

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

# 微纳传感器及其应用

朱 勇 张海霞 编著



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 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:

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.ican-contest.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

# 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 <sub>3</sub> 和 PbTiO <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	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 CO<sub>2</sub> 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、光电器件、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  $\text{ZnO}$  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	$m$	$\rho V$	$L^3$	
压力	$f_p$	$S\rho$	$L^2$	
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	$f_f$	$uS/d(dx/dt)$	$L^2$	$u$ : 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	$\omega$	$\sqrt{(K/m)}$	$L^{-1}$	
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	$Q_e$	$\lambda\Delta TA/d$	$L$	$\lambda$ : 热传导率
热对流	$Q_c$	$h\Delta TS$	$L^2$	$h$ : 温度传导率
热辐射	$Q_r$	$CT^4S$	$L^2$	$C$ : 常数
静电力	$F_e$	$\epsilon SE^2/2$	$L$	$\epsilon$ : 介电常数
电磁力	$F_m$	$\mu SH^2/2$	$L^4$	$\mu$ : 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	微型泵的结构强度
4. 疲劳强度	可靠性	流量传感器和红外外传感器的响应速度和灵敏度
5. 热传导率	热偶性常数	
6. 热容量	热绝缘性	微型电机的转动速度
7. 摩擦	摩擦阻抗	
8. 磨损	持久性	

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,  $\alpha$  为薄膜的半径,  $E$  为薄膜的弹性模量,  $\nu$  为泊松比,  $\sigma$  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 ( $\sigma > 100$  GPs) 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。

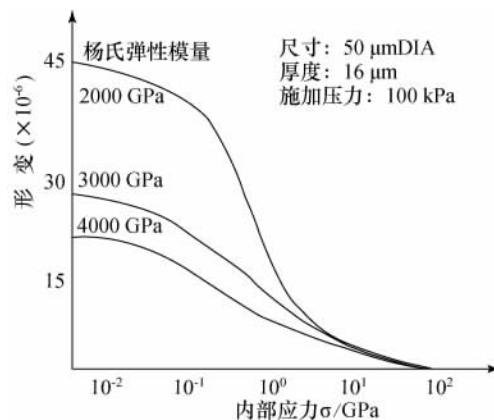


图 1-1 圆形薄膜的内应力及变形特性

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 ( $\rho/(g \cdot \text{cm}^{-3})$ )	热导率 ( $\text{W} \cdot (\text{cm} \cdot \text{K})^{-1}$ )	热膨胀率 (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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.4	2100	5.3	4.0	0.5	5.4
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	14	3486	3.85	3.1	0.19	0.8
Fe	12.6	400	1.96	7.8	0.80	12
SiO <sub>2</sub>	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

## 1.3 MEMS 的制造技术

### 1.3.1 微电子加工工艺

MEMS 制造工艺是集成电路工艺和微机械加工特有的工艺结合,而微电子加工工艺主要包括光刻、沉积、腐蚀、键合、外延、体硅加工、表面加工、LIGA(lithograph galvanformung 和 abformug 的缩写,包括 X 光光刻、电铸、注模等工艺)技术、准分子激光工艺、分子操纵技术和封装技术。

光刻技术是微电子加工的非常重要的技术,占微电子加工的三分之一,是衡量微电子加工工艺的重要指标。光刻技术的原理是利用光通过掩膜板上的图形窗口,照射衬底上的敏感薄膜,在衬底上形成所需的图形。其工艺主要包括掩膜制备、基片前处理、上胶、前烘、曝光、显影、后烘、蚀刻、去胶。

沉积分为化学气相沉积和物理气相沉积。化学气相沉积是利用气体通过某种方式激活,在衬底上发生化学反应,而沉积出所需的固体薄膜。物理气相沉积是通过蒸发,电离或溅射等过程,产生金属粒子并与反应气体发生反应形成化合物沉积所需要的薄膜。

腐蚀是利用化学和物理的方法对原有材料需要去除的部分进行去除。物理腐蚀是利用放电时产生的高能惰性气体离子对材料进行物理轰击,主要包括腐蚀性气体离子的产生、离子轰击基片、基片表面腐蚀和腐蚀反应物清除。化学腐蚀法是将腐蚀材料线氧化,在进行化学反应,使其生成氧化物进行溶解。

键合技术主要包括:阳极键合技术、硅-硅基片直接键合技术和金-硅共晶键合技术。阳极键合技术是在强电场作用下,将两个被键合表面紧密贴在一起,通过氧-硅化学键将被键合的材料牢固的结合在一起。而硅-硅基片直接键合不需要任何黏结物也不需要引入其他材料,但必须在高温下进行,1000~1200℃。金和硅的共熔温度较低,大约 363℃,因此金-硅键合过程是低温键合。

外延技术是在单晶硅或 GaAs 的表面上生长出一层新单晶的技术,由衬底表面线外延伸的称为外延。

体硅加工技术是通过腐蚀技术有选择性地去除部分硅基片以形成微机械结构。

表面加工技术是通过在硅基底上形成薄膜,并按要求对薄膜进行加工,从而得到完全建立在硅基底表面上的 MEMS 技术。主要优点是常规的集成电路工艺兼容。

LIGA 技术是 20 世纪 80 年代由德国的 Karlsruhe 研究中心在制造微喷嘴时研制出来的,主要工艺包括深层同步辐射 X 射线光刻、电铸成型和注塑成型。LIGA 技术具有可制造出大的高宽比的结构、材料广泛、加工精度高及可重复复制。

准分子激光器输出波长处于电磁波普紫外区域的射线,通过吸收强的紫外线,准分子激光辐射的整个能量就集中在材料的一个薄层内,从而形成高能量密度。

分子操纵技术是通过分子的操纵实现在纳米尺度上对材料进行加工。实现分子操纵的设备主要有扫描隧道显微镜、原子力显微镜和光镊子。

MEMS 封装技术中面临的主要问题是 MEMS 的核心元件都是敏感元件,工作时需要同外界环境接触,对于执行元件来说,问题是执行元件的接口。封装设计中需要考虑的问题包括封装和制造的成本、封装同外界环境的关系、封装可靠性、非工作黏附对封装的影响及尽量减少引线 and 接点。

### 1.3.2 精密加工

精密加工是在亚微米量级下进行加工的,主要的工艺有精密磨削、研磨、激光加工、电子束加工、离子束加工。

精密磨削主要加工硬质材料,机床精度、砂轮材料、砂轮修整方法、加工余量、磨削深度、走刀次数和切削液体是影响加工质量的主要因素。

研磨是在器件表面和研具间加入研磨剂,在一定压力下使磨具和被磨器件做相对运动,从而使得研磨剂中的大量微粒均匀地将器件表面抹掉一层极薄的物质。

激光加工是利用高能量的激光束转化为热能,对器件进行切割、打孔和焊接等操作。激光加工具有加工速度快、效率高、热响应小、没有工具耗损等优点。

电子束加工工艺是在真空条件下,用电流加热阴极发射电子束,利用聚焦加速后的电子束具有很高的能量,并以极高的速度冲击到被加工的器件表面上,动能转化为热能,实现对材料的加工。

离子加工是把惰性气体通过离子源产生离子束,也是利用热能对材料进行加工。

### 1.3.3 特种加工

特种加工是利用化学能、声能、光能和电能实现高能量密度的加工;主要包括电火花加工、线切割加工、电解加工、电铸加工和超声波加工。

电火花加工是在工具和器件之间施加脉冲电压时,两极间产生很强的电场,由于器件表面凹凸不平,使间隙中的电场强度不均匀,最凸出的地方电场最大,产生电火花放电,局部产生的高温将被加工材料腐蚀的加工方法。

线切割加工是利用移动的工具线电极穿过被加工器件上的孔,通过正交工作台按照预定的轨迹运动,就可以切割出所需要的器件形状。

电解加工是利用金属电解液将器件加工成型的,加工时器件接电源正极,加工工具接电源负极。电解加工效率高,是电火花加工的 5~10 倍,而且不受材料的影响,表面没有毛刺。

电铸加工时,电铸材料作阳极,导电原模作阴极,电铸液中的金属离子在阴极还原成金属,沉积在阴极原模上,阳极金属原子逸出电子后溶解在电解液中,从而保持溶液中的金属离子浓度不变。

超声波换能器将超声波发生器所产生的高频振动转化成高频机械振动,借助变幅杆将

振动的幅度放大,驱动工具端面做超声波振动。被加工器件和工具之间加入磨料,工具的振动将磨料颗粒加速,使颗粒不断冲刷器件表面,实现对器件的加工。

## 1.4 MEMS技术的应用

MEMS技术从功能上来划分可分为MEMS传感器、MEMS执行器、射频MEMS(radio frequency MEMS, RF MEMS)器件、生物MEMS(bio MEMS)、微光机电系统(micro optical electro mechanical systems, MOEMS)等。

### 1.4.1 MEMS传感器的应用

MEMS传感器也称微型传感器,是微型集成化器件,是应用最广泛的MEMS器件。MEMS传感器一般是把信号处理电路和敏感单元集成制作在一个芯片上。这样传感器不仅能够感知被测参数,将其转换成方便度量的信号;而且能对所得到的信号进行分析、处理和识别、判断,因此形象地被称为智能传感器。按被测量来划分,通常可分为以下7类:

- (1) 压力传感器:绝对压力的传感器和计量压力的传感器。
- (2) 热学传感器:温度和热量传感器。
- (3) 力学传感器:力、压强、速度和加速度传感器。
- (4) 化学传感器:化学浓度、化学成分和反应率传感器。
- (5) 磁学传感器:磁场强度、磁通密度和磁化强度传感器。
- (6) 辐射传感器:电磁波强度传感器。
- (7) 电学传感器:电压、电流和电荷传感器。

MEMS型压力传感器可分为压阻式、电容式和压电式。压阻式传感器利用压阻效应来测量压力大小。所谓压阻效应是指材料(特别是半导体材料)受到应力作用时,电阻率发生明显变化的现象。

MEMS加速度计的类型很多,按信号检测方式可以分为电容式、压阻式和隧道电流式,电容式加速度计由于具有体积小、工艺简单、一致性好、温度漂移小等诸多优点,从而在众多领域得到了广泛应用。MEMS加速度计可用于测量弹药初射角和轨迹,进行智能化引信控制,缩小炸点散布,大幅度提高压制性兵器的武器效能;MEMS加速度计还可以用在弹道修正引信、侵彻自适应引信、常规弹道测试、导航定位系统中,进行弹道修正、提高射程,甚至制造出80~120 km射程的制导火箭弹。高量程的加速度传感器在军事领域当中具有非常重要的应用价值,最典型的用途是应用在侵彻硬目标的“钻地”和“穿甲”弹的引信系统。日常见到的陀螺是孩子们的玩具,高速自转的陀螺具有保持其对称方向基本不变的特性,常用做航空和航天飞行器中的定向装置,这也是惯性MEMS的用途之一。MEMS陀螺是最新发展起来的一种微型陀螺,它是用来测量角速度的微型传感器。从结构来看,MEMS陀螺有绕行梁框架式、梳状音叉式、振动轮式和振动环式等;从驱动方式看,有静电驱动、电磁驱动、

压电驱动等;从检测方式看,有电容检测、压阻检测、压电检测、光学检测等。我们熟知管乐、弦乐、钟声、鼓声都是利用谐振特性工作的, MEMS 谐振式传感器是一种高精度的传感器,这种传感器输出的是频率信号,这种信号可作为准数字信号,可以不必进行 A/D 变换就进入数字电路系统,而且它没有压阻式传感器易受温度影响大的缺点,长距离传输也不易产生失真,所以传感器性能十分稳定,是当前研究的热点之一。除了上面介绍的几种典型 MEMS 传感器外,还有许许多多的 MEMS 传感器,如用于微观判断的 MEMS 触觉传感器(触觉包括接近觉、接触觉、压觉、力觉、滑觉等)、MEMS 生物传感器、MEMS 图像传感器、用于气象分析的微型气相色谱仪、可分析气体的种类和浓度的 MEMS 气敏传感器(电子鼻)、测量湿度的微型湿敏传感器、用于测量各种气体流量的微型气体流量传感器等。

#### 1.4.2 射频 MEMS 器件的应用

射频 MEMS 器件表现出的性能指标,远远超过了传统的 PIN 管和 GaAs 器件所能达到的指标。RF MEMS 开关、可变电容、电感,适用于 DC-120 GHz。MEMS 微波传输线、高口值谐振器、滤波器、天线,适用于 12~200 GHz。利用声波谐振原理制成的薄膜体声波谐振器和滤波器,频率可达 3 GHz, Q 值超过 2000。利用机械悬臂梁的谐振原理制造的微机械谐振器和滤波器,频率在几百兆赫。MEMS 开关通过在微波传输线上的可动结构实现微波信号的通断,可分为并联和串联两类。并联开关在几十飞法(fF)和几个皮法(pF)之间跳变实现微波信号的通断,并联开关只适于高频工作,在 X 波段以上隔离度才能满足要求,具有使用价值。串联开关通过中间悬浮的微带线的运动实现微波传输线的通断。串联开关低频端的隔离度较高。目前提高隔离度比较好的方案是采用 BST[ $\text{Ba}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{TiO}_3$ , 钛酸锶钡, BST],比采用氮化硅介质提高 15 dB 以上。RF MEMS 器件开关具有单刀单掷、单刀多掷等多种结构,可方便地制造成阵列。

RF MEMS 器件可变电容通过静电力调节电容间隙或电容面积,调节系数能够达到 20 : 1 以上,未加电压时的电容值可以从 VHF 频段时的几 pF 到 X 波段的 0.1 pF 变化。RF MEMS 器件可变电容的 Q 值能够达到 20 以上。和传统的 pn 结可变电容相比,在调节系数和 Q 值方面具有明显优势。同时 MEMS 可变电容的工作频段很宽,理论上的截止频率超过 1000 GHz。RF MEMS 高 Q 值无源器件在单片微波集成电路设计中,高 Q 值的电感、电容、传输线是提高电路性能的重要因素。采用 MEMS 工艺可以降低器件的衬底损耗,提高 Q 值。对于电容和传输线来说,主要手段是将器件制造在介质薄膜上。采用 RF MEMS 器件技术可以制造高 Q 值谐振器,其优势在于可以实现单片集成。RF MEMS 器件的集成,一种是和微电子电路集成,形成功能完备的子系统单元,如微波开关和升压电路,微波功放等可集成在一起作为手机的接收模块;另一种是各种 RF MEMS 器件和微波传输线集成所形成的基本功能单元。

数字移相器在军用相控阵雷达上应用时 MEMS 数字移相器的工作频段可以从几 GHz 直到数百 GHz,主要集中在 X 波段和 Ku 波段。RF MEMS 滤波器采用高 Q 值的 MEMS

电容、电感实现的单片滤波器,由于电容、电感的自振频率和 Q 值的提高,插入损耗和工作带宽有较大改善。采用 MEMS 电调可变电容,还能实现电调滤波器。RF MEMS 压控振荡器采用 MEMS 电调可变电容可以实现压控振荡器(voltage-controlled oscillator, VCO),由于 MEMS 电容、电感可以实现较高的 Q 值,因此相应的 VCO 的相位噪声较低。变波束天线是将微波在传输线和空间之间转换的设备。采用 RF-MEMS 开关改变天线的频率和波束特性,可使 MEMS 技术直接在天线中得到应用。目前取得的成果主要体现在两个方面:① 获得简化结构的相控阵天线;② 获得可变频率、波束特性的天线,用一个天线体现多个天线的功能。

### 1.4.3 生物 MEMS 的应用

生物 MEMS 是指 MEMS 技术在生物学领域中应用的微制造技术。由于采用了微机械制造技术,Bio MEMS 具有微米量级的特征尺寸,可以实现器件和系统的微型化,使生物医学的诊断和治疗可以快速、自动化、高通量、较小损伤地完成。Bio MEMS 主要包括在生物体外进行生物医学诊断的微系统和在生物体内进行生物医学治疗的微系统。生物体外 Bio MEMS 研究是在生物体外进行生物医学诊断和治疗的微系统,研究主要包括生物芯片、生物传感器及相关微流体系统,是一个较广的研究领域,其中最具代表性的是生物芯片技术。

微型生物芯片是利用微细加工工艺,在厘米见方的硅片或玻璃等材料上集成样品预处理、微反应器、微分离管道、微检测器等微型生物化学功能器件、电子器件和微流量器件的微型生物化学分析系统。与传统的分析仪器相比,微型生物化学分析系统除了体积小以外,还具有分析时间短、样品消耗少、能耗低、效率高等优点,可广泛用于临床、环境监测、工业实时控制。

芯片上的生物化学分析系统还使分析的并行处理成为可能,即同时分析数十种甚至上百种的样品,这将大大缩短基因测序过程,因而将成为人类基因组计划中重要的分析手段。生物体内微系统是指在生物体内进行生物医学诊断和治疗的微系统,研究内容主要包括植入治疗微系统、微型给药系统、精密外科工具、植入微器件、微型人工器官、微型成像器件等。这些微系统中融入了关键的 MEMS 技术,如微传感器、微驱动器、微泵、微阀、微针等,是一个极具挑战性的研究方向。利用 MEMS 制作的智能型外科器械可以减少手术风险和手术时间,缩短病人康复时间,降低治疗的费用。

Verimetra 公司正在利用 MEMS 把现有手术器械转变成智能型手术器械,可用于多种场合,包括小手术、肿瘤、神经、牙科和胎儿心脏手术等。药物注入是生物医学 MEMS 另一个可能有巨幅增长潜力的领域,Microchipd 公司正在开发的一种药物注入系统利用了硅片或聚合物微芯片,其上带有成千上万个微型储液囊,里面充满药物、试剂及其他药品。这些微芯片能够向人体注入药物,使止痛剂、荷尔蒙以及类固醇之类的注入方式发生革命性的变化。类似这样的生物医学新进展还将催生出新型器械,如便携式掌上型透析机等。将来人们可以在身上配备测量人体功能的 MEMS 传感器和驱动器,保证个人处于最佳健康状态,

帮助保持积极生活方式,并提供自动的预防保健。Bio MEMS 器件及系统现已成为 MEMS 技术应用市场中发展最快的领域,特别是在药物的发现和筛选、疾病诊断、生物信息遥测和基因检测分析等方面,Bio MEMS 技术的批量生产能力更极大地降低了生物医学诊断和治疗的成本。

医学工业对于更小、更便宜的装置和测量装置的需求将保持增长的势头,这将建立一个更大的 MEMS 市场,MEMS 产品在未来的医学市场将担任一个重要的角色。

#### 1.4.4 光学 MEMS 的应用

在 MEMS 上再加上一个光信号,就是微光机电系统或者 MOEMS,中文含义是微光学电子机械系统。MOEMS 是一个光、机、电一体化的集成系统,复杂程度又提高了一级,MOEMS 可以对光束进行发送、接收和精确控制光束。信息技术、光纤通信技术的发展,使 MOEMS 成为当前研究的热点,其应用遍及光通信、数据存储、自适应光学及光学传感等多个方面。利用 MEMS 技术制作的微型光器件具有插入损耗小,光路间相互串扰极低,对光的波长和偏振不敏感等特点,并且通常采用硅为主要材料,因此器件的光学、机械、电气性能优良。MOEMS 能把各种 MEMS 结构与微光学器件、半导体激光器、光波导器件、光电检测器件等完整地集成在一起,正在成为一个重要的技术发展方向。

由于 MOEMS 具有重量轻、体积小、集成化、成本低等优点,因此它正在成为传统设备的更新换代产品,因而也具有广阔的应用市场。主要的应用方向包括光通信中的光开关、光衰减器、光滤波器、分光计和光栅、光显示、数据存储、自适应光学和光学传感中的加速度计、压力传感器等多个方面。MOEMS 光开关具有成本低、体积小、寿命长、易集成、批量加工等优点,而且传输光的信号与协议无关,可应用于全光通信网的光交换、通道备份和保护等系统中,可用于军事保密通信和激光武器系统中激光束控制单元。

1999 年初美国 Sandia 国家实验室研制成功的一种微保险系统,被称为“微守护者”,它是一种新型弹道子系统,用于核弹的安全引爆,可以大大改进核武器的保险系统。这个 MOEMS 是 Sandia 正在发展的先进光驱动微点火系统的一部分,其设计思想是光通过光纤进入一封闭空腔并在里面反射,此时不驱动武器,只有检测到特定的飞行加速度环境信息时(系统飞到目的地时),密封室内活动反射镜才把光能量反射到光电电池(光电电池提供启动微点火组件工作所需要的能量),只有在武器进入正确的解除保护环境后才能发生爆炸。数字微镜元件(digital mirror device, DMD)是由美国 TI 公司开发的一种用于数字显示的光 MEMS 芯片。在静电力驱动下,可动驱动结构通过扭臂使反射镜面旋转。每个微反射镜都能将光线从两个方向反射出去。只要结合 DMD 以及适当光源和投影光学系统,反射镜就会把入射光反射进入或是离开投影镜头的透光孔。

MEMS 微型 F-P 滤波器同半导体激光器集成,特别是同垂直腔面发射激光器集成,可以为波分复用技术提供多波长、可调谐发射光源。