

动态微机电系统 ——理论与应用

何广平 赵 明 赵全亮 刘峰斌 编著



科学出版社

动态微机电系统——理论与应用

何广平 赵 明 赵全亮 刘峰斌 编著



NLIC2970801769

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以动态微机电系统(MEMS)为主要对象,介绍其相关的功能材料、设计方法、制造工艺以及控制方法。全书共6章,主要内容包括:动态MEMS主要技术领域的简况;动态MEMS中常用的功能材料及其制备方法;动态MEMS器件的主要设计方法及其发展现状;动态MEMS的制造工艺、常见失效模式及其克服方法;动态MEMS的控制理论基础、控制技术及其发展现状、控制实验方法等方面的论述;典型动态MEMS系统剖析。

本书可供材料类、机电工程类、自动控制类、仪器科学类等相关专业的高年级本科生和研究生作为教材使用,也可供从事MEMS功能材料、MEMS器件设计、MEMS制造工艺和MEMS控制技术研究的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

动态微机电系统:理论与应用/何广平等编著. —北京:科学出版社,2012.6
ISBN 978-7-03-034316-1

I. ①动… II. ①何… III. ①微机电 IV. ①TM38

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第095947号

责任编辑:余 丁 张海丽 / 责任校对:包志虹
责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012年6月第一次印刷 印张:24 3/4

字数:484 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

20 世纪 80 年代后期,随着微电子制造技术水平的快速提高,美国、日本、德国等一些国家的科学家开始应用微电子制造技术、超精密机械加工技术以及丝网印刷技术,尝试制作一些能活动的微小器件。在生物、医学、航空、航天、汽车等领域技术需求的推动下,微小活动器件研究对象的种类逐渐增加,制造工艺方法逐渐丰富,微机电系统(MEMS)这一名词应运而生。

30 余年来,MEMS 产品已经被广泛应用于办公设备、汽车、生物医疗、航空航天、先进武器等领域。MEMS 器件和产品高性能和低成本的特点,促使世界各国均争相大力发展 MEMS 相关技术。如今人们已经深刻体会到,MEMS 技术是影响未来世界、关系国家安全和经济繁荣的关键技术。

我国改革开放 30 多年来,虽然在各方面取得了举世瞩目的成就,但是由于工业技术基础薄弱,特别在微电子技术方面与发达国家有较大差距,导致我国的 MEMS 技术水平整体落后于世界先进水平。MEMS 技术是一个实践性很强的领域,对实验设备和科学仪器的性能等级有较高的要求。随着我国国力的增强,国家在科学技术研究领域的投入不断增加,国内越来越多的科研工作者投身这一领域的技术研究,开设 MEMS 相关课程的高校也越来越多,但是用于研究生培养的理想教材比较缺乏。

当前 MEMS 制造工艺技术较丰富成熟,国内外出版的相关教材专著较多,但是动态 MEMS 的设计理论、测试和控制技术发展滞后于制造技术。因此,动态 MEMS 的相关设计方法、制造工艺失效模式分析以及 MEMS 的测试与控制技术成为相关专业领域技术人员和初级研究者所迫切想了解的学科前沿技术。

本书以动态 MEMS 为主要对象,从功能材料的制备、设计方法、制造工艺与失效模式分析、建模与控制方法以及系统应用的角度,较深入地介绍了当前国内外的一些主要研究成果。本书主要内容取材于作者所在课题组近年来的一些科研成果,同时也对动态 MEMS 所涵盖专业领域国内外的主流前沿技术进行系统归纳,使读者能在较短时间内对动态 MEMS 的主要技术领域和前沿研究方向有所了解,并从中选择自己感兴趣的主题进一步开展研究。本书内容安排力求深入浅出,引文详实丰富,适合作为初涉本领域的研究生教材,也可供具有一定研究基础的读者参考。

本书的研究工作是在国家自然科学基金项目(50475177、20703029、50975004、51075004)、北京市自然科学基金项目(3062009)、北京市教委市属院校创新人才项

目(PHR200906107)以及北京市教委重点学科建设项目的资助下完成的。在此表示深切的谢意。

本书第1章、第3章、第5章以及第6章的6.1~6.3节由何广平撰写;第2章的2.1节和2.2节由赵明撰写;第2章的2.3节和2.4节由刘峰斌撰写,并由赵明对第2章进行统稿;第4章和第6章的6.4节由赵全亮撰写。全书由何广平统稿。在本书的撰写过程中,部分插图由研究生张颖、冯硕、李婷婷协助绘制。在此对本书的合作者和协助工作的研究生表示感谢。

MEMS技术是一个学科背景广泛的研究领域,而且发展速度很快。由于作者知识范围和学术水平有限,书中难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2011年12月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 MEMS 的基本特征和主要技术领域	2
1.3 动态 MEMS 中的常用材料	4
1.3.1 硅基材料	5
1.3.2 砷化镓	7
1.3.3 石英	7
1.3.4 压电陶瓷	7
1.3.5 聚偏二氟乙烯薄膜	8
1.3.6 磁致伸缩材料	9
1.3.7 形状记忆合金	10
1.3.8 电流变液和磁流变液材料	10
1.3.9 膨胀合金	11
1.3.10 金刚石材料	11
1.3.11 纳米相材料	12
1.4 动态 MEMS 的设计方法简介	13
1.4.1 MEMS 动力学	13
1.4.2 动态 MEMS 设计方法	14
1.5 动态 MEMS 的制造技术简介	15
1.6 动态 MEMS 的控制技术及其发展概况	17
1.7 MEMS 的应用前景	18
1.7.1 MEMS 在生物医学领域的应用	18
1.7.2 MEMS 在军事和航空航天领域的应用	20
1.7.3 MEMS 在其他方面的应用	23
参考文献	23
第 2 章 动态 MEMS 中的功能材料与制备方法	27
2.1 引言	27
2.2 动态 MEMS 压电材料	27
2.2.1 压电材料的种类	28

2.2.2 压电材料的性能及检测	36
2.2.3 压电材料的可控制备	47
2.2.4 压电材料在动态 MEMS 中的应用	59
2.3 动态 MEMS 磁致伸缩材料	61
2.3.1 磁致伸缩材料的种类	65
2.3.2 磁致伸缩材料的性能及检测	77
2.3.3 磁致伸缩材料可控制备	84
2.3.4 磁致伸缩材料在动态 MEMS 中的应用	89
2.4 动态 MEMS 形状记忆合金材料	92
2.4.1 形状记忆合金的种类	94
2.4.2 形状记忆合金的性能及影响因素	96
2.4.3 形状记忆合金材料在动态 MEMS 中的应用	100
2.5 动态 MEMS 智能高分子材料	104
2.5.1 智能高分子的种类	105
2.5.2 智能高分子材料在动态 MEMS 中的应用	111
参考文献	115
第 3 章 动态 MEMS 的设计理论与设计方法	122
3.1 引言	122
3.2 分布式全柔性微机构的拓扑优化设计方法	125
3.2.1 均匀化方法	129
3.2.2 密度法	131
3.2.3 水平集法	141
3.2.4 渐进结构法	150
3.2.5 全柔性微机构拓扑优化设计的发展趋势	152
3.3 动态 MEMS 的可靠性设计方法	153
3.3.1 基于可靠性的设计优化问题的数学模型	153
3.3.2 常用可靠性分析方法	154
3.3.3 MEMS 可靠性优化设计实例	161
3.4 电热微致动器的鲁棒优化设计	162
3.4.1 电热微致动器的鲁棒设计	163
3.4.2 电热微致动器的制造与验证	165
3.5 可变电容静电微电机的优化设计	166
3.5.1 侧面驱动可变电容静电微电机的数学模型	167
3.5.2 可变电容静电微电机的驱动方法	168
3.5.3 可变电容静电微电机的优化设计	170

3.6 动态 MEMS 设计理论的发展展望	172
参考文献	173
第 4 章 动态 MEMS 的制造技术	177
4.1 MEMS 的制造技术简介	177
4.1.1 体微机械加工技术	178
4.1.2 表面微机械加工技术	178
4.1.3 LIGA 加工技术	181
4.1.4 纳米加工技术	182
4.2 薄膜材料制备技术	184
4.2.1 真空蒸发法	184
4.2.2 溅射法	187
4.2.3 化学气相沉积法	189
4.2.4 化学溶液沉积法	192
4.3 光刻技术	195
4.3.1 掩模版	195
4.3.2 光刻胶	196
4.3.3 光刻工艺	198
4.4 刻蚀技术	201
4.4.1 湿法刻蚀简介	202
4.4.2 湿法各向同性刻蚀	202
4.4.3 湿法各向异性刻蚀	204
4.4.4 自停止刻蚀	207
4.4.5 干法刻蚀	209
4.4.6 等离子体刻蚀	210
4.4.7 离子束刻蚀/离子研磨刻蚀	216
4.5 键合工艺技术	219
4.5.1 阳极键合	219
4.5.2 Si-Si 直接键合	220
4.5.3 玻璃封接键合	221
4.5.4 金属共熔键合	221
4.5.5 冷压焊键合	222
4.5.6 引线键合	222
4.6 MEMS 制造中常见的失效模式与防止方法	223
4.6.1 黏附	224
4.6.2 磨损	226

参考文献	229
第5章 动态 MEMS 的建模与控制技术	231
5.1 引言	231
5.1.1 静电微致动器	232
5.1.2 压电微致动器	234
5.1.3 形状记忆合金微致动器	236
5.1.4 电热微致动器	238
5.2 典型动态 MEMS 的动力学模型	239
5.2.1 静电微致动器的动力学模型	240
5.2.2 压电微致动器的动力学模型	247
5.2.3 形状记忆合金微致动器的动力学模型	254
5.3 动态 MEMS 的非线性特征及其应用	261
5.3.1 MEMS 非线性动力学的多稳态特征	262
5.3.2 SMA 的变形迟滞现象在智能结构减振中的应用	272
5.4 动态 MEMS 控制技术的理论基础	275
5.4.1 非线性系统的可达性、可控性	275
5.4.2 非线性系统的运动稳定性	280
5.4.3 非线性系统的规范形	283
5.5 动态 MEMS 的控制器设计	286
5.5.1 静电微致动器控制系统的 Brunovsky 规范形	286
5.5.2 静电微致动器的滑模变结构控制	289
5.5.3 静电微致动器的有限时间稳定控制	291
5.5.4 静电微致动器的输出反馈控制	299
5.5.5 单面压电薄膜悬臂梁末端位置的滑模变结构控制方法	302
5.5.6 微致动器迟滞补偿控制的描述函数方法	305
5.5.7 微致动器迟滞补偿控制的人工智能方法	308
5.6 动态 MEMS 的控制技术实验方法	310
5.6.1 静电微致动器的控制实验	311
5.6.2 压电陶瓷微致动器的控制实验	313
5.6.3 SMA 微致动器的控制实验	317
参考文献	318
第6章 典型动态 MEMS 剖析	327
6.1 压电微致动器的电荷驱动控制	327
6.1.1 压电材料微致动器的电荷放大器	327
6.1.2 压电材料微致动器电荷驱动与电压驱动之间的关系	330

6.1.3 压电材料微致动器不同驱动方式的效果比较	331
6.2 压电微电机	332
6.2.1 压电电机的工作原理和分类	333
6.2.2 一种直径为 1.5mm 的压电超声微电机	338
6.3 旋转式静电微致动器	342
6.3.1 可变电容静电微电机简介	343
6.3.2 可变电容静电微电机的拓扑优化设计	346
6.3.3 可变电容静电微电机的制造工艺	349
6.3.4 可变电容静电微电机结构的改进	351
6.3.5 可变电容静电微电机的能效性分析	354
6.3.6 摇摆式静电微电机	361
6.3.7 静电感应微电机	371
6.4 PZT 微致动器的制备	377
6.4.1 PZT 压电膜驱动的 MEMS 微悬臂梁的制作工艺流程	377
6.4.2 4 英寸硅基 PZT 压电膜的制备	378
6.4.3 PZT 压电膜的图形化工艺	379
6.4.4 PZT 压电膜驱动的 MEMS 微悬臂梁的深硅刻蚀工艺	380
参考文献	381

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

作为微纳科学技术的重要组成部分,微机电系统(micro-electro-mechanical systems, MEMS)是以崭新的思维模式作指导,综合应用现代科学技术的先进研究成果和技术方法而诞生的一类内涵丰富的工程对象。MEMS 在尺度、构造、材料、设计方法、制造方法、工作原理、控制方法等诸多方面均与传统宏观机电系统不同,所依托的学科基础、研究手段和研究内容也与传统机械电子学不同。它的学科基础涉及现代光学、微电子学、力学、热学、声学、磁学、自动控制、仿生学、材料科学、表面物理、化学等领域,是一门多学科深度融合的综合技术。

目前被普遍接受的关于 MEMS 的定义为:由微米(10^{-6}m)和纳米(10^{-9}m)加工技术制作而成的,融合机械、电子、光、磁以及其他相关技术群为一体的、可以活动和控制的微工程系统。直观地讲, MEMS 是以微传感器、微执行器以及驱动和控制电路为基本元器件组成的、自动性能高的、可以活动和控制的、机电合一的微机械装置。近三十多年来, MEMS 技术的蓬勃发展,集中反映了人类认识和改造微观技术世界的迫切需求。它的产生不是偶然的,而是人类社会和科学技术持续发展的必然产物。

由于 MEMS 技术目前还处于快速发展之中,世界上不同地域的研究者对 MEMS 的称谓有所不同。在欧洲一些国家,如英国和德国,通常把 MEMS 称为微系统(microsystems, MST),它更强调 MEMS 中包含敏感元件、信号处理和/或致动器功能。MEMS 中一般应组合两个或多个电、磁、机、光、化学、生物或其他特性的微型元器件,并集成为一个或多个混合芯片。在日本,学者们更习惯于用微机械(micromachines)来称呼 MEMS。这主要是由于日本在发展 MEMS 的过程中,更多地借助精细机械加工技术,通过高精度大机械来制造微型机械而形成的习惯叫法。在美国,研究者更侧重于采用集成电路(IC)兼容技术加工 MEMS 元器件,将由微电子和微机械元件组成的集成微器件称为 MEMS。在国际范围内,就 MEMS 技术的发展趋势看,要将更多的功能集成到 MEMS 中,基于 IC 兼容工艺的制造技术将起主导作用。采用大机械系统所具有的超高加工精度提高 MEMS 的集成度将遇到很大困难。本书中除特别说明外,把讨论的对象均统称为 MEMS,把所涉及的技术统称为 MEMS 技术。

近十余年,在 MEMS 技术的快速发展过程中,某些研究对象和采用的技术手

段已经达到纳米量级,纳米机电系统(nano-electro-mechanical systems, NEMS)也已经被明确提出。因此关于本书的讨论对象及其研究方法,需要给出明确的尺度划分。如图 1.1 所示,一般把总体尺寸在 $1\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ 的机电系统对象称为 MEMS,而 MEMS 中部分器件的尺寸可能小于 $1\mu\text{m}$ 甚至达到纳米级。

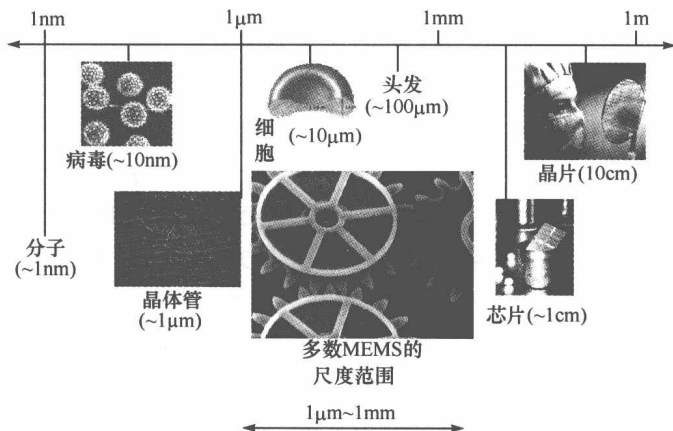


图 1.1 MEMS 的尺度范围

MEMS 具有体积小、质量轻、功耗低、响应快、智能化、可大批量生产等特点。大力发展 MEMS 技术是实现低能耗、高效功、低成本生产,解决日益严重的生态危机,维持生态平衡和社会持续发展的重要途径。

1.2 MEMS 的基本特征和主要技术领域

一个包含敏感元件、信号处理元件和/或微致动元件,其总体尺寸在 1mm 以内的机电装置,与常见宏观机电系统的主要区别就是尺度微小。因此 MEMS 的基本特点是尺度微型化和系统集成化^[1]。当一个机电装置的尺度缩小到微米甚至亚微米量级时,许多物理现象和宏观系统有很大差别。这种差别将反映到研制 MEMS 过程中的各个方面。一般把这种由于尺寸微小带来的差别统称为微尺度效应。微尺度效应主要体现在以下几个方面:

(1) 力的尺度效应。当机电装置的尺寸减小到微米以下时,与其特征尺寸 3 次方成比例的力,例如惯性力、体积力、电磁力等的作用将明显减弱;而与特征尺寸 2 次方成比例的力,例如黏性力、表面力、静电力、摩擦力等的作用明显增强,并随着 MEMS 尺度的减小而成为影响其运动规律和性能的主要因素。

(2) 表面效应。随着尺度的减小,表面积与体积之比相对增大,表面效应(例如静电力和表面凝聚力)将代替体积效应(质量)而占支配作用,因而热传导、化学

反应等均会加速,表面摩擦阻力显著增大。传统机械做功往往与体积力有关,原动件要克服的主要是系统的重力和惯性力,而在 MEMS 中,常常是表面力起主导作用,机械系统做功与表面力有关。一般用特征尺寸 L 来表征物体的大小(即该物体正好可包含在边长为 L 的正方体中):当 $L > 1\text{mm}$ 时,体积力起主导作用,这时需要的驱动力为 $F \propto L^3$;而当 $L \leq 1\text{mm}$ 时,表面力起主导作用,这时需要的驱动力为 $F \propto L^2$ 。

例如,当物体的尺寸按比例缩小到原来尺寸的 $1/10$,则物体承受的与表面积有关的力(如黏性阻力)将缩小到原来的 $1/100$,而与体积有关的重力和惯性力将缩小到原来的 $1/1000$,从而使得与表面积相关的力的作用明显增强,成为 MEMS 设计中不可忽略的因素。

(3) 误差效应。加工尺寸误差是由加工方法引入的。对于微结构,加工误差与结构尺寸之比相对增大,致使微结构的性能受到尺寸误差的影响更加明显。当尺寸误差是不确定性随机量时,批量制造的 MEMS 将表现出更大的不确定性能差别,甚至部分 MEMS 制造完成后就是失效的。

(4) 材料的尺度效应。材料晶粒间界的等凹痕效应会随着尺度减小而减轻^[1]。尺度越小,元器件材料内部缺陷出现的可能性越小,元器件材料的力学性能会明显提高。MEMS 元器件的弹性模型、抗拉强度、疲劳强度、残余应力等均与大尺寸零件有所不同。尺度微型化后材料性能和摩擦现象都将受到加工工艺的影响,当尺度减小到一定程度时,有些宏观物理量甚至要重新定义^[1]。

(5) MEMS 的加工工艺、工作方式、封装方法等与传统宏观机械系统不同。MEMS 本身结构微小,其输入-输出功率很小,容易受到环境条件的影响。特别在加工制造过程中,对环境温度、湿度、洁净度等级都有较高的要求。

(6) MEMS 的设计方法与宏观机电系统不同。由于 MEMS 加工工艺的复杂性对片上器件集成度的限制,在设计 MEMS 的过程中,必须考虑加工工艺的可行性和可靠性。由于尺度微小(这里限于 $1\mu\text{m}$ 以上),MEMS 中的机械结构通常采用细梁、薄膜、弹簧等柔性结构,这些柔性结构的设计需要基于连续介质力学和固体力学的方法进行系统分析和设计。对于结构比较复杂的 MEMS 系统,其准确建模和仿真分析十分困难,一般采用有限元、边界元法等数值方法进行分析、计算和模拟仿真。通常 MEMS 还需要利用多种不同的物理或化学原理实现整体功能,面临的设计问题往往是多场耦合设计问题,如常见的光、机、电、热、磁、生物、化学等多学科融合下的多场耦合问题。这需要发展专门的设计软件,如 MEMS CAD,而这种 MEMS 设计软件的开发将是一个庞大复杂的系统工程。

(7) MEMS 的控制方法与宏观系统不同。MEMS 一般是高灵敏度的动态系统,其控制需要以动力学为基础进行建模和控制器设计。MEMS 动力学控制模型几乎均为非线性系统。目前一般 MEMS 的控制系统是通过集成电路搭建的,甚至

有些还需要借助计算机为平台实现 MEMS 的控制。要提高 MEMS 的集成度和工作可靠性,就需要发展 MEMS 的片上控制技术研究。这将更多地依赖模拟和数字电路设计技术的发展,并需要控制理论和控制工程方面的科研人员发明适合 IC 制造技术实现的 MEMS 控制方法。

(8) MEMS 中的有用信号十分微弱。MEMS 输入/输出功率十分微小,其中有用信号的强度很小。对这些微弱有用信号进行检测需要借助复杂庞大的高性能仪器和贵重设备,这给很多想从事 MEMS 技术研究的科研人员造成很大障碍。因此,微弱信号的检测技术和低成本检测仪器研制是当前 MEMS 研究面临的主要困难之一。

尽管 MEMS 研究中面临很多难题,在社会发展巨大需求的推动下,越来越多不同学科领域的科学家和工程技术人员被吸引到这一领域进行研究。本书试图以动态 MEMS 为主题,将其所涉及的主要学科领域,如材料、设计、制造、控制等方面的部分主要研究结果进行系统整理,并在后续章节中进行详细介绍和讨论。

1.3 动态 MEMS 中的常用材料

MEMS 中所用的材料一般需要同时满足结构、力学、电学等方面的性能。对于生物医学和生物化验方面的器件,还需要考虑材料的生物兼容性和抗生物降解性^[2]。

大多数 MEMS 器件是在衬底上制作的。衬底所用的材料通常包括单晶硅、单晶石英、熔凝石英、砷化镓、玻璃、高分子聚合物等。尽管传统上 MEMS 是基于硅材料制造,但是随着 MEMS 技术研究的深入和 MEMS 种类的逐渐丰富,所用的材料种类也逐渐增多。表 1.1 中列出了几种 MEMS 中常用材料的特性参数。需要了解更详细的有关半导体材料方面的内容,可参阅文献[3]和[4]。本书的第 2 章将对动态 MEMS 中常用的几种功能材料进行较为系统详细的介绍。

表 1.1 MEMS 中几种常用材料的性能参数^[2]

性质	Si(110)	SiO ₂	Si ₃ N ₄	石英	SiC	Si(111)	不锈钢	Al
杨氏模量/GPa	160	73	323	107	450	190	200	70
屈服强度/GPa	7	8.4	14	9	21	7	3	0.17
泊松比	0.22	0.17	0.25	0.16	0.14	0.22	0.3	0.33
密度/(kg/m ³)	2.4×10 ³	2.3×10 ³	3.1×10 ³	2.65×10 ³	3.2×10 ³	2.3×10 ³	8×10 ³	2.7×10 ³
热膨胀系数/℃	2.6×10 ⁻⁶	0.55×10 ⁻⁶	2.8×10 ⁻⁶	0.55×10 ⁻⁶	4.2×10 ⁻⁶	2.3×10 ⁻⁶	16×10 ⁻⁶	24×10 ⁻⁶
300K 时的热导率/(W/m·K)	1.57	0.014	0.19	0.0138	5	1.48	0.2	2.37
熔融温度/℃	1415	1700	1800	1610	2830	1414	1500	660

注:开尔文温度与摄氏温度在数量上相差 273.15,即水的冰点摄氏温度为 0℃,开尔文温度为 273.15K。

1.3.1 硅基材料

1. 单晶硅

硅在集成电路和微电子器件生产中有着广泛的应用,主要是利用硅的电学性能。在 MEMS 中,则同时利用硅材料的机械性能和电学性能。地球上硅材料储量丰富,成本较低。硅晶体生长容易,并能够获得超纯无杂质材料,因而本身的内耗小,机械品质因数可达 10^6 量级。设计得当的活动微结构(如微机械传感器),能获得极小的迟滞和蠕变、极佳的重复精度和长期工作的稳定性^[3]。

硅材料的质量轻,密度为 $2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,是不锈钢密度的 $2/7$,而弯曲强度却是不锈钢的 3.5 倍,具有较高的强度/密度比和较高的刚度/密度比。单晶硅具有很好的导热率,是不锈钢的 5 倍,而热膨胀系数却不到不锈钢的 $1/7$,能很好地和膨胀合金连接,并避免产生热应力。

单晶硅为各向异性材料,许多机械和电学特性取决于单晶硅的晶向,例如其弹性模量、压阻效应等。单晶硅的电阻应变灵敏度系数高。在同样的输入下可得到比金属应变计更高的信号输出,一般为金属的 $10 \sim 100$ 倍,能在 10^{-6} 量级上敏感输入信号。硅材料的制造工艺与集成电路工艺有很好的兼容性,便于微型化、集成化及批量生产。硅可以用许多材料覆盖,如氮化硅、氧化硅等,能够获得优异的防腐介质保护和较持久的耐磨性。正是这些优点,使得硅材料成为制造 MEMS 的最主要材料。但是硅材料对温度极为敏感,其电阻温度系数接近 $2 \times 10^{-3}/\text{K}$ 的量级。因此基于硅的压阻效应设计制造传感器时,需要进行温度补偿。当然也可以利用硅材料的这种温度敏感特性直接对温度进行测量。

2. 多晶硅

多晶硅是单晶硅晶粒的聚合物。在多晶硅中,硅晶体的排列是无序的,不同晶粒有不同的单晶取向,而每一晶粒内部有单晶的特征。因此多晶硅可看作各向同性材料。单晶硅和多晶硅的电学特性可以通过控制掺杂化学元素的原子浓度来调节。随着掺硼原子浓度的增大,单晶硅和多晶硅的电阻率均会下降。但总体来讲,多晶硅的电阻率要高于单晶硅的电阻率。特别在掺硼原子浓度较低时,多晶硅的电阻率要比单晶硅的电阻率高很多。多晶硅薄膜可以在多种硅化合物材料(例如 SiO_2 、 Si_3N_4)衬底上制作。其制备过程与常规 IC 工艺兼容。在相同温度条件下,多晶硅薄膜比单晶硅薄膜具有更好的温度稳定性。多晶硅薄膜一般通过低压化学气相沉积(LPCVD)方法制备。

3. 氧化硅

硅在 MEMS 中获得广泛应用的重要原因之一就是它在加热过程中能获得稳

定的氧化物(SiO_2),且氧化硅的生长厚度是可控的。在硅晶片上生长氧化硅,一般可以通过3种方法实现,即干氧化法、湿氧化法以及水汽氧化法。干氧化法得到的氧化层品质好,但是生长速度慢。湿氧化法生长氧化硅的速度快,但是氧化层的品质低。水汽氧化法生长氧化硅的速度最快,获得的氧化层的品质也最差(这3种方法生长氧化硅的特点比较见参考文献[5]。关于氧化硅生长的更详细的介绍见参考文献[6])。氧化硅在MEMS中主要有3种用途:①作为热和电的绝缘体;②作为硅衬底的掩模;③作为表面微加工工艺中的牺牲层。

无论采用哪种方法制作的氧化硅薄膜都有很高的残余内应力,需要进行退火处理。

4. 氮化硅

氮化硅(Si_3N_4)在用于MEMS中有很多突出特性:它能够有效阻挡水和离子的扩散^[7];氮化硅的超强抗氧化和抗腐蚀能力使其适合作深层刻蚀时的掩模;氮化硅可用作光波导以及防止水和其他有毒流体进入衬底的密封材料;氮化硅还可被用作高强度电绝缘层和离子注入时的掩模。氮化硅是通过LPCVD或PECVD(等离子增强化学气相沉积)工艺在含硅气体和氨气(NH_3)氛围中通过化学反应获得。例如



在衬底上沉积氮化硅薄膜后,也会有很大的残余应力。

5. 碳化硅

碳化硅(SiC)在MEMS中的基本应用是利用其在高温下尺寸和化学性质的稳定性^[7]。在很高的温度下,碳化硅对氧化也有很高的抵抗力。通常在MEMS器件中沉积碳化硅薄膜用于防止本体材料被高温破坏。另外采用基于铝掩模的干法腐蚀能够很容易实现碳化硅的薄膜的图形化。由于常用的刻蚀剂(如KOH和HF)难以腐蚀碳化硅,图形化后的碳化硅薄膜可进一步用作微加工中下层硅衬底的保护层。制作碳化硅薄膜,对于单晶硅可以采用外延生长方法,对于多晶硅可以采用化学气相沉积方法(CVD)。

6. 硅-绝缘层

硅-绝缘层(silicon on insulator, SOI)材料是指在硅晶片中包含一层绝缘层。包含的绝缘层通常是氧化硅。埋入的氧化层可通过离子注入或晶片键合方法制造^[2]。绝缘层还可以是蓝宝石($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$),硅-蓝宝石材料是通过外延生长工艺将硅晶体生长在蓝宝石衬底上形成的^[3]。硅晶体可以认为是蓝宝石的延伸部分,两者构成硅-蓝宝石SOS(silicon on sapphire)晶片。蓝宝石材料的迟滞和蠕变极小,

可以忽略不计。蓝宝石材料还是一种惰性材料,化学稳定性好,耐腐蚀抗辐射性能强。蓝宝石材料的机械强度也很高。因此利用硅-蓝宝石材料,可以制作出具有优良性能的传感器和电路。在采用这类复合材料时,需要解决材料之间的热匹配问题。

1.3.2 砷化镓

砷化镓(GaAs)是一种半导体化合物,由等量的砷原子和镓原子组成。砷化镓的晶格结构比较复杂,比硅材料难于应用。砷化镓是用于光电器件的优秀材料^[7]。这主要是由于砷化镓的电子迁移率高,电流流入更容易。通常被用于激光和一般光电器件,或用于高频元件。砷化镓在高温下具有优异的尺寸稳定性,也可作为良好的绝热层使用。砷化镓的主要缺点是这种材料的屈服强度较低,仅为硅材料的1/3。砷化镓在半导体工业领域应用较少,价格比较昂贵。

1.3.3 石英

石英的化学成分为 SiO_2 ,氧化硅的晶体形态就是石英晶体(quartz)。石英的一个单位晶胞是四面体形状,3个氧原子分别位于四面体底部的3个顶点,一个硅原子位于四面体的另一定点上^[7]。垂直于基面的轴称为Z轴(光轴)。石英晶体结构是6个硅原子组成的圆环。这种晶体材料是用作传感器的理想材料,它具有几乎绝对的尺寸热稳定性。石英材料的价格不贵,在工业领域有广泛的应用,例如石英表、滤波器、谐振器等。石英材料也是优异的电绝缘材料。它对紫外光还是透明的,可用于流体环境中的成分探测。石英材料的硬度很高,通常采用金刚石刀具或 $\text{HF}/\text{NF}_4\text{F}$ 等化学刻蚀方法进行加工。石英晶体是压电功能材料,只是其压电系数很小,很少作为致动器材料应用,通常用于制造谐振器、振荡器、滤波器等。

1.3.4 压电陶瓷

压电效应是法国物理学家居里兄弟于1880年发现的。当给一些天然晶体(如石英、电气石、罗谢尔盐等)施加压力时,在这些天然晶体的表面会产生一定数量的电荷,而且所产生的电荷数量与施加的压力成正比,这种现象就称为压电效应。压电效应的存在是有一定阈值的,当压电材料的温度超过一定值时,压电效应便不再存在,这一临界温度称为压电材料的居里温度,也称为居里点。天然压电晶体的居里温度一般说来是固定不变的,而人工压电晶体,如压电陶瓷等,其居里温度可以通过成分、配方、工艺等的改变而加以调整,以适应不同应用的需要。

压电材料的主要特性是:弹性效应和电极化效应在机械应力或电场作用下将发生相互耦合,耦合关系可以表示为