究方法。

### 4. 微机械特性和微摩擦学

微结构材料结构特性中的弹性模量、泊松比、疲劳极限、强度, 以及内应力和内部缺陷的研究和数据库的建立引起了人们的重视, 有些力学量需要重新做出科学的表述。微观摩擦学包括纳米摩擦行为及其控制研究, 薄膜润滑研究, 微观表面形貌与表面力学、表面物理效应研究, 微磨损和微观表面特性研究。

### 5. 微观学的基础理论

由于微机电系统具有体积小、重量轻、能耗低、集成度高和智能化程度高等一系列特点, 微机电系统的研究不仅与微电子学密切相关, 而且还广泛涉及现代光学、气动力学、流体力学、热学、声学、磁学、自动控制、仿真学、材料科学以及表面物理与化学等领域, 所以微机电系统技术是一门多学科的综合技术。

## 1.2.2 微机电系统的技术基础研究

微机电系统的技术基础包括微系统设计技术、微机械材料、复杂可动结构微细加工、微装配和封装、微测量、微系统的集成与控制、微观与宏观接口等技术。微传感器、微致动器、微控制器是微系统的基础单元。

## 1. 微系统设计技术

微系统设计技术主要是设计方法的研究,其中计算机辅助设计(CAD)是微系统设计的有力工具。CAD设计工具应包括:器件模拟,系统校验、优化、掩膜版设计,过程规划等,还应建立混合的机械、热和电气模型,进一步还应考虑对所涉及的物理、化学效应进行更加综合的描述和分析。

采用CAD能设计出具有低成本、高性能、更为复杂的新型微系统。MEMS器件的设计需要综合多学科理论分析,这大大增加了设计参数选择的难度,常规分析计算已无法满足设计需求。计算机技术的进步使得CAD技术在MEMS器件设计中得到广泛的应用,2D和3D计算机绘图技术的发展能够对复杂的MEMS结构及版图进行计算机设计,有限元分析技术的应用可以用精确的计算机数值求解方法来分析和预测器件的性能。对器件工作的静态、准静态和动态模拟成为可能,从而使我们能够对MEMS器件的结构和工艺进行计算机模拟和设计优化。

## 2. 微细加工

微细加工技术是微机电系统的核心技术,也是微机电系统技术研究中最活跃的领域。

## 3. 微机械材料

微机械材料包括用于敏感元件和致动元件的功能材料、结构材料。MEMS应用的材料主要有以下几种:单晶硅和多晶硅、压电材料和其他类型合成材料。

1) 硅材料:硅的机械性能好,硅的强度、硬度和杨氏模量与铁相当,密度类似铝,热传导率与钨和钨接近。1960年MEMS刚出现时,IC工业应用的半导体材料只有单晶硅衬底和多晶硅薄膜两种材料。

2) 压电材料:开发研究表明,压电材料是制作MEMS的良好材料。石英也是一种高性能的晶体,虽然批量生产不如硅,但可以进行定向腐蚀,已用于制造压力传感器、加速度计和陀螺。

3) 合成材料:最近几年材料结构的控制技术发展很快,在未来阶段,MEMS应用如下新材料:化合物,高温超导材料,磁阻材料,铁电材料,热电材料,以及许多其他功能材料。

## 4. MEMS CAD

对MEMS来说,CAD仿真也具有十分重要的意义。

1) 可以优化 MEMS 结构和工艺, 减少试制成本, 这对于一旦制造出来, 结构就难以修改的 MEMS 来说尤为重要。

2) 缩短设计周期, 增强市场竞争力。

3) 对 MEMS 器件的模拟有助于理解微小范围内的力、热、电磁等能量之间的相互作用。MEMS 所需要的建模和仿真可以分为以下不同的层次。

#### (1) 工艺模拟

工艺模拟的目的是通过建立每一步的物理模型, 采用合适的数值算法, 模拟出 MEMS 的拓扑结构。对 MEMS 特有的体型和表面加工工艺, 需要开发专用的模拟程序。专用工艺的模型一般分为几何模型和物理模型两类, 一般牺牲层腐蚀和键合工艺采用几何模型以简化分析, 薄膜淀积和刻蚀工艺则应采用物理模型。Intellisuite 和 MEMSCAD 中都集成有这类功能。工艺模拟的一个重要发展方向是实现工艺综合和优化。

#### (2) 器件模拟

工艺模拟得到 MEMS 器件结构。根据其工作原理, 建立相应的方程, 通过有限元、边界元和差分方法就可以模拟 MEMS 器件的性能。在这类模拟中, 需要有合适的边界条件和材料特性数据库 (包括机械、电学、热学和磁学特性)。这类模拟往往涉及静态和动态的不同能量域的耦合分析, 比较复杂。器件模拟也可采用已有的成熟的商用软件, 如 ANSYS。

#### (3) 宏模型与系统级模拟

系统级模拟要求 MEMS 器件的模型简单, 并且能反映器件的材料特性和几何特征。这样的器件模型称为宏模型。建立宏模型的方法有: ① 把器件级模拟结果转化成等效的宏模型, 但要经过一定的简化; ② 解析法; ③ 集总参数法, 把连续的 MEMS 器件分解为集总参数的网络, 从而描述器件的工作特性。一旦建立起宏模型, 就可以采用 SPICE 或 MATLAB 等成熟软件进行系统模拟。

### 5. 微系统测量技术

微系统测量技术涉及材料的缺陷、电气机械性能、微结构和微系统参数及性能测试。需要在测量的基础上, 建立微结构材料的数据库和系统的数学、力学模型。MEMS 的测试技术是微机械加工技术的重要组成部分。微机械结构及整个 MEMS 系统各项参数的获得, 是保证加工质量、研究加工规律的基础。需要检测的参数包括几何量、力学量、电磁量、光学量和声学量。从目前来看, 在 MEMS 加工过程中, 在线测试缺乏专用和自动化的测试设备与系统, 已成为 MEMS 发展的一个瓶颈。加工过程测试技术主要包括以下 3 个方面。

1) MEMS 材料性能测试包括 MEMS 结构与功能材料性能的测试。应研究的方向包括: 评估方法与标准; 功能材料专项性能测试技术; 关键功能材料性能测试仪器与手段等。

2) MEMS 产品加工过程参数测试包括相关的电路测试技术研究, 三维结构形貌与尺寸测试技术, 微观机械特性测试技术, 表面膜结构与性能测试技术等。下一步发展的重点应该是研发关键工艺的在线测试与分析手段, 为稳定的 MEMS 产品批量生产提供工艺支持。

3) MEMS 芯片基本功能测试研究芯片级微机械动态特性测试技术、微机械光学测试技术、微机械力学特性测试技术、微机械结构分析技术等专用测试技术研究工作。结合研制的 RF MEMS 芯片、Bio MEMS 等不同类型的芯片, 开发标准化、低成本的系统级系列检测仪器, 提高测试的自动化与效率。加工过程测试技术的关键技术包括: 产品加工过程中的测试通用性; 测试结构设计技术; 测试参数数据库等。

## 6. MEMS 封装技术

MEMS 的封装是实用化进程中最关键的技术之一。与集成电路一样, MEMS 需要环境防护、电信号引出端、机械支撑和热量通路。但 MEMS 封装更复杂, 还有许多与集成电路不同, 有时需要与周围环境隔离; 有时则要与环境接触, 以便对指定的理化参数施加影响或测量; 有些 MEMS 器件是封装在规定的氣體中, 如加速度计; 有一些则要真空封装, 以避免振动结构的空气阻尼或热传导作用。现在人们已经认识到 MEMS 必须重视解决封装问题, 因为 MEMS 封装比集成电路复杂得多, 而且 MEMS 的封装需要随用户要求而定。现在封装和测试的费用占产品成本的 60% 以上。MEMS 最成熟的一些品种在封装上已取得一些成功的经验, 如微压力传感器、微加速度计、多功能绝对压力 (MAP) 传感器等封装在汽车和血压系统中的应用已取得成功。

## 7. 微系统的集成与控制

系统集成是微机电系统发展的必然趋势, 它包括系统设计、微传感器和微执行器与控制、通信电路及微能源的集成等。微型机器人是微机电系统研究的一个重要方向, 它能够进入人体血管和核电站管道这样空间狭小、结构脆弱的地方进行操作, 能够在不易被觉察的情况下完成战场侦察等军事任务。

### 1.2.3 微机电系统的主要加工工艺

微机电系统技术涉及微电子学、自动控制、光学、气动力流体力学和声学、磁学等多



种领域，是一门多学科的综合技术，它的主要研究内容包括微传感器、微致动器和复杂的微机械加工，主要包括在硅片中制造出各种微细圆孔、锥孔槽、台阶、锥体、薄膜片、悬臂梁等形态的构件，并可通过一定的工艺构成复杂的微系统。

微机械加工技术主要有：体硅微机械加工技术、表面硅微机械加工技术、LIGA 技术和键合技术。

### 1. 体硅微机械加工技术

#### (1) 化学腐蚀

腐蚀（刻蚀）是一种对材料的某些部分进行有选择去除的工艺，用它来成型和抛光，使被腐蚀物体显露出结构特征和组合特点。腐蚀方法大体分 2 种：化学腐蚀和离子刻蚀。前者用化学腐蚀液，故又叫湿法腐蚀；后者采用惰性气体，故又叫干法刻蚀。由于湿法操作简便，并可较好地控制结构轮廓，所以实际中常用湿法腐蚀。湿法腐蚀主要是氧化减薄和反应物的溶解，腐蚀过程中主要考虑边缘轮廓、厚度尺寸及表面质量的控制，还必须考虑掩膜材料的选择，以及腐蚀液的毒性和污染等。

有多种腐蚀剂可供选择使用。对硅的各向同性腐蚀，普遍采用氧化剂氮酸氢（ $\text{HNO}_3$ ）、去除剂氢氟酸（ $\text{HF}$ ）及稀释剂水（ $\text{H}_2\text{O}$ ）或乙酸（ $\text{CH}_3\text{COOH}$ ）混合成的腐蚀剂，通常称之为  $\text{HF-HNO}_2$  腐蚀系统。腐蚀中通过改变腐蚀剂的成分配比、掺杂浓度及温度，可以获得不同的腐蚀速率。

对硅的各向异性腐蚀，常用的腐蚀剂有 EDP（乙二胺—Ethylene，联氨—Diamine，邻苯二酚—Pyrocatechol）和水，还有  $\text{KOH}+\text{H}_2\text{O}$ ， $\text{H}_2\text{N}_2+\text{H}_2\text{O}$ ，以及  $\text{NaOH}+\text{H}_2\text{O}$  等。腐蚀速率依赖于晶向、掺杂原子浓度及温度。沿主晶面（100）的腐蚀速率最快，而沿（111）面速率最慢。各向异性腐蚀主要用于在硅衬底上成型各种各样的微结构，因此用途最广。

#### (2) 离子刻蚀

上面介绍了化学腐蚀方法。这种方法是先在硅晶片上用光刻胶和掩膜形成图案，然后在腐蚀液中进行腐蚀。但对于高精度图案，特别是侧面垂直度要求严格的图案，化学腐蚀法很难达到预期的效果。采用离子刻蚀，包括等离子体刻蚀、反应离子刻蚀（也称反应溅射刻蚀）等干刻蚀法，可实现较高的刻蚀精度。干刻蚀法是利用气体的等离子体生成物或者溅射进行刻蚀的。刻蚀步骤大致如下。

① 刻蚀用气体在足够强的电场作用下被电离，产生离子、电子及游离原子（又称游离基）等刻蚀类物质。