

●上海研究生教育用书

微机电系统 及其相关技术

章吉良 杨春生等 编著

上海交通大学出版社

微机电

上海市研究生教育专项经费资助项目

微机电系统及其相关技术

章吉良 杨春生等 编著

上海交通大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

微机电系统及其相关技术/章吉良, 杨春生等编著. —上海: 上海交通大学出版社, 1999

ISBN 7-313-02307-3

I. 微… II. ①章…②杨… III. 机电系统, 微型—基本知识 IV. TH7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 62870 号

微机电系统及其相关技术

章吉良 杨春生等编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 张天蔚

常熟市印刷二厂印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 10.25 字数: 251 千字

1999 年 12 月第 1 版 2001 年 7 月第 2 次印刷

印数: 2001~3050

ISBN 7-313-02307-3/TH·084 定价: 15.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

微型机电系统(MEMS)是一个新兴的研究领域,MEMS指的是可以批量制作的集微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和控制电路、接口、信号传输和电源等于一体的微系统。MEMS是一门多学科交叉的新兴学科,涉及精密机械、微电子材料科学、微细加工、系统与控制等技术学科和物理、化学、力学、生物学等基础学科。它将在 21 世纪的信息、通信、航空航天、生物医疗等多方面获得重大突破,从而对世界科技、经济发展和国防建设带来深远的影响。

1959 年科学家就已提出微型机械的设想,1962 年第一个硅微型压力传感器问世,其后开发出尺寸为 $50\sim 500\mu\text{m}$ 的齿轮、齿轮泵、气动涡轮与联接件等微机构。1987 年美国加州大学的伯克利分校研制出转子直径为 $60\sim 120\mu\text{m}$ 的硅微型静电电机,表明了应用硅微加工技术制造微小可动结构的可行性,并与集成电路兼容制造微小系统的优势。该项新兴技术已受到世界许多工业国家的重视,纷纷斥巨资开展研究。美国的大学、国家实验室和公司共有几十个 MEMS 研究小组,日本通产省自 1991 年起开始了为期 10 年总投资为 2500 亿日元的“微型机械技术”研究开发计划。截止 1993 年底,欧洲共有 8 所科研院校、23 个国家研究所或公司成立了 31 个微型系统研究小组。我国的清华大学、北京大学、上海交通大学、中科院上海冶金研究所等几十所高校和研究所也于 90 年代开始了微机电系统的研究。预期在下个世纪初,该领域的研究成果将在工业、农业、生物工程等许多产业界产生难以估计的经济效益。

MEMS 学科涉及到的加工技术主要内容有:体硅微加工技术,主要包括湿法和干法腐蚀;表面微加工技术,主要包括结构层和牺牲层的制备与腐蚀;键合技术,主要包括静电键合和热键合;高深宽比微加工技术,主要包括 LIGA 技术和 DEM 技术。在实际应用中这些技术还要借助集成电路工艺,如光刻、电镀、扩散、淀积等技术。

全书共分七章。第 1 章微机电系统(MEMS)概论,由戚震中编写;第 2 章 MEMS 体微加工技术,由赵小林编写;第 3 章 MEMS 表面微加工技术,由杨春生编写;第 4 章高深度比微加工技术,由陈迪编写;第 5 章微传感器与微执行器,由章吉良编写;第 6 章键合技术,由蔡炳初编写;第 7 章 MEMS 的相关电路及应用实例,由周光亚编写。

自 90 年代起,笔者开始微型机电系统的研究工作,于 1995 年末研制成直径 2mm 的电磁型微马达,1997 年研制成直径 1mm 的微马达,1998 年初步解决直径

11/06

1~2mm 微马达实用化的关键技术。与此同时,笔者感到该领域的基础和应用方面的研究异常活跃,但是国内尚缺少较系统介绍 MEMS 技术方面的参考书。有鉴于此,笔者结合科研工作,并查阅大量参考文献,编写成此书。由于该领域国内外的的发展日新月异,作者水平有限,加之时间仓促,论述内容难免有不妥之处和过时之说,恳请读者指教。

编 者

2001 年 5 月于上海交通大学

目 录

第 1 章 微机电系统概论	(1)
1.1 微机电系统的重大意义及历史回顾	(1)
1.2 微机电系统的主要技术	(4)
1.3 微机电系统的主要材料	(7)
1.4 智能系统集成	(8)
参考文献	(9)
第 2 章 微机电系统的微加工技术	(10)
2.1 集成电路工艺	(10)
2.2 微机电系统的硅微机械加工	(14)
2.3 体硅腐蚀的自停止技术	(26)
参考文献	(29)
第 3 章 微机电系统表面微加工技术	(31)
3.1 表面微机械加工的基本概念	(31)
3.2 多晶硅的表面微机械加工	(33)
3.3 多晶硅机械特性	(43)
3.4 表面微机械加工技术及应用	(49)
参考文献	(53)
第 4 章 高深宽比微加工技术	(57)
4.1 LIGA 技术标准工艺	(58)
4.2 LIGA 技术的几种变化	(65)
4.3 LIGA 技术应用举例	(66)
4.4 DEM 技术	(68)
参考文献	(71)
第 5 章 微传感器与微执行器	(74)
5.1 微传感器	(75)
5.2 物理微传感器	(77)
5.3 化学传感器和生物传感器	(89)
5.4 微执行器	(97)
参考文献	(107)

第 6 章 键合技术..... (111)

6.1 阳极键合技术 (111)

6.2 硅/硅基片直接键合(硅的熔融键合)..... (117)

6.3 其他硅-硅间接键合工艺 (125)

参考文献..... (127)

第 7 章 微机电系统的相关电路及应用实例..... (130)

7.1 微机电系统相关电路 (130)

7.2 微光机电系统应用实例 (144)

参考文献..... (155)

第 1 章 微机电系统概论

1.1 微机电系统的重大意义及历史回顾

微机电系统(MEMS;Micro Electro-Mechanical System)指微型化的器件或器件组合,把电子功能与机械的、光学的或其他的功能相结合的综合集成系统,采用微型结构(包括集成电路、微传感器和微执行器;这里“微”是相对于宏观而言),使之能在极小的空间内达到智能化的功效。微机电系统是一门多学科交叉的新兴学科,它涉及精密微机械、微电子、材料科学、微细加工、系统与控制等技术学科和物理、化学、力学和生物学等若干基础学科。它将在 21 世纪的信息、生物医学等多方面导致人类认识和改造世界能力的重大突破,从而给国民经济以及国防建设带来深远影响。

微机电系统主要特点在于:(1) 能在极小的空间里实现多种功能;(2) 可靠性好、重量小且能耗低;(3) 可以实现低成本大批量生产。

德国 Weissler^[1]把 MEMS 称为系统工业发展所需要的“维生素”,见图 1.1。

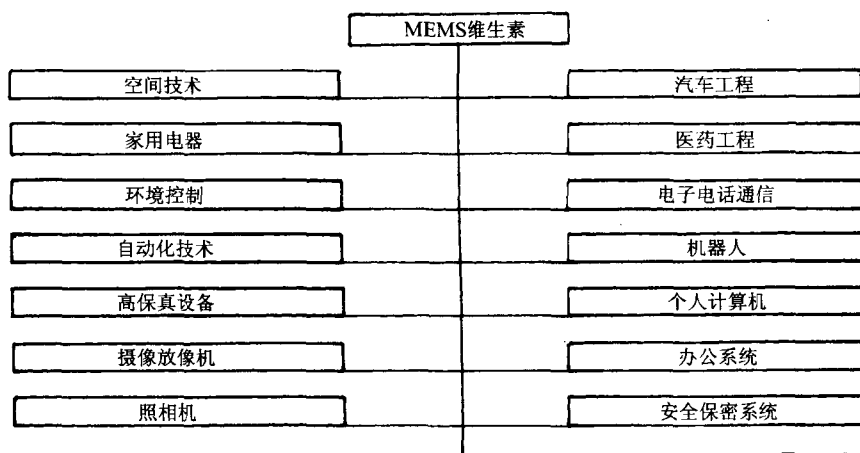


图 1.1 多种工业需要 MEMS 技术作维生素

1.1.1 MEMS 发展的历史回顾

MEMS 的加工工艺已发展了 40 年。它采用多种微加工技术,特别是原来用于集成电路(IC)的各种技术与硅加工技术以及各种新的微加工技术。现今,超大规模集成电路已能在一个芯片上制造 1000 万个以上的晶体管与电容,以此为基础的微处理器和微型计算机使通信、娱乐、保健、制造、管理和其他与我们生活有关的方面发生了革命性的变化。低成本高性能的系统设计与生产已成为可能。然而,没有传感器从外界环境取得信息,仅用集成电路难以实现对系统的控制、测量以至自动化。同样,没有执行器,系统难以实现设计要求的功能。集成电

路所用工艺(微细加工工艺)已迅速发展可提供高速、微型化、低成本的信号调制成运算的能力,而常规的传感器和执行器(包括换能器)在功能、尺寸与成本等方面还远远落在后面。传感器和执行器的微加工技术是其发展的限制性环节。发展适合于制造微传感器和微执行器的加工工艺和技术势在必行。

鉴于 MEMS 的广泛应用前景,美国、西欧和日本均给予 MEMS(欧洲称其为微机械系统)很多的关注和重视。早期硅传感器的发展就是得助于美国国家宇航中心(NASA)。目前用于 MEMS 的研究经费是美国为 3500 万美元,德国为 7000 万美元,日本为 2000 万美元。

20 世纪 50 年代硅和砷化镓等半导体压电特性的发现,促进了硅传感器、换能器的发展。硅传感器最先用于物理振动的测量,而后应用于化学和生物方面。1971 年 Case Western Reserve 大学^[2]设计与制造了生物医学用的数字显示的集成硅压力传感器。它的中心有电桥的微型硅隔膜,并用 Au-Sn 合金密封在硅片上,是一种可植入体内的微集成传感器。1977 年斯坦福(Stanford)大学首次发展了电容式压力传感器,使灵敏度和稳定性更好^[3],并制造出整体电容压力传感器。尽管如此,目前大家认为,Petersen K^[4]1982 年发表的硅在机械构件中应用的综述论文开创了 MEMS 的纪元。此后,研制的一系列微传感器主要用于测量位置、速度、加速度、压力、力、扭矩、磁场、温度、气体成分、湿度、pH 值、离子浓度和生物气体/液体/分子浓度。

科研方面取得的进展推动了相应工业的发展,在美国硅谷两家公司应运而生^[5],它们开始发展硅的微结构。第一个成功获得广泛应用的 MEMS 器件是硅压力传感器,1983 年生产了 300 万件,1995 年发展到 5000 万件,预计到 2005 年可大于 12500 万件。开始时,由于工艺难度大,硅压力换能器只限于在特殊的空间飞行器和程序控制等领域里的应用。在近十年来硅的微加工工艺发展迅速,使低成本高质量大批量生产各种 MEMS 系统成为可能。

1.1.2 MEMS 的发展前景

鉴于微机械系统发展的方向是微型化、多功能及与微电子的密切结合,其工艺发展的趋势是智能化、降低尺寸、重复性好、采用仿生学和高级信息技术并减少环境污染,因而必将促进 21 世纪的信息资源共享,改善与提高环境质量并推进社会福利事业。

表 1.1 概括了 MEMS 应用的主要领域及未来发展的市场前景。Bryzek J^[5]认为 MEMS 在这 8 个方面的市场销售量将从 1995 年的 14.5 亿美元上升到 67 亿美元。

(1) 压力传感器 主要用于汽车工业和可网络输出的智能型传感器;

(2) 惯性传感器 加速度、速度和陀螺等传感器,主要用于汽车稳定控制、导航和真实位置控制、摄放像机等。

(3) 流体控制 微压力阀、微泵等,目前在流体的种类、压力和流量的测量范围方面尚不能满足需要;

(4) 数据存储 如发展一种与在芯片上的伺服马达一起工作的硬盘驱动悬浮头,其位置控制精度为 0.1nm,读写密度高达 20~80GB/in²;

(5) 显示芯片 德州仪器公司(Texas Instruments)已有小量生产,预计将占领相当份额的视屏市场;

(6) 生物芯片 将多方面进入生物领域,如在芯片上的 DNA 倍增器,化学反应器和细菌繁殖器;

(7) 通信用 MEMS MEMS 光纤排列器已用于通信工业,其发展潜力巨大。

表 1.1 Bryzek MEMS 市场前景预测

(单位:亿美元)

年份	1995	2005
压力传感器	10.0	25.0
惯性传感器	4.0	8.0
流体控制	0.1	1.0
数据存储	0.0	10.0
显示芯片	0.0	10.0
生物芯片	0.0	2.0
通信	0.1	10.0
其他	0.3	1.0
MEMS 总计	14.5	67.0
非传感型 MEMS 总计	0.5	34.0

鉴于上述的特色, MEMS 将在下一世纪显示出更大的优越性,随着 MEMS 技术不断进步, MEMS 将在更多的领域里发挥作用。除了上面论及的 MEMS 已取得应用的若干领域外, Petersen K^[6] 认为 MEMS 还可发展下列微型化的仪器:

(1) 芯片上的微探针(STM、AFM 等),见图 1.2。

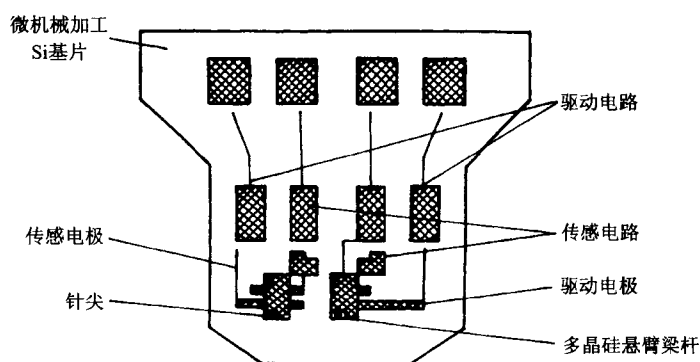


图 1.2 MEMS 的原子力显微镜,传感器与

驱动电子系统集成,针尖以原子尺度运动^[7]

(2) 芯片上的微电光阻分析仪,以小于 1/10 的价格和体积代替目前毛细管电光阻仪和 DNA 电光阻仪,而现在的电光阻仪价高(5 万美元)、体积大(0.5m²)。

(3) 芯片上的微质谱仪。

(4) 芯片上的微血细胞计数仪。

(5) 芯片上的微聚合酶链反应器。

(6) 芯片上的微重金属探测器。

(7) 芯片上的微血液分析系统。

MEMS 在我国也得到广泛重视,国家计委、科委和国防科工委均拨款支持高校和科研机构在 MEMS 领域的研究。目前,一批 MEMS 的研制产品如微泵、静电型微马达、电磁型微马达已获成功; MEMS 的新型技术包括高深宽比微加工技术等正迅速发展。展望 21 世纪,我国的 MEMS 不仅在科研水平上,而且在产品的批量生产上也将与发达国家并驾齐驱。

1.2 微机电系统的主要技术

MEMS 的飞速发展是与其相关的制造加工技术的进展分不开的。微电子集成工艺是其基础。此外,要构成 MEMS 的各种特殊的结构,必须用一系列特殊的工艺技术,它们主要是:体微加工技术;表面微加工技术;高深宽比微加工技术;组装与键合技术以及超微精密加工技术等。

1.2.1 体微加工技术

体微加工技术与表面微加工技术都是基于原先制造集成微电子体系的技术,用于制造固态传感器、执行器和微机电系统。体微加工技术是为制造微三维结构而发展起来的,即按照设计图形在硅片(或其他材料)上有选择地去除一部分硅材料,形成微机械结构,它是 MEMS 技术中最成熟的,已广泛用于硅微加速度器,并用于流体传感器、墨水喷嘴和微阀等。制造集成微电子体系的技术主要包括:晶体生长与制造基片;薄膜制备;光刻;刻蚀和切块、封装等。

体微加工技术的光键技术是刻蚀,它包括干法和湿法两类刻蚀法。对于硅片,鉴于其在多晶或单晶(具有不同的晶向)或其他环境下在刻蚀液里具有不同的刻蚀力,因而刻蚀分为各向同性刻蚀和各向异性刻蚀。各向同性刻蚀是指刻蚀时,刻蚀速率在各个方向相同。各向异性刻蚀的刻蚀速率与多方面的因素有关。对硅片的(100)面的刻蚀速率可以比它的(111)面的高 100 倍。也可以采用掺杂法(重掺杂区的刻蚀速率相对来说要小得多)和电化学止停刻蚀法(刻蚀将在 p-n 结不同极性区停止)进行有选择性的刻蚀。许多微机械结构均需将硅片刻蚀出深腔,形成隔膜。图 1.3 示出了体微加工技术制造的硅压力传感器。

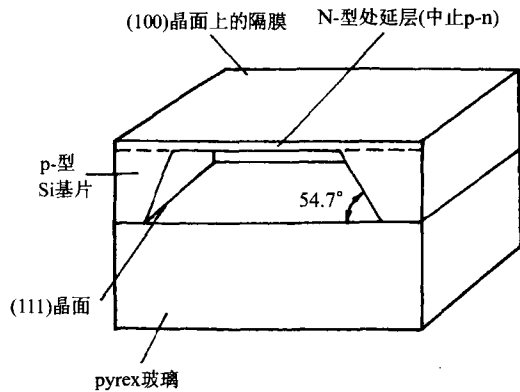
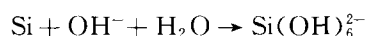
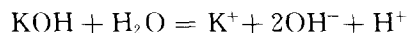


图 1.3 体微加工技术制造的硅压力传感器中的硅隔膜

硅微压力传感器可用于很大的压力范围(60Pa~68000kPa)。这里采用双面抛光的硅基片,用扩散与离子注入掺硼形成 p+ 和 n+ 富集区作电化学刻蚀的终止层。刻蚀形成的深腔与 Si 的(100)面平行,与(111)面成 54.74°角。

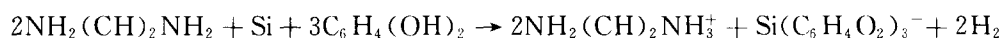
湿法各向异性刻蚀硅片的刻蚀液主要有:

(1) KOH 系统 常用 KOH、H₂O 和(CH₃)₂CHOH(异丙醇,IPA)的混合溶液。其腐蚀反应方程式为



含水硅化物与异丙醇形成可溶解的硅络合物离开硅的表面。例如用 KOH(44g/100mL 水)85℃,刻蚀速率 1.4μm/min,各向异性比((100)/(111))为 400 : 1,作为掩模板的 Si₃N₄、SiO₂ 的刻蚀速率为 0.14nm/min;

(2) EDP 系统 乙烯二胺(NH₂(CH)₂NH₂)、邻苯二酚(C₆H₄(OH)₂)和水简称 EPW。其腐蚀反应方程式可表达为



EPW 水溶液(750mL 乙烯二胺、120g 邻苯二酚、100mL 水),115℃,刻蚀速率为 0.75μm/min,各向异性比为 35 : 1,对掩模板 SiO₂ 的刻蚀速率为 0.2nm/min。

干法刻蚀主要采用物理法(溅射、离子铣)和化学等离子刻蚀(反应离子刻蚀),适用于各向同性及各向异性刻蚀。选择合适的掩模板可得到深宽比大、图形准确的三维结构。目前在微机电系统已有广泛的应用。

1.2.2 表面微加工技术

表面微加工是以硅片作基片,通过淀积与光刻形成多层薄膜图形,再把下面的牺牲层经刻蚀去除,保留上面的结构图形的加工方法。表面微加工不同于体加工,它不对基片本身进行加工。在基片上有淀积的薄膜,它们被有选择地保留或去除以形成所需的图形。表面微加工的主要工艺是湿法刻蚀、干法刻蚀和薄膜淀积。薄膜(主要是多晶硅、氧化硅和氮化硅等)为微器件提供敏感元件、电接触、结构层、掩膜层和牺牲层。牺牲层的刻蚀是表面微加工的基础。牺牲层是指做在淀积的图形材料层下的可溶解的淀积薄膜,通常是二氧化硅,它可用湿法进行刻蚀。牺牲层被刻蚀后,留下的是无支撑的薄膜结构。图 1.4 是表面微加工过程的示意图。首先在基片上淀积绝缘层和牺牲层(例如 SiO₂),如图 1.4(a)所示;然后淀积结构层(例如多晶硅)经光刻得到微结构图形,如图 1.4(b)所示。对此进行湿法刻蚀,把牺牲层 SiO₂ 去除,便可得到无支撑的微结构。

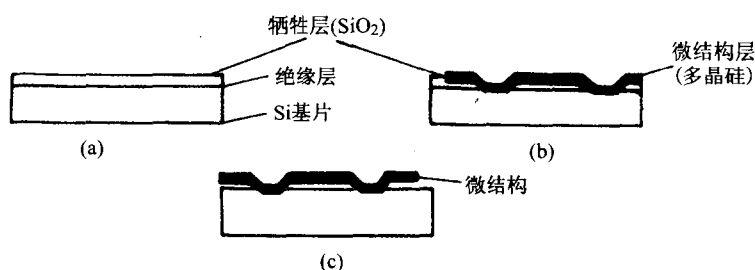


图 1.4 表面微加工示意图

1.2.3 高深宽比微加工技术

有多种技术可以用于微机电系统高深宽比加工^[8,9]。如反应离子刻蚀(RIE)可获得数十微米,甚至数百微米深度的台阶。对特种材料还可以用特种方法,如对含有光敏离子 Cu⁺、Ag⁺ 和 Au⁺ 等的光敏微晶玻璃基片,通过高压汞灯曝光构成图形,经微晶化热处理和腐蚀得到深度达数百微米的图形^[10]。LIGA 技术被认为是最佳高深宽比的微加工技术,加工宽度为

几微米、深度高达 $1000\mu\text{m}$ ，且可实现微器件的批量生产。它是 X 光深度光刻、微电铸和微塑铸三种工艺的有机结合^[11]，是利用短波段高强度的同步辐射 X 光制造三维微器件的先进制造技术。LIGA 技术的三个主要工艺是：X 光掩模板制造，X 光深度光刻技术和微电铸技术。

X 光掩模板必须有选择地透过与阻挡 X 光。一般采用 $100\mu\text{mBe}$ 或镀有 $10\mu\text{mAu}$ 的 $2\mu\text{mTi}$ 片。

X 光深度光刻的深度要达到数百微米，用同步辐射的高强度 X 光可以大幅度缩短曝光时间。X 光光刻胶是 PMMA 基聚合物。

微电铸是将显影后的光刻胶空隙用电镀铸入各种金属，如 Ni, Cu 和 FeNi 等。若在微电铸时制造微塑铸模具，便可重复批量制造出相同的微器件。

目前用 LIGA 技术已制造出微型齿轮、微加速度传感器、微红外滤光器等多种微器件。

1.2.4 键合技术

由上述工艺制造的微构件要通过键合来制成微机械的部件，键合技术主要可分为硅熔融键合(SFB)和静电键合两种^[12]。

硅熔融键合是 Lasky1985 年提出的^[13]。硅片与硅片直接或通过一层薄膜(如 SiO_2)进行原子键合。将硅片浸泡在 OH^- 的溶液，然后贴合，在 O_2 或 N_2 气氛中高温处理，温度在 $1000\sim 1100^\circ\text{C}$ ，邻近原子间的相互反应产生了共价键，形成键合。两个原子单层的键合可以具有与其未键合时相同的电学性能和力学性能。由于键合时必须要在高温下暴露，因此要在集成(IC)前进行。Nova 传感器公司首先用 SFB 法制造了一体化硅加速度器^[7]。静电键合(阳极

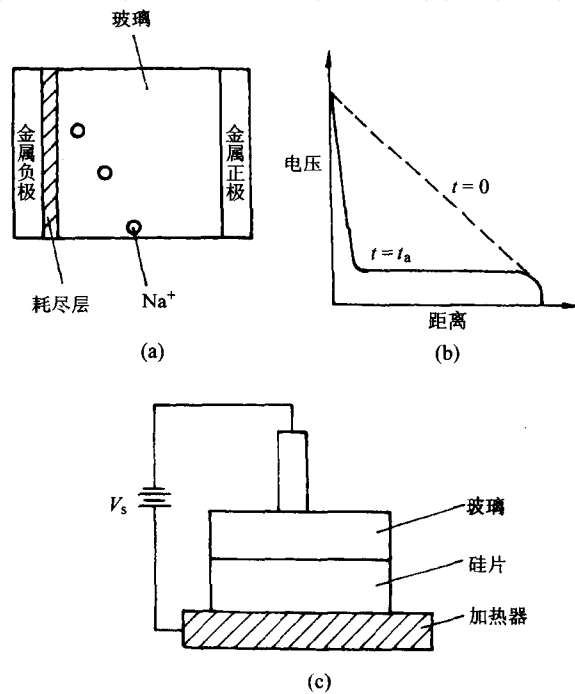


图 1.5 静电键合示意图

(a) Na^+ 向负极漂移; (b) 玻璃的电压—距离曲线; (c) 静电键合装置

键合)可将玻璃与金属、合金或半导体键合在一起,不用粘合剂。键合界面气密性和稳定性都好。玻璃在低于软化温度的高温下,导电的离子是 Na^+ 。在外电场的作用下, Na^+ 向负极的玻璃表面运动,形成空间电荷聚集的极薄层(耗尽层)。如图 1.5 所示,在一定的外电压下,电流随时间而迅速衰减。

静电键合装置如图 1.5(c)所示。需键合的硅片接正极,玻璃接负极。 Na^+ 向硅-玻璃界面方向迁移,使界面附近形成带负电荷的耗尽层。硅片带正电荷,因而硅片与玻璃间存在静电吸引力,使紧密接触的界面在高温下发生化学反应,形成化学键的键合。用低熔点的玻璃作中间层,也可实现硅-硅键合。

静电键合是传感器封装的主要工艺,已用于微机械的传感器和场发射阵列^[12,14]等方面。其他粘结技术也用于微构件的制造^[15]。

综上所述,MEMS 的主要技术和集成电路 IC 工艺是制备微传感器、微执行器和微机电系统的基础。为了使器件的稳定性、寿命和成本更需要。这些工艺技术也要不断发展。

其中一方面要发展新的设备和工艺流程以获得更高的产量、更易于生产和更好的重复性。另一方面为了研究和少量制造的需要,发展计算机控制单片生产设备(CAD 易适应的制造设备)是当务之急。

1.3 微机电系统的主要材料

1. 硅

硅是 MEMS 用的主要结构材料。它不仅是良好的半导体,而且也是一种很好的结构材料。硅片大量用于微构件,它可用化学刻蚀和离子刻蚀进行各向同性与各向异性刻蚀成所需的结构。表 1.2 列出了硅及硅化物的物理参量,同时还给出一些常用的其他材料参数。

2. 多晶硅

它是 MEMS 最常用的结构材料之一,它易用 IC 的工艺进行构件制造,且机械性能满足要求。用微机械加工制造的典型微器件多晶硅薄膜厚度至少大于 $3\mu\text{m}$ ^[14]。更厚的膜其强度和韧性更好,因此现在正研制 $10\mu\text{m}$ 厚的多晶硅器件。用于 MEMS 的其他常用材料还有多孔硅、氮化硅、TiNi 形状记忆合金及压电陶瓷等。

表 1.2 硅及一些材料的机械性能

材料	屈服强度 10^9 N/mm^2	努氏硬度 N/mm^2	杨氏模量 10^{11} N/m^2	密度 g/cm^3	热导率 $\text{W/(cm} \cdot ^\circ\text{C)}$	热膨胀系数 $(10^{-6}/^\circ\text{C})$
金刚石	53	70000	10.35	3.5	20	1
碳化硅	21	24800	7	3.2	3.5	3.3
氮化硅	14	34860	3.85	3.1	0.19	0.8
铁	12.6	4000	1.96	7.8	0.803	12
硅	7	8500	1.9	2.3	1.57	2.33
钨	4	4850	4.1	19.3	1.78	4.5
不锈钢	2.1	6600	2	7.9	0.329	17.3
铝	2.1	2750	3.43	10.3	1.38	5
铝	0.17	1300	0.7	2.7	2.36	25

1.4 智能系统集成

利用以集成电路工艺为基础的微机械加工技术已成功地制造出微传感器和微机械零部件。这种我们能够批量生产微机电集成系统。其主要的特点在于：微型化、多功能化和微电子化，从而智能地实现各种不同的功能。微型化是首要的，但由于尺寸效应，不可能无限缩小体积。多功能是微机电系统成功的关键，然而要完成大的任务，必须微电子集成使数个微机电部件联合工作^[17]。

21 世纪社会的需求是快速传递和获得信息、更好的生活环境以及改善社会福利，经过不断发展新型集成微机电系统，可以在不同的程度上满足上述要求。

微传感器和微执行器是微机电系统实现物理功能的关键器件，微执行器的驱动力与宏观执行器的有所不同，后者主要是电磁力，而对微执行器它的驱动力也可以是静电力、压电力、形状记忆合金和热膨胀力。表 1.3 列出了微机电加工工艺制造的微执行器有关参数。

表 1.3 微机电加工工艺制造的微执行器

类别	接触/支持	尺寸	速度或频率	材料	输入
静电马达	滑移	$\phi 60\mu\text{m}\sim 120\mu\text{m}$	500r/min	多晶硅	60~400V
静电马达	滑移	$\phi 100\mu\text{m}$	15000r/min	多晶硅	50~300V
静电马达	转动	$\phi 100\mu\text{m}$	300r/min	多晶硅	26~105V
静电马达	弹性	$5\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$	10~100kHz	多晶硅	$40V_{d.c.}+10V_{a.c.}$
电磁马达	转动	$\phi 1\text{mm}\sim 2\text{mm}$	3000r/min	硬磁材料	
压电悬臂梁	弹性	$8\mu\text{m}\times 200\mu\text{m}\times 1000\mu\text{m}$		Si+ZnO	30V
形状记忆合金	(弹性)	$2\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}\times 2000\mu\text{m}$	20Hz	TiNi	40V, 2mA
热双形貌	弹性	$6\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$	10Hz	聚合物	4mW

微机电系统的智能化是将高性能的传感器、执行器，大量的微处理器集成在一个系统里，即把传感、判定和运动组建在一起高质量地执行任务。目前，多维传感器系统、多层信息处理系统等的发展使传感器、执行器和界面电子学有机结合成为新型的 MEMS 器件。Henry Baltes^[4]综述了集成微换能器的发展趋势。他描述的用于磁角度测量的 MEMS 的性能列于表 1.4。

表 1.4 磁角度测量的 MEMS 的性能

项目	性能	项目	性能
工艺	$2\mu\text{m}$, 工业 CMOS	B 输入范围	20~200mT
能源供给	3V	频带宽	200Hz
输出	数字显示	噪音	$200\text{nT}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$
功耗	9mW	角分辨	1° , B=100mT

集成微流体系统是当前所关注的 MEMS 器件^[19]，喷墨打印头已经商业应用，其他的正在化学工业、化学分析和医学上获得应用。它由微泵、微阀和微通道组成。为了实现自检和自标定，必须把这些微器件集成，关键是把化学传感器结合到系统中，构成有智能的微液体集成系统。

参考文献

- [1] Weissler G. Microsystems. Sensor Rep. 1994. p2
- [2] Blaser E M, Ko W H, Yon E T. A miniature digital pressure transducer. 24th Annual Conf. on Eng. in Med. & Biol. , Las Vegas, Nevada. Nov. 1971. p211
- [3] Ko W H, Bao M H & Hong Y D. A high sensity integrated circuit capacitive pressure transducer. IEEE Trans. Elect. Dev. , ED-29. 1982. p48
- [4] Petersen K E. Silicon as a mechanical material. Proc. IEEE, 70. 1982. p420
- [5] Bryzek J. Impact of MEMS technol. on society, Sensors & Actuators A, 56. 1996. p1
- [6] Petersen K. From microsensors to microinsgtruments, Sensors & Actuators, 56. 1996. p143
- [7] Bryzek J & Petersen K. Micromachines on the March. IEEE Spectrum, 1994, May
- [8] 周兆英,叶雄英,李勇等. 微型系统和微型制造技术. 微米纳米科学与技术, 1996, 2 : 1
- [9] 王渭源,潭淞生,陆德仁等. 微电子机械基础技术及应用. 微米纳米科学与技术, 1995, 1 : 9
- [10] Massoud-Ansari S. Mangat P S. Klein J. et al. A multi-level. LIGA-like process for three dimensional actuators. IEEE, 1084-6999, 1996. p285
- [11] 陈迪. 用 LIGA 技术制造微器件. 微米纳米科学与技术, 1995, 1 : 23
- [12] 黄庆安. 硅微机械加工技术. 北京:科学出版社, 1996
- [13] Lasky J. B. Silicon-on insulator by bonding and etch back. Proc. Int. Electron Device Meeting, USA, 1985. p684
- [14] 黄庆安. 用键合工艺制造大面积场发射阵列. 科学通报, 1993,38 : 781
- [15] Mass D. Buestgens B. Fahrberg J. et al. Fabrication of microcomponents using adhesive bonding techniques. IEEE, 1084~6999. p331
- [16] Kahn H. Stemmer S. Nandakumar K. et al. Mechanical proper of thick surface micromachined polysilicon Films. IEEE, 1084~6999, 1996. p343
- [17] Hiroyuki Fujita. Future of actuators and microsystems. Sensors and Actuators A 56. 1996. p105
- [18] Baltes H. Future of IC microtransducers. Sensors and Actuators A 56. 1996. p179
- [19] Zengerle R. And Sandmaier H. Microfluids. 7th International symp. On Micro Machine and Human Science (MHS'96), Oct. 2~4. 1996. Nagoya, Japan

第2章 微机电系统的微加工技术

硅的微细加工,特别是硅微机械加工已成为微传感器、微执行器和 MEMS 迅速发展的关键因素。事实上,硅和在硅基片上制造的各种显微机械零件(称微机械)是 IC 制造技术的扩展技术。微机械的结构件性能差异很大,范围很广,包括:各种连杆、挡板、槽沟、孔、密封洞、棱锥、针、弹簧,各种复杂的机械悬挂件、齿轮、链环和微马达等。在这些微结构中有些还带有集成化的电路。近年来各种微结构件在微传感器和微执行器中得到了极为广泛的应用。尽管微机械零件的加工大部分采用 IC 工艺,但它与 IC 工艺的最大区别在于它的纵向高度要远大于普通 IC 工艺所能达到的纵向高度。为了便于读者能比较全面地了解微结构件加工工艺,下面先简单地介绍一下集成电路工艺。

2.1 集成电路工艺

集成电路(IC)工艺对于电子器件和系统的加工来说是一种成熟的工艺,从 20 世纪 50 年代的锗晶体管分离器件到今天的 64MB DRAMs, IC 加工技术是这场微电子革命的基础。本书简略回顾硅集成电路制造工艺,目的是介绍技术和术语。由于受篇幅的限制,这里只介绍主要的工艺步骤,读者需要可参考其他文献^{[1]~[9]}。

图 2.1 给出了 IC 加工的主要步骤:半导体晶体生长;硅片切割和抛光;薄膜生长(包括外延层、二氧化硅、氧化铝、氮化硅、多晶硅薄膜、金属化薄膜);掺杂(包括、扩散、离子注入);光刻;测试;切割封装。

2.1.1 晶体生长和硅片预处理

晶体生长是一种特殊技术,为了获得纯度较高的单晶锭,晶体生长工艺对环境有极高的要求。常用的硅单晶锭制备工艺为悬浮区熔工艺。单晶锭的技术控制参数包括:硅单晶锭的直径;单晶锭的取向;单晶锭的导电类型。生长好的单晶锭通过切、研磨和抛光,达到作为硅片的要求。一般来说,研究和实验室用的硅片直径为 75~100mm,厚度为 500 μm ,生产用的硅片直径为 150~200mm,厚度为 750 μm ~1mm。除了硅片

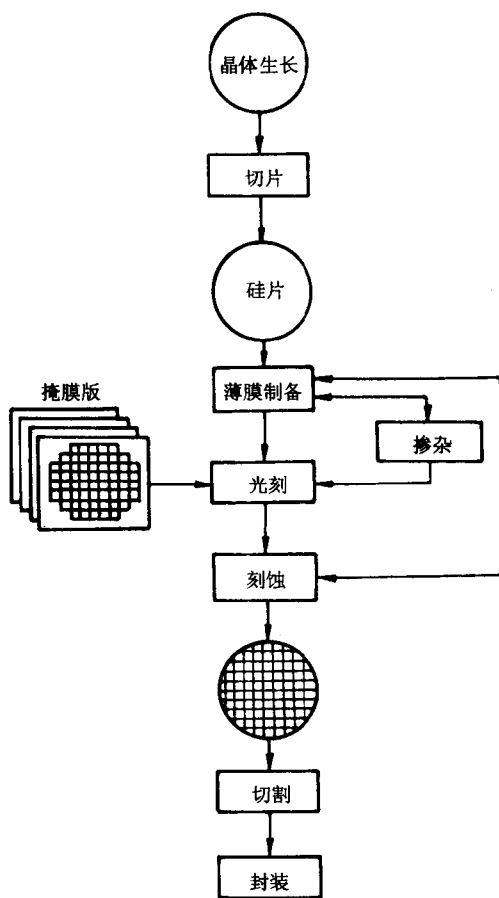


图 2.1 集成电路加工的主要工艺步骤