

高等院校微电子专业丛书

微纳传感器及其应用

朱 勇 张海霞 编著

Micro - Nano
Sensors and Applications



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

高等院校微电子专业丛书

内容简介

微纳传感器及其应用

朱 勇 张海霞 编著

由于微纳传感器的发展日新月异，本书在编写过程中参考了大量的文献及文字录入工作，在这里表示感谢；同时还感谢参加本书编写工作的各位同仁，第八章借鉴了许多他们的创意和参考文献，本书也将作为美新杯大赛的参赛作品。

本书是在北京大学出版社的关心下表示感谢。

TM38

2892



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

定价：28.00元

内 容 简 介

本书约 32 万字,共分八章。第一章对 MEMS 进行了概述,简要介绍了 MEMS 技术的定义、基础理论、制造技术及应用;其后的第二~七章分别以机械微传感器、热微传感器、磁微传感器、光学微传感器与辐射微传感器、化学微传感器与生物微传感器和声波微传感器为主题,介绍了不同种类微传感器的原理及应用;最后第八章介绍了一些传感器的应用实例。各章节后均有习题和参考文献。

本书可作为本科生教材,也可供从事传感器工作的教学、科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微纳传感器及其应用/朱勇,张海霞编著. —北京:北京大学出版社,2010.7

(高等院校微电子专业丛书)

ISBN 978-7-301-17378-7

I. 微… II. ①朱…②张… III. 微电机—传感器—高等学校—教材 IV. ①TM38
②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 116434 号

书 名:微纳传感器及其应用

著作责任者:朱 勇 张海霞 编著

责任编辑:王 华

标准书号:ISBN 978-7-301-17378-7/TN·0059

出版发行:北京大学出版社

地 址:北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址:<http://www.pup.cn> 电子信箱:zpup@pup.pku.edu.cn

电 话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752038 出版部 62754962

印 刷 者:北京中科印刷有限公司

经 销 者:新华书店

787mm×980mm 16 开本 12.75 印张 320 千字

2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

定 价:28.00 元

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

举报电话:(010)62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

前 言

当今信息技术是建立在信息获取、信息传输和信息处理三大基础之上的技术,与之相对应的就是传感技术、通信技术和计算机技术,它们分别构成了信息技术系统的感官、神经和大脑。传感技术特别是新型微纳传感技术的水平直接影响检测控制系统和信息系统的技术水平。

由于传感器的空前发展,人们对这方面知识的需求越来越迫切。虽然目前已有不少关于传感器方面的书籍,但仍然不能满足当前人们的实际需求。为此,我们应高等院校师生和广大科研人员、工程技术人员的要求,组织有教学、科研经验的专家、教授,编写了能满足当前传感器教学的《微纳传感器及其应用》一书。

北京大学的张海霞教授负责本书的统稿和审阅,并完成了一、三、五、七章的编写,黑龙江大学朱勇副教授编写二、四、六、八章的内容。在本书的编写过程中王萍、姜威、柴智进行了大量的绘图及文字录入工作,在这里表示感谢;同时还要感谢参加美新杯大赛的许多同学,第八章借鉴了许多他们的创意和参赛项目书,能为今后参加相关大赛的选手提供帮助。这本书也将作为美新杯大赛的参考书,欢迎大家登录网站进行交流: <http://www.icancontest.org>。

由于微纳传感器的发展日新月异,编写时间仓促,加之编者水平有限,书中难免存在错误和不足之处,敬请广大读者批评、指正。

本书是在北京大学出版社的大力支持和帮助下出版的,作者对他们的关心和辛勤劳动衷心地表示感谢。

编者

2010年5月

目 录

第一章 MEMS 概论	(1)
1.1 MEMS 的定义	(1)
1.2 MEMS 的基础理论	(1)
1.2.1 微机械常用材料	(1)
1.2.2 微机械的固体力学问题	(4)
1.2.3 微机械的工作原理	(6)
1.2.4 微构造特性	(6)
1.3 MEMS 的制造技术	(8)
1.3.1 微电子加工工艺	(8)
1.3.2 精密加工	(9)
1.3.3 特种加工	(9)
1.4 MEMS 技术的应用	(10)
1.4.1 MEMS 传感器的应用	(10)
1.4.2 射频 MEMS 器件的应用	(11)
1.4.3 生物 MEMS 的应用	(12)
1.4.4 光学 MEMS 的应用	(13)
1.5 MEMS 的发展前景	(14)
习题	(15)
参考文献	(15)
第二章 机械微传感器的应用	(17)
2.1 位移微传感器	(17)
2.1.1 基本概念	(17)
2.1.2 电容和电感式位移微传感器	(17)
2.1.3 光学位移微传感器	(17)
2.1.4 超声波位移微传感器	(18)
2.2 速度和流速微传感器	(19)
2.2.1 基本概念	(19)

2.2.2	热电式流速微传感器	(19)
2.2.3	电容式流量微传感器	(21)
2.2.4	压阻式流量微传感器	(22)
2.2.5	共振桥式流量微传感器	(23)
2.3	微型加速度计	(24)
2.3.1	基本概念	(24)
2.3.2	压阻式微加速度计	(26)
2.3.3	压电式微加速度传感器	(28)
2.4	力、压强和应变微传感器	(30)
2.4.1	基本概念	(30)
2.4.2	力微传感器	(31)
2.4.3	应力敏感的电子器件	(31)
2.4.4	硅微压强传感器	(32)
2.4.5	电阻式应变微传感器	(33)
2.5	质量微传感器	(34)
2.5.1	基本概念	(34)
2.5.2	压电式质量微传感器	(34)
2.5.3	表面声波谐振传感器	(35)
	习题	(35)
	参考文献	(35)
第三章	热微传感器的应用	(37)
3.1	热机械传感器	(37)
3.2	热敏电阻	(40)
3.2.1	热阻效应	(40)
3.2.2	金属热敏电阻	(40)
3.2.3	半导体热敏电阻	(43)
3.3	热二极管	(46)
3.3.1	基本原理	(46)
3.3.2	集成的热二极管	(48)
3.4	热晶体管	(49)
3.4.1	基本原理	(49)
3.4.2	集成的热晶体管	(49)
3.5	热电偶	(50)

3.6 其他电测量热微传感器	(54)
3.6.1 热开关	(54)
3.6.2 微热量计	(54)
3.7 其他非电测量热微传感器	(54)
3.7.1 温度计	(54)
3.7.2 温度指示器和光纤传感器	(55)
3.7.3 表面声波温度微传感器	(56)
习题	(57)
参考文献	(57)
第四章 磁微传感器的应用	(59)
4.1 霍尔效应器件	(60)
4.1.1 霍尔效应	(60)
4.1.2 霍尔器件的工作原理	(61)
4.1.3 半导体中的霍尔效应	(63)
4.1.4 霍尔传感器	(63)
4.2 磁阻效应器件	(73)
4.2.1 磁阻效应	(73)
4.2.2 磁阻器件	(76)
4.2.3 磁阻传感器的应用举例	(78)
4.3 磁敏二极管和磁敏三极管	(80)
4.3.1 磁敏二极管	(80)
4.3.2 磁敏三极管	(84)
4.4 磁通门微磁强计	(88)
4.4.1 磁通门微磁强计的结构	(88)
4.4.2 磁通门微磁强计的原理	(89)
4.4.3 磁通门微磁强计的应用	(89)
4.5 隧道效应磁强计	(90)
4.5.1 隧道效应磁强计的结构	(90)
4.5.2 隧道效应磁强计的原理	(91)
4.5.3 隧道效应磁强计的性能参数	(91)
4.6 超导量子干涉磁强计	(92)
4.6.1 约瑟夫森效应	(92)

4.6.2	磁场对直流约瑟夫森效应的影响	(93)
4.6.3	SQUID 器件	(94)
	习题	(95)
	参考文献	(95)
第五章	光学微传感器与辐射微传感器应用	(97)
5.1	光学微传感器	(97)
5.1.1	光学微传感器的主要性能参数	(99)
5.1.2	直接型光学传感器	(100)
5.1.3	光敏电阻传感器	(103)
5.1.4	间接光学微传感器	(113)
5.2	辐射微传感器	(114)
5.2.1	辐射粒子	(114)
5.2.2	光谱	(115)
5.2.3	核辐射传感器	(117)
	习题	(120)
	参考文献	(120)
第六章	化学微传感器与生物微传感器的应用	(121)
6.1	化学微传感器	(121)
6.1.1	离子敏传感器	(121)
6.1.2	气敏传感器	(127)
6.1.3	湿敏传感器	(131)
6.2	生物微传感器	(132)
6.2.1	酶传感器	(133)
6.2.2	微生物传感器	(134)
6.2.3	组织传感器	(136)
6.2.4	细胞传感器	(137)
6.2.5	免疫传感器	(138)
6.2.6	基因芯片	(140)
	习题	(141)
	参考文献	(141)

第七章 声波微传感器的应用	(143)
7.1 声波微传感器概述	(143)
7.1.1 声波技术和压电效应	(143)
7.1.2 声波的传播	(144)
7.1.3 声波的探测	(147)
7.2 体声波微传感器	(149)
7.2.1 TSM 谐振器	(149)
7.2.2 SH-APM 传感器	(150)
7.3 表面声波微传感器	(151)
7.3.1 表面声波的类型	(151)
7.3.2 表面声波的激发	(152)
7.3.3 基本的 SAW 器件	(154)
7.3.4 SAW 传感器的测量原理	(154)
习题	(156)
参考文献	(156)
第八章 微纳传感器应用实例	(158)
8.1 基于手势识别的多功能电子钥匙	(158)
8.1.1 项目介绍	(158)
8.1.2 项目原理	(158)
8.1.3 项目设计方案	(159)
8.2 基于地磁传感器的数字指南针	(161)
8.2.1 项目介绍	(161)
8.2.2 项目原理	(161)
8.2.3 项目设计方案	(162)
8.2.4 项目优点	(165)
8.3 新型宠物伴侣	(165)
8.3.1 项目背景	(165)
8.3.2 设计方案	(165)
8.3.3 系统设计	(167)
8.3.4 软件方案	(169)
8.3.5 系统测试	(172)
8.3.6 市场前景展望	(173)

8.4 电子便携导盲棒	(173)
8.4.1 项目介绍	(173)
8.4.2 项目原理	(174)
8.4.3 项目设计方案	(174)
8.4.4 市场展望	(176)
8.5 多功能水蒸发器	(176)
8.5.1 项目介绍	(176)
8.5.2 项目原理	(176)
8.5.3 项目设计方案	(177)
8.5.4 市场调查分析	(178)
习题	(179)
参考文献	(179)
附录A 美新产品	(180)
A.1 美新加速度传感器	(180)
A.2 美新磁传感器——MMC212xMG	(182)
A.3 美新流量传感器——MFC001	(183)
附录B 敏芯产品	(186)
B.1 敏芯微电子压力传感器——MSPA15A	(186)
B.2 敏芯微电子硅麦克风声学传感器——MSMAS42Z	(187)
附录C 微电子学常用词及缩略语	(190)

第一章 MEMS 概论

1.1 MEMS 的定义

微电子机械系统(micro electro mechanical systems, MEMS)技术是建立在微米/纳米技术(micro/nano technology)基础上的前沿技术,是指对微米/纳米材料进行设计、加工、制造、测量和控制的技术。MEMS 是微机械(微米/纳米级)与集成电路(integrated circuit, IC)集成的微系统,是一种具有智能的微系统。MEMS 就是对系统级芯片的进一步集成,我们几乎可以在单个芯片上集成任何东西,像机械构件、驱动部件、光学系统、发音系统、化学分析、无线系统、计算系统、电控系统集成成为一个整体单元的微型系统。因此, MEMS 技术是一门多学科交叉的技术。

微电子机械系统不仅能够采集、处理与发送信息或指令,还能够按照所获取的信息自主地或根据外部的指令采取行动。它既可以根据电路信号的指令控制执行元件实现机械驱动,也可以利用传感器探测或接受外部信号。传感器将转换后的信号经电路处理,再由执行器变为机械信号,完成执行命令的操作。它用微电子技术和微加工技术相结合的制造工艺,实现了微电子与机械装置的融合,制造出各种性能优异、价格低廉、微型化的传感器、执行器、驱动器、信号处理和电路、接口电路和微系统。

MEMS 用于传统大尺寸系统所不能完成的任务,也可以把独立的微传感器和微执行器直接嵌入到大尺寸系统中。习惯上依据机械器件结构的尺寸,将特征尺寸在 $1\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 范围内的机械称为微型机械,特征尺寸在 $1\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$ 的机械称为纳米机械。由这些微机械所构成的机电系统称为微纳机电系统。

1.2 MEMS 的基础理论

1.2.1 微机械常用材料

在微机械中通常使用的功能材料是硅,硅材料发挥着重要的作用,主要原因是硅材料含量丰富、具有优良的机械特性和电性能,而且在微电子加工中有现成的加工工艺。除了硅材料外,还有金属及金属氧化物、陶瓷和聚合物等材料可用。微机械常用材料的用途、制作工艺及特征如表 1-1 所示。

表 1-1 微机械使用的材料和特性

名 称	用 途	制作工艺	特 征
聚酰亚胺	构造材料	半导体工艺	性能稳定、有柔性、成膜简单
钨	构造材料	半导体工艺	
铝	构造材料	半导体工艺	有韧性、不溶于氢氟酸
铜、镍、金	构造材料	电镀	有韧性
CaAs	光学器件	半导体工艺	受光、发光、可动构造
石英	执行器	各向异性腐蚀	绝缘、透明、具有压电性
ZnO	执行器	半导体工艺	具有压电性
压电陶瓷 PZT (PbZrO ₃ 和 PbTiO ₃ 的固溶体) 又称锆钛酸铅	执行器	厚膜工艺	强压电性
TiNi	执行器	半导体工艺	形状记忆合金
Si ₃ N ₄	润滑膜	半导体工艺	高强度、稳定、绝缘
类金刚石碳 (diamond-like carbon, DLC)	润滑膜	半导体工艺	金刚石膜

1. 硅

硅具有以下优点：

- (1) 硅具有优良的机械特性，其力学性能稳定，比不锈钢的拉伸强度高，硬度高，弹性好，抗疲劳。
- (2) 熔点高达 1400℃，是铝的两倍。
- (3) 无机械延迟。
- (4) 硅片表面光洁，利用光刻技术和自动生产线可廉价大量生产。

硅材料多制成单晶硅芯棒，单晶硅是微电子机械系统用做衬底的主要材料。单晶硅具有良好的机械物理性能，性能稳定。硅晶体的晶格缺陷少，经过微细加工后，容易获得平整的表面。单晶硅具有压电、电磁、热敏等多种效应，因此可用于加工微传感器和微执行器。硅化物主要包括多晶硅、氧化硅、碳化硅和氮化硅，都是微电子机械系统常用材料。

2. 金属及金属氧化物

薄膜金属厚膜结构是用来制造微电子机械系统部件的，大多数厚膜金属被用做末级部件结构材料，或者用做陶瓷微膜上聚合物的镶嵌部件。用于 MEMS 的各种合金及其相关工艺也得到了很好的发展，目前最常用的形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)为铜基合金，其具有成本低、热导率高、反应时间短的优点。CoNiMn 薄膜已被用做磁执行器中的永久磁性材料；NiFe 坡莫合金厚膜已被用于硅片的衬底；1963 年发现的 TiNi 合金具有形状记忆效应，已经有人将其用在衬底上，用于表面贴装组件的感测和制动，如剑桥大学研制的 SMA 驱动微泵，通过在 TiNi 合金上加不同的温度来驱动 TiNi 合金上下震动，从而能带动多晶硅膜也随之震动，实现微泵的制动。

通常都用 ZnO 薄膜制备声波传感器。体声波情况下的调谐来回插入损耗，表面声波情

况下的延迟线、旋转器、相关器等输出插入损耗及相位特性都可用来测量溅射的 ZnO 薄膜。ZnO 可以用激光辅助的真空蒸发获得,这种方法使用了 CO₂ 激光和 ZnO 薄膜。激光辅助蒸发 ZnO 薄膜具有某些特别的优点。首先,整个工艺是没有污染的;其次,可以蒸发多种大面积的原材料;最后,可现场退火。

3. 陶瓷

陶瓷是用于 MEMS 的一种主要材料,又称为精细陶瓷材料,通过控制化学合成物质的比例及精密成型烧结,加工成适合微机电系统的陶瓷。对某些特殊用途的 MEMS 而言,薄膜陶瓷和三维(3D)陶瓷则是必不可少的结构材料。陶瓷在微机电系统中主要用于微传感器和微执行器的基板和封装材料,他们主要用的陶瓷材料是压电陶瓷,压电陶瓷又分为正压电效应和逆压电效应。

某些电介质在沿一定方向上受到外力的作用而变形时,其内部会产生极化现象,同时在它的两个相对表面上出现正负相反的电荷。当外力去掉后,它又会恢复到不带电的状态,这种现象称为正压电效应。当作用力的方向改变时,电荷的极性也随之改变。相反,当在电介质的极化方向上施加电场,这些电介质也会发生变形,电场去掉后,电介质的变形随之消失,这种现象称为逆压电效应,或称为电致伸缩现象。电解质受力所产生的电荷量与外力的大小成正比。压电式传感器大多是利用正压电效应制成的,依据电介质压电效应研制的一类传感器称为压电传感器。

用逆压电效应制造的变送器可用于电声和超声工程。压电敏感元件的受力变形有厚度变形型、长度变形型、体积变形型、厚度切变型、平面切变型等 5 种基本形式。压电晶体是各向异性的,并非所有晶体都能在这 5 种状态下产生压电效应。例如石英晶体就没有体积变形压电效应,但具有良好的厚度变形和长度变形压电效应。

压电陶瓷是功能陶瓷中应用极广的一种。日常生活中很多人使用的“电子打火机”和煤气灶上的电子点火器,就是压电陶瓷的一种应用。点火器就是利用压电陶瓷的压电特性,向其上施加力,使之产生十几千伏(kV)的高电压,从而产生火花放电,达到点火的目的。

压电陶瓷实际上是一种经过极化处理的、具有压电效应的铁电陶瓷,它是能够将机械能和电能互相转换的功能陶瓷材料。压电陶瓷材料性能优异,制造简单,成本低廉,应用广泛。例如陶瓷滤波器、声表面波器件、电光器件、红外探测器件和压电陀螺等。

(1) 细晶粒压电陶瓷。

以往的压电陶瓷是由几微米至几十微米的畴晶粒组成的多晶材料,尺寸已不能满足需要了。减小粒径至亚微米级,可以改进材料的加工性,可将基片做得更薄,以提高阵列频率,降低换能器阵列的损耗,提高器件的机械强度,减小多层器件每层的厚度,从而降低驱动电压,这对提高叠层变压器、制动器都是有益的。减小粒径有上述如此多的好处,但同时也带来了降低压电效应的影响。为了克服这种影响,人们更改了传统的掺杂工艺,使细晶粒压电陶瓷压电效应增加到与粗晶粒压电陶瓷相当的水平。现在制作细晶粒材料的成本已可与普通陶瓷竞争了。近年来,人们用细晶粒压电陶瓷进行了切割研磨研究,并制作出了一些高

频换能器、微制动器及薄型蜂鸣器(瓷片 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 厚),证明了细晶粒压电陶瓷的优越性。

(2) $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ 。

$\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ 又称为 PZT,它们具有高的压电耦合系数和介电系数,因此很适合微传感器。在某些条件下,PZT 的压电耦合系数要比 ZnO 或 ALN 大一个数量级。此外,它们还具有大的热电响应和大的自生极化,因而成为 IR 探测器和非易失性存储器的重要材料。目前,已提出了大量的有关 PZT 的应用,并且有些已经经过详尽的研究,例如 SAW 延迟线、热电传感器和存储器件。关于制备 PZT 薄膜方法的研究也延续了十余年,其中包括电子束蒸发、射频 (radio frequency, RF) 溅射、离子束沉积、RF 溅射的外延生长、磁控溅射、MOCVD、激光融化以及溶胶-凝胶法,而研究最多的是物理的 RF 溅射和化学的溶胶-凝胶法。

(3) 压电陶瓷-高聚物复合材料。

无机压电陶瓷和有机高分子树脂构成的压电陶瓷-高聚物复合材料,兼备无机和有机压电材料的性能,并能产生两相都没有的特性。因此,可以根据需要,综合二相材料的优点,制作良好性能的换能器和传感器。它的接收灵敏度很高,比普通压电陶瓷更适合于水声换能器。在其它超声波换能器和传感器方面,压电复合材料也有较大优势。

(4) 压电性特异的多元单晶压电体。

传统的压电陶瓷较其它类型的压电材料压电效应要强,从而得到了广泛应用。但作为大应变、高能换能材料,传统压电陶瓷的压电效应仍不能满足要求。铁电压电学者们称这类材料的出现是压电材料发展的又一次飞跃。现在美国、日本、俄罗斯和中国已开始进行这类材料的生产工艺研究,它的批量生产的成功必将带来压电材料应用的飞速发展。

4. 聚合物

聚合物分子一般较大,是由小分子构造而成的链状分子。MEMS 正致力于使用聚合物材料,它们有着吸引人的特点:可铸性、一致性、易沉淀、薄厚膜、聚合物具有半导体甚至金属性质和其分子结构有着广泛的可选性。

聚合物 MEMS 是指使用聚酰亚胺等树脂原料的 MEMS 技术。与硅相比,具有柔软、易弯曲、光学性质和生物兼容性的特点,而且还具有易于加工技术和低成本的特点。基于聚合物 MEMS 的加工可以使用不同于使用硅和玻璃材料的 MEMS 元件的技术。其代表就是将模具压到材料上进行加工的压印技术,采用聚合物薄膜、聚合物厚膜和三维聚合物微型结构已经制造各种聚合物部件。

最近几年,有相当多的聚合物材料被应用到微机电系统中,例如聚酰亚胺、SU-8、液晶聚合物、聚二甲基硅氧烷、聚甲基丙烯酸甲酯、聚对二甲苯和聚四氟乙烯等。

1.2.2 微机械的固体力学问题

随着人们对固体材料强度和破坏机理的研究不断深入,人们对材料力学行为的认识已由宏观层次逐步向着微观层次深入。微机电系统与微电子技术的区别就在于器件内部存在机械运动,而力学作为工程学科的分支,主要研究物体的受力及其产生的运动问题。在微

机电系统中,无论是压力传感器的变形运动还是加速度传感器的缸体运动,都要对物体的运动进行研究。在 MEMS 中所涉及到的固体力学问题包括尺寸效应、膜的力学问题、弹性力学问题和梁的力学问题。

区别于常规尺寸,当物体尺寸的减少导致的新现象和新规律可归结于微尺寸效应。而新规律和新现象的产生必然有其物理上的内在原因。尺寸效应可分为两类:第一类是当物体的尺寸与载能粒子的平均自由程相当或者稍大时,常规尺度下的连续介质假定不再成立。第二类是当物体的尺寸还没有小到连续介质假定不能成立的程度,所有常规尺寸下的基本方程和定律还适用,只是由于小的尺寸使得影响物理量的各因素的相对关系的重要性发生改变,从而呈现出新的规律和现象。MEMS 技术中的尺寸效应主要属于第二类。由于 MEMS 的尺寸很小,各种物理性能都发生了改变,在宏观系统中的主导量在微型化后将退居次要位置,而在宏观系统中被认为忽略的物理量,在 MEMS 中却成为了影响其性质的主要因素。例如,惯性力比重力缩小得快,固有频率随着尺寸的减小反而增大,长度的尺寸变化要比面积减小得慢。

随着器件或系统的尺寸缩小,它们的性能变化规律如表 1-2 所示。

表 1-2 物理参数的尺寸效应

参 数	符 号	表达式	尺寸效应	备 注
长度	L	L	L	
表面积	S	$\propto L^2$	L^2	
体积	V	$\propto L^3$	L^3	
质量	m	ρV	L^3	
压力	f_p	Sp	L^2	
重力	f_g	mg	L^3	
惯性力	f_i	md^2x/dt^2	L^4	x : 位移量
摩擦力	f_f	$\mu S/d (dx/dt)$	L^2	μ : 弹性系数, d : 间隔
弹性力	f_e	$eS\Delta L/L$	L^2	e : 杨氏弹性模量
线性弹性系数	K	$2uV/(\Delta L)^2$	L	u : 单位体积伸长所需能量
固有振动频率	ω	$\sqrt{(K/m)}$	L^{-1}	
转动惯量	I	amr^2	L^5	a : 常数
重力产生的绕度	D	m/K	L^2	
雷诺数	Re	f_i/f_f	L^2	
热传导	Q_c	$\lambda \Delta T A/d$	L	λ : 热传导率
热对流	Q_t	$h \Delta T S$	L^2	h : 温度传导率
热辐射	Q_r	$CT^4 S$	L^2	C : 常数
静电力	F_e	$\epsilon SE^2/2$	L	ϵ : 介电常数
电磁力	F_m	$\mu SH^2/2$	L^4	μ : 导磁率, H : 磁场强度
热膨胀力	F_T	$eS\Delta L(T)/L$	L^2	

通过中间的膜片在不同的温度变化时,会产生不同的型变量变形实现微泵的开关功能;用机械振动原理可以制造出微加速度计、微陀螺仪、压力传感器、微谐振器等;根据折梁的力学问题研究其形变量可制造出微执行器、生物芯片等。

1.2.3 微机械的工作原理

由于 MEMS 的尺寸很小,所以传统的电机不能用作驱动源使其工作。MEMS 的驱动方式大致可分为电磁力、静电力、压电力、热膨胀和形态记忆合金。

MEMS 的产品主要由微传感器、微执行器、微能源、处理电路等部件组成的,目前 MEMS 产品的能源装置还是数字电路能源。传感器是由敏感元件和转换元件组成的,敏感元件是传感器中能直接感受外界信号的原件,而转换元件能将敏感元件感受到得外界信号转换成合适的电信号。微传感器具备微型化、集成化、低成本、低功耗、高精度、高寿命、响应速度快等特点。

1.2.4 微构造特性

微构造的特性很大程度上依赖于材料的本质特性。表 1-3 给出了材料的特性和它们对于微小构造体的影响。

表 1-3 材料的特性和对微构造的影响

物 性	影 响	影响举例
1. 内应力	弹性形变,固有	压力传感器的灵敏度,振动传感器的固有振动频率
2. 杨氏模量	频率,弯曲变形	
3. 拉伸强度	机械强度	
4. 疲劳强度	可靠性	微型泵的结构强度
5. 热传导率	热偶性常数	
6. 热容量	热绝缘性	流量传感器和热红外传感器的响应速度和灵敏度
7. 摩擦	摩擦阻抗	
8. 磨损	持久性	微型电机的转动速度

压力、速度和振动传感器的机械特性受到材料内应力和弹性模量的影响很大。这里以圆形薄膜微型压力传感器为例,当薄膜中心的形变量比膜厚小很多时,有内部应力存在,压力 p 和中心变形 w_0 的关系是:

$$p = 4 \frac{w_0 d}{\alpha^2} \left[\frac{4}{3} \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{d}{\alpha} \right)^2 + \sigma \right] \quad (1-1)$$

式中: d 为薄膜的厚度, α 为薄膜的半径, E 为薄膜的弹性模量, ν 为泊松比, σ 为内部应力。

图 1-1 给出了一组形变和内应力间的计算结果,当内部应力很大($\sigma > 100$ GPa)时,灵敏

度严重下降至接近零。当内应力比较小($\sigma < 0.1 \text{ GPa}$)时,随弹性模量 E 的增大,传感器的灵敏度下降而且与内部应力无关。

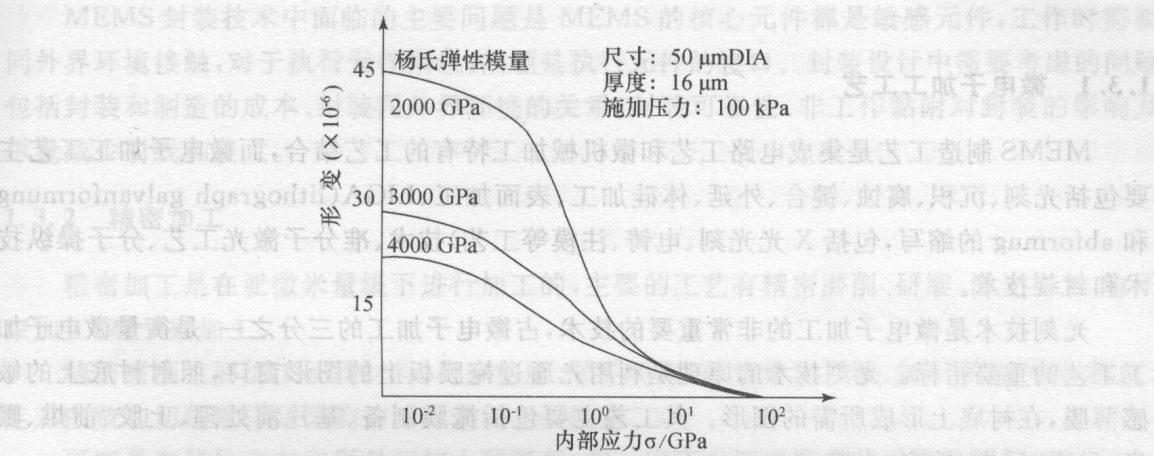


图 1-1 圆形薄膜的内应力及形变特性

在微构造的设计中材料的机械特性是至关重要的。表 1-4 列出了单晶硅和普通材料的机械特性。单晶硅和不锈钢的杨氏模量基本相同,但单晶硅的降服强度大,是一种很优良的材料。用微型双支撑梁或悬臂梁这样的简单构造就可以测定薄膜的内部应力、杨氏模量等参数。为了控制薄膜的内部应力或弹性模量,常采用向膜内注磷、硼或氢的方法,注入杂质的量不同,效果也不同。

表 1-4 常用材料的机械特性

	屈服强度 (GPa)	努普硬度 (MPa)	杨氏模量 (E/Pa)	密度 ($\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$)	热导率 ($\text{W} \cdot (\text{cm} \cdot \text{K})^{-1}$)	热膨胀率 ($\text{PPm} \cdot \text{K}^{-1}$)
金刚石	50	7000	10.35	3.5	20	1.0
SiC	21	2480	7.0	3.2	3.5	3.3
TiC	20	2470	4.97	4.9	3.3	6.4
Al ₂ O ₃	15.4	2100	5.3	4.0	0.5	5.4
Si ₃ N ₄	14	3486	3.85	3.1	0.19	0.8
Fe	12.6	400	1.96	7.8	0.80	12
SiO ₂	8.4	820	0.73	2.5	0.01	40.55
Si	7.0	850	1.9	2.3	1.57	2.33
Mn	2.1	275	3.43	10.3	1.38	5.0
Al	0.17	130	0.70	2.7	2.36	25