

# 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(包括集成微电子、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<sup>[1]</sup>把 MEMS 称为系统工业发展所需要的“维生素”见图 1.1。

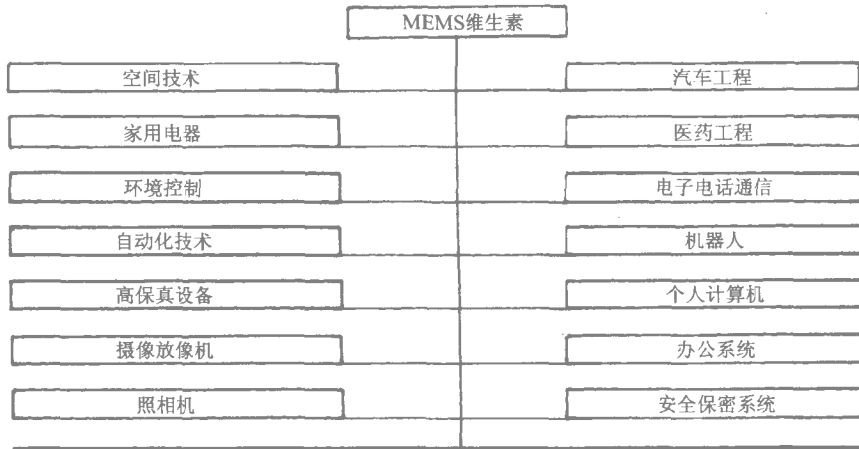


图 1.1 多种工业需要 MEMS 技术作维生素

### 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<sup>[2]</sup>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<sup>[3]</sup>，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<sup>[4]</sup>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<sup>[5]</sup>，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<sup>[5]</sup>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/in<sup>2</sup>；

(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<sup>[6]</sup> 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。

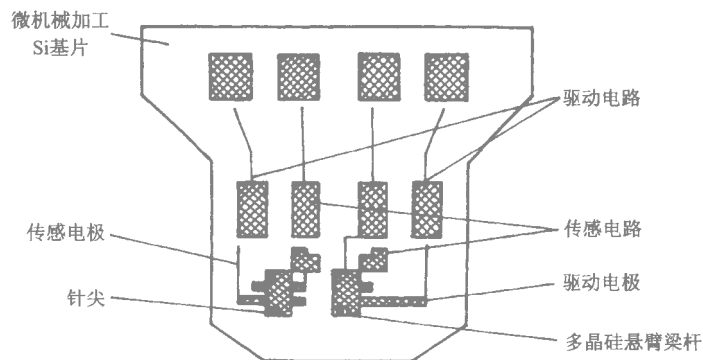


图 1.2 MEMS 的原子力显微镜，传感器与驱动电子系统集成，针尖以原子尺度运动<sup>[7]</sup>

(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 (0.5m<sup>2</sup>)。

- (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 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。

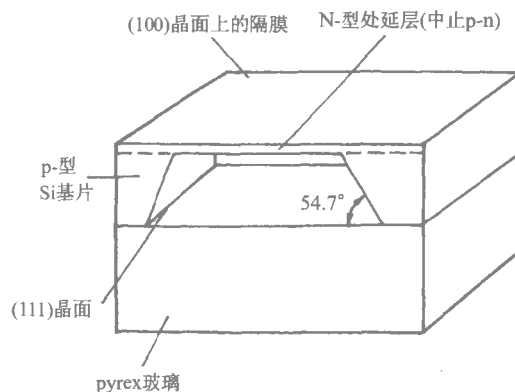
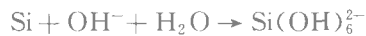


图 1.3 体微加工技术制造的硅压力传感器中的硅隔膜

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、H<sub>2</sub>( ) 和 (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CHOH(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 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、SiO<sub>2</sub> 的刻蚀速率为 0.14nm/min;

(2) EDP 系统 乙烯二胺 NH<sub>2</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>NH<sub>2</sub>、邻苯二酚 (C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(OH)<sub>2</sub>) 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 SiO<sub>2</sub> 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 SiO<sub>2</sub>) 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 SiO<sub>2</sub> 去除, 便可得到无支撑的微结构。

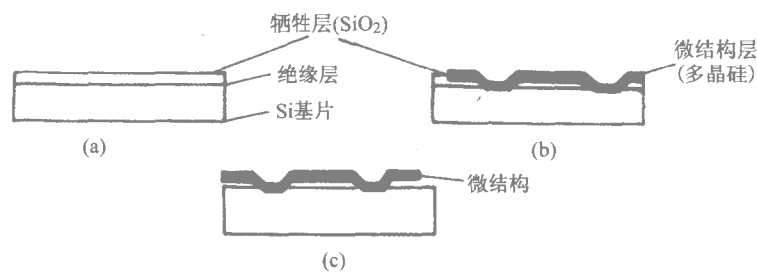


图 1.4 表面微加工示意图

## 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<sup>[8,9]</sup>。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<sup>+</sup>、Ag<sup>+</sup> 和 Au<sup>+</sup> 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<sup>[10]</sup>。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、微电铸和微塑料三种工艺的有机结合<sup>[11]</sup>，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料模具，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<sup>[12]</sup>。

硅熔融键合是 Lasky1985 年提出的<sup>[13]</sup>。硅片与硅片直接或通过一层薄膜(如  $\text{SiO}_2$ )进行原子键合。将硅片浸泡在  $\text{OH}^-$  的溶液，然后贴合，在  $\text{O}_2$  或  $\text{N}_2$  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<sup>[7]</sup>。静电键合(阳极

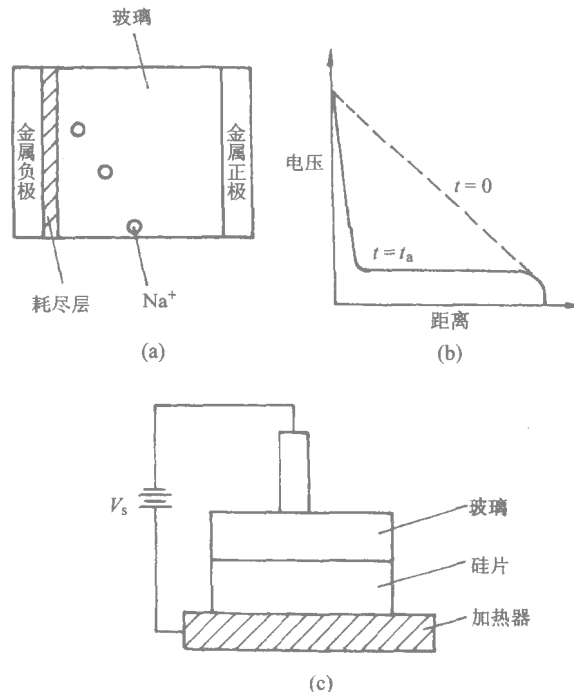


图 1.5 静电键合示意图

(a)  $\text{Na}^+$  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  $\text{Na}^+$ 。在外电场的作用下,  $\text{Na}^+$  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。 $\text{Na}^+$  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<sup>[12,14]</sup>等方面。其他粘结技术也用于微构件的制造<sup>[15]</sup>。

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、寿命和成本更符合需要。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  $3\mu\text{m}$ <sup>[14]</sup>。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 $10^9 \text{ N/mm}^2$	努氏硬度 $\text{N/mm}^2$	杨氏模量 $10^{11} \text{ N/m}^2$	密度 $\text{g/cm}^3$	热导率 $\text{W}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$	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<sup>[17]</sup>。

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 Baltet<sup>[4]</sup>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	$1^\circ, B=100\text{mT}$

集成微流体系统是当前所关注的 MEMS 器件<sup>[18]</sup>，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] Baltés 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<sup>[1]~[9]</sup>。

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 $\mu\text{m}$ ，生产用的硅片直径为 150~200mm，厚度为 750 $\mu\text{m}$ ~1mm。除了硅片

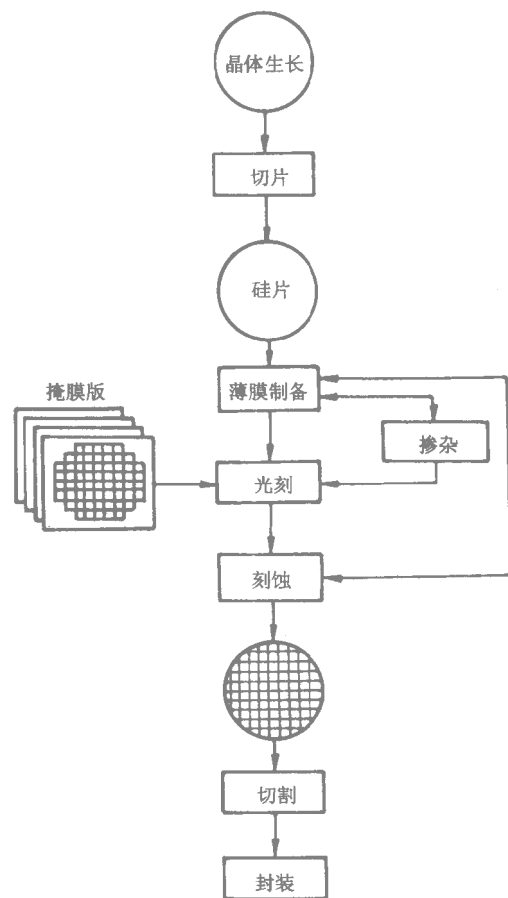


图 2.1 集成电路加工的主要工艺步骤

的直径和厚度之外，硅片的电阻率、掺杂浓度、机械性能、电学性能和化学性能都要满足制造集成电路的需要。另外，还有一些要求，包括：弯曲、尖点、边角轮廓、表面平整度、位错、划伤、直径和取向的误差、少数载流子寿命、重金属杂质浓度和其他损伤密度等。

## 2.1.2 氧化

硅的表面氧化在整个硅片加工工艺中是一个基础工艺。氧化层生长工艺有热氧化，CVD和溅射三种。生长的氧化层主要有四大作用：硅的表面保护；作为离子注入和扩散的掩膜；电介质薄膜；衬底和其他材料之间的界面层。硅极易氧化，在室温下硅表面一般都有  $20\mu\text{m}$  左右的自然氧化层。在干和湿的氧气气氛中，提高温度可生长较厚的氧化层。在一定的温度条件下，氧化层的厚度与时间之间呈抛物线关系<sup>[1]~[8]</sup>。

## 2.1.3 光刻

光刻是一种图形转移技术。光刻分两部分，首先是用辐照方法将掩膜版上的图形转移到光敏材料上（光刻胶），然后用光刻胶作为掩膜通过刻蚀工艺将光刻胶上的图形转换到其他薄膜材料或者基片上形成结构件。辐照可以用光学、X-射线、电子束或离子束。刻蚀可用湿法刻蚀和干法刻蚀。随着微细加工技术的发展，刻蚀已发展成为一种单独的加工技术，关于刻蚀技术在以后的章节中讨论<sup>[5]~[7]</sup>。

在光刻工艺中最重要的材料是光刻胶。光刻胶可分为正胶和负胶两种，曝光、显影后光刻胶上的图形和掩模板上的图形相同为正胶，反之为负胶。光刻胶的主要参数包括分辨率、灵敏度、抗蚀性、热稳定性、粘附性、粘度、有效寿命和着火点。考虑到操作人员的安全，有毒物质的最大含量一般为百万分之几。光刻工艺一般包括硅片脱水、烘烤、涂增粘剂（如需要）、涂光刻胶、前烘、曝光、显影、检查、坚膜（后烘）或UV硬化处理。然后通过刻蚀将图形转移到其他薄膜或者硅片上，最后用化学试剂或者氧的等离子体去胶，完成整套光刻工艺。

在光刻工艺中，有一种代替刻蚀方法的工艺，我们称之为剥离工艺（Lift off）。在剥离工艺中，首先形成光刻图形，然后沉积薄膜，最后用化学试剂去除光刻胶，此时连同不需要的薄膜一同去除，这个过程正好与刻蚀过程相反，见图2.2。

## 2.1.4 刻蚀

刻蚀就其形式来说可分为有掩膜刻蚀和无掩膜刻蚀，无掩膜刻蚀较少使用，故这里不作介绍。有掩膜刻蚀又可分为湿法刻蚀和干法刻蚀。湿法刻蚀一般用化学方法，这种方法刻蚀

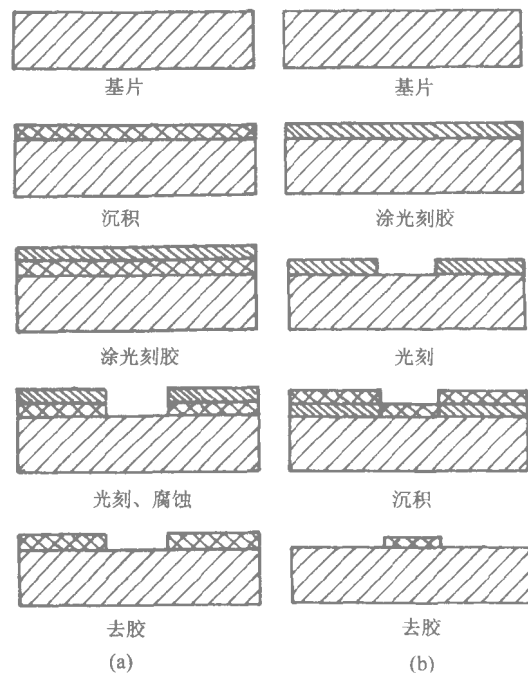


图 2.2 光刻工艺过程图  
(a) 腐蚀工艺;(b) 剥离工艺

效率高,成本低,但是其刻蚀精度不高,公害严重(用大量的化学试剂)。干法刻蚀种类很多,有溅射刻蚀、离子铣、反应离子刻蚀和等离子刻蚀等。干法刻蚀中包括了化学反应和物理效应,因此其刻蚀精度较高,且适用于各种材料,包括半导体、导体和绝缘材料。表 2.1 和表 2.2 列出了部分电介质和金属的刻蚀剂<sup>[1],[5],[6],[7],[11]</sup>。刻蚀工艺的主要参数包括钻蚀、误差、刻蚀速率、灵敏度、尺寸控制和负载效应等。由于刻蚀工艺比较复杂,各种不同材料的反应机理各不相同,限于篇幅,读者如有需要可参考其他文献<sup>[4],[5],[7],[8],[11]</sup>。

表 2.1 集成电路工艺中常用的非晶薄膜湿法腐蚀剂

材料	腐蚀剂	备注
二氧化硅 SiO <sub>2</sub>	28ml HF, 170ml H <sub>2</sub> O, 113gNH <sub>4</sub> F	(100~2500)nm/min, 25℃
	15ml HF, 10ml HNO <sub>3</sub> , 300ml H <sub>2</sub> O	12.8nm/min, 25℃
	1ml(28ml HF, 170ml H <sub>2</sub> O, 113gNH <sub>4</sub> F)+7ml H <sub>2</sub> O	80nm/min, 25℃
硼硅玻璃 BSG	1ml HF, 100ml HNO <sub>3</sub> , 100ml H <sub>2</sub> O	30nm/min, 9mole% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; SiO <sub>2</sub> , 5nm/min
	4.4ml HF, 100ml HNO <sub>3</sub> , 100ml H <sub>2</sub> O	75nm/min, 9mole% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; SiO <sub>2</sub> , 13.5nm/min
磷硅玻璃 PSG	28ml HF, 170ml H <sub>2</sub> O, 113g NH <sub>4</sub> F	550nm/min, 8mole% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	15ml HF, 10ml HNO <sub>3</sub> , 300ml H <sub>2</sub> O	3.4μm/min, 16mol% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ; SiO <sub>2</sub> 11nm/min
	1ml(28ml HF, 170ml H <sub>2</sub> O, 113g NH <sub>4</sub> F)+7ml H <sub>2</sub> O	80nm/min
氮化硅 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	HF	14nm/min, CVD 1100℃ 75nm/min, CVD 900℃ 100nm/min, CVD 800℃
	BHF	5~1nm/min
	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	10nm/min, 180℃
多晶硅 Poly-silicon	6ml HF, 100ml HNO <sub>3</sub> , 40ml H <sub>2</sub> O	800nm/min, 角平滑
	1ml HF, 26ml HNO <sub>3</sub> , 33ml CH <sub>3</sub> COOH	150nm/min
SiPOS	1ml HF, 6ml H <sub>2</sub> O, 10ml NH <sub>4</sub> F(40%)	200nm/min, 20%氧
Al	1ml HCl, 2ml H <sub>2</sub> O	80℃线条良好
	4ml H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , 1ml HNO <sub>3</sub>	35nm/min 线条良好
	4ml CH <sub>3</sub> COOH, 1ml H <sub>2</sub> O	
	16~19ml H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , 1ml HNO <sub>3</sub> , 0~4ml H <sub>2</sub> O	(150~240)nm/min
	0.1mol K <sub>2</sub> Br <sub>4</sub> O <sub>7</sub> , 0.5mol KOH 0.6mol K <sub>3</sub> Fe(CN) <sub>6</sub>	14μm/min, pH值 13.6
Au	3ml HCl 1ml HNO <sub>3</sub>	(25~50)μm/min
	4gKI, 1gI <sub>2</sub> , 40ml H <sub>2</sub> O	(0.5~1)μm/min, 光刻胶掩膜
Cr	1ml HCl	80nm/min 需要去钝化
	1ml HCl, 9ml 饱和 CeSO <sub>4</sub> 溶液	80nm/min 需要去钝化
	1ml(1gNaOH 2ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	25~10nm/min
	3ml[1gK <sub>3</sub> Fe(CN) <sub>6</sub> , 3ml H <sub>2</sub> O]	光刻胶掩膜
W	34g KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> , 13.4gKOH 33g K <sub>3</sub> Fe(CN) <sub>6</sub> H <sub>2</sub> O	160nm/min 光刻胶掩膜

表 2.2 VLSI 中某些干法刻蚀工艺中典型的刻蚀速率和选择性<sup>[7]</sup>

被刻蚀材料 (M)	气 体	刻蚀速率 nm/min	选择性 (M)/光刻胶	选择性 (M)/Si	选择性 (M)/SiO <sub>2</sub>
Al, Al-Si, Al-Cu	BCl <sub>3</sub> + Cl <sub>2</sub>	50	5~8	3~5	20~25
多晶硅	Cl <sub>2</sub>	50~80	5		25~30
SiO <sub>2</sub>	CF <sub>4</sub> + H <sub>2</sub>	50	5	20	
磷硅玻璃	CF <sub>4</sub> + H <sub>2</sub>	80	8	32	
CaAs	CCl <sub>4</sub> + O <sub>2</sub>	600			
Si	SF <sub>6</sub> + Cl <sub>2</sub>	100~450	5		80

### 2.1.5 扩散和离子注入

扩散和离子注入是掺杂的主要工艺手段。在带有掩膜的硅片表面某些区域内，可通过扩散或离子注入工艺来控制掺杂原子的数量，从而形成 N 型和 P 型区。通过掺杂可制备成有源器件、刻蚀终止层、导电多晶硅和微机械器件。在高温扩散炉内，带有掺杂剂的气体通过硅片表面的现象称为扩散。对于硅来说，硼是典型的 P 型掺杂剂（受主），而砷和磷是 N 型掺杂剂（施主）。上述三种掺杂剂在硅中的溶解度大约为  $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。掺杂源可以是气体、固体和液体，而载体则多数用氮气。扩散分两个主要步骤：预淀积和再分布。预淀积期间，来自扩散源的杂质原子淀积在硅片表面并扩散进入硅体，进入硅片表面的掺杂原子的数量受到这种掺杂剂在硅片中固体溶解能力的限制。第二步是再分布，再分布是在高温下将预淀积好的片子再扩散，使硅片中的掺杂原子从硅的表面深入到某一特定深度（根据要求而定），形成纵向重新分布。

根据 Fick 定律的扩散理论，假定在扩散过程中扩散系数是一个常数，则对于预淀积而言，其表面浓度为常数，扩散过程可用余误差函数来描述，这种计算对低掺杂浓度有效。当掺杂浓度较高时，由于扩散系数变成掺杂剂浓度的函数，使得扩散过程复杂化，一般的数学公式不能表达其过程，如有需要读者可通过计算机模拟来估算扩散的掺杂剂在硅中的分布曲线<sup>[1]~[8]</sup>。

离子注入也是一种掺杂技术，它的掺杂过程不需要在高温下进行。它通过高能束流将杂质离子直接注入到硅片表面。离子注入工艺的主要优点是能精确地控制杂质原子在硅中的数量和位置。杂质在硅中的分布主要取决于掺杂离子的能量和掩膜的特性。这类技术的缺点是，由于引入了高能粒子，造成硅片表面的晶格损伤比较严重，因此适当的退火工艺是必不可少的。离子注入的设备一般都比较昂贵。

### 2.1.6 金属化

金属化是指在硅片表面均匀地生长一层金属薄膜，其功能主要是形成内部连线、欧姆接触、金属半导体接触，有时也可作为器件表面的钝化膜起到保护作用。金属薄膜的生长方法包括：真空蒸发、溅射、化学气相淀积和电镀等。

真空淀积是一种使用最为广泛的淀积工艺。它既可以淀积导体，也可淀积电介质。常用的加热源用电子束轰击和电阻加热，同时样品台可以旋转以保证淀积薄膜的均匀性和良好的台阶覆盖性。这种技术对于合金（因为各种元素的淀积速度有差异）和某些材料（气化温度高）

难以加工。真空蒸发淀积薄膜的速率较高，一般几分钟可达微米量级。溅射淀积是另一种比较常用的薄膜淀积工艺。它可分为直流溅射和射频溅射，为了提高薄膜淀积速率又引进了磁控溅射。但基本原理是相同的，主要是利用氩的等离子中的正离子轰击阴极（俗称靶），使靶材料以原子、分子为主的粒子状态淀积在基片表面形成薄膜。这种工艺的一个重要特点是，可在溅射期间加进反应气体，如氧气、氮气和氢气，与氩气适当混合来改变淀积薄膜的化学成分。这种工艺称为反应溅射。蒸发较为困难的金属（高温金属、合金）用溅射工艺比较方便。

### 2.1.7 化学气相淀积、等离子淀积和外延

化学气相淀积是薄膜生长技术中重要手段之一。用这种方法可生长各种薄膜，如金属、电介质、多晶硅和其他化合物。其基本原理是，选定的化学反应物质以气态通入 CVD 设备的腔室，在高温下反应剂气体发生化学反应，在加热的硅片表面上形成所需要的薄膜。CVD 可以在常压下进行（APCVD）也可在低压下进行（LPCVD）。这种工艺薄膜生长速率快，台阶覆盖性好，生产批量大，是 IC 生产工艺中常用的电介质薄膜生长工艺。

由 CVD 工艺发展产生的等离子增强化学气相淀积（PECVD）工艺除了拥有 CVD 工艺的优点之外，它与 CVD 工艺的主要区别是：CVD 工艺薄膜生长主要依靠气源在高温下发生的化学反应，而 PECVD 则采用了射频感应等离子体，提供了一个附加的能量参与反应。PECVD 的一个主要优点是薄膜生长温度较低，这使得那些在较高的 CVD 反应温度下热稳定性差的材料也能作为衬底淀积薄膜。PECVD 台阶覆盖性能好。针孔密度低，适应批量生产。PECVD 的主要缺点是：致密性较差，生长的薄膜中氢含量高，导致薄膜的化学、电学性能较差。在集成电路工业中各种类型的 CVD 理论较为复杂，欲详细了解可阅读参考文献<sup>[4],[5],[7],[12]</sup>。

CVD 工艺中的一个特例是外延生长工艺。一般来说 CVD 生长的薄膜为多晶或非晶材料，而外延则是在单晶材料上生长单晶材料。所生长的薄膜与衬底材料相同称为同质外延，如在 N 型硅衬底上外延生长 P<sup>+</sup> 硅。所生长的薄膜与衬底材料不同称为异质外延，如在砷化镓材料上生长砷铝镓。异质外延在 III-V 族半导体工艺中应用最广，而同质外延在 IC 工艺中使用最广，同时在体硅微机械工艺中同质外延也可用于为腐蚀终止层材料。

### 2.1.8 装配和封装

IC 工艺的最后一道工序是器件的装配和封装。其工艺过程包括芯片检查、芯片固定、导线焊接和封装。这些工艺的完成需要特殊的设备和技术<sup>[13],[14]</sup>。在封装工序中主要应考虑如下几个方面：方便信号线和电源的连接；芯片的冷却；封装材料必须有尽量相近的热膨胀系数与结构条件，所选材料必须考虑到环境因素的影响（如噪声、温度、光、气、压力等）。

## 2.2 微机电系统的硅微机械加工

微机械加工是固态传感器、执行器、微机电系统（MEMS）以及微光机电系统（MOEMS）的关键加工技术。微机械加工可分为体微机械加工和表面微机械加工两种类型。无论是体微机械加工还是表面微机械加工，基本材料都用硅（到目前为止），而加工工艺的基础都是 IC 技术。硅作为微电子工业的基础材料，人们对它的研究已极为深入广泛。硅作为微机械的基础材料

起始于 1970~1980 年之间到 80 年代末 90 年代初,人们对于硅在微机械中的应用才有了较为深刻的认识,从而使得二维集成电路技术发展至目前准三维结构的微机械加工技术<sup>[15]</sup>。表 2.3 给出了硅的物理性能。

表 2.3 硅的物理性能

晶格结构	立方晶体,金刚石结构	晶格结构	立方晶体,金刚石结构
密度	2.3g/cm <sup>3</sup>	压阻系数	-120~+120
原子密度	5×10 <sup>22</sup> /cm <sup>3</sup>	热传导率	150W/(m·K)
屈服强度(断裂)	1000MPa	热膨胀	2.5×10 <sup>-6</sup> /K
屈服强度(每层建议值)	100~200MPa	热电系数	80~1100mV/K
弹性模量	160GPa		

硅的块体微机械器件主要是通过光刻掩膜技术、硅刻蚀自终止技术、硅的湿法和干法技术来制作的。其中硅的各向异性刻蚀和刻蚀自终止技术是微机械加工的两大支柱技术。

### 2.2.1 硅湿法腐蚀的基本原理

硅的湿法腐蚀首先是将被腐蚀材料氧化,然后通过化学反应使其生成一种或多种氧化物再溶解。在同一腐蚀液中,由于混有各种试剂,所以上述两个过程是同时进行的。这种氧化物化学反应要求有阳极和阴极,而腐蚀过程中没有外接电压,所以半导体表面(这里指硅表面)上的点便作为随机分布的局部区域的阳极与阴极。由于这些局部区域化电解池的作用,半导体表面发生了氧化反应并引起相当大的腐蚀电流,一般超过 100A/cm<sup>2</sup><sup>[16]</sup>。每个局部区域(大于原子尺度)在一段时间内既起阳极作用又起阴极作用。如果起阴、阳两极作用的时间大致相等,就会形成均匀腐蚀。反之,若两者的时间相差很大,则会出现有选择性的腐蚀。同时,半导体表面的缺陷、腐蚀液的温度、腐蚀液所含的杂质、腐蚀时扰动方式以及半导体一腐蚀液界面的吸附过程等因素对腐蚀速度以及腐蚀结构的质量都有很大的影响。

用于这种化学腐蚀的化学试剂很多,常用的有 HF-HNO<sub>3</sub> 腐蚀系统(各向同性腐蚀), KOH、EDP 腐蚀系统(各向异性腐蚀)。对于 HF+HNO<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 或 CH<sub>3</sub>COOH 腐蚀系统,硅腐蚀的机理是,首先硅表面的阳极反应为



这里 h<sup>+</sup> 表示空穴即 Si 得到空穴后原来的状态升至较高的氧化态。腐蚀液中的水解离子发生下述反应:



Si<sup>2+</sup> 与 (OH)<sup>-</sup> 结合为:



接着 Si(OH)<sub>2</sub> 放出 H<sub>2</sub> 并形成 SiO<sub>2</sub> 即



由于腐蚀液中存在 HF 所以 SiO<sub>2</sub> 立即与 HF 反应反应式为



早期研究结果表明,对于 KOH(氢氧化钾)、H<sub>2</sub>O(水)和 (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CHOH(异丙醇,即 IPA)



## 2.2.2 体硅的各向同性腐蚀

硅的各向同性腐蚀在半导体工艺中以及在微机械加工技术中有着极为广泛的应用。而硅的各向同性腐蚀最常用的腐蚀液为 HF-HNO<sub>3</sub> 加水或者乙酸系统（通常称为 HNA 系统）<sup>[17],[18]</sup>。在 HNA 系统中，其简单的腐蚀机理是：首先是硝酸同硅发生氧化反应生成 SiO<sub>2</sub>，然后由 HF 将 SiO<sub>2</sub> 溶解，其反应式为



在这种腐蚀系统中，水（H<sub>2</sub>O）和乙酸（CH<sub>3</sub>COOH）通常作为稀释剂，在 HNO<sub>3</sub> 溶液中 HNO<sub>3</sub> 几乎全部电离，因此 H<sup>+</sup> 浓度较高，而 CH<sub>3</sub>COOH 是弱酸，电离度较小，它的电离反应为



在 HNO<sub>3</sub> + CH<sub>3</sub>COOH 溶液中，虽因有 HNO<sub>3</sub> 而使 H<sup>+</sup> 离子浓度较高，但加入 CH<sub>3</sub>COOH 后 H<sup>+</sup> 与 CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup> 发生作用，生成 CH<sub>3</sub>COOH 分子而且 CH<sub>3</sub>COOH 的介电常数（6.15）远远低于水的介电常数（81）因此在 HNO<sub>3</sub> + CH<sub>3</sub>COOH 混合液中 H<sup>+</sup> 离子浓度低。与水相比，CH<sub>3</sub>COOH 可在更广泛的范围内稀释而保持 HNO<sub>3</sub> 的氧化能力，即起到缓冲作用，因此腐蚀液的氧化能力在使用期内相当稳定。同时，减小 H<sup>+</sup> 离子浓度使阴极反应变慢，整个腐蚀速率也随之变慢，有利于工艺控制。

硅在 HF-HNO<sub>3</sub> 系统中的腐蚀速率 R 受到很多因素的影响，例如：环境温度、腐蚀液成分配比等对腐蚀速率的影响，人们对此进行了大量的研究工作。图 2.4 给出了不同表面取向的衬底（N 型硅）在高 HNO<sub>3</sub> 区几种配比下的关系图。腐蚀速率随温度的升高而增大，并呈线性关系，衬底不同，表面取向对腐蚀速率的影响不大，可认为是各向同性腐蚀。由于在高 HNO<sub>3</sub> 区化学反应受 HF 的浓度影响因此 HF 的浓度越高，腐蚀速度越大。

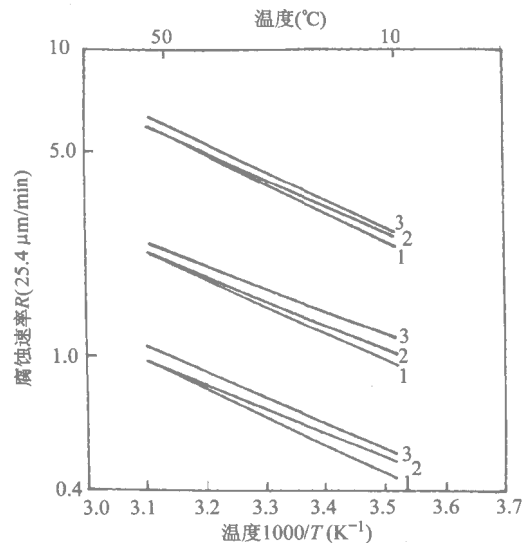


图 2.4 表面取向对腐蚀速率的影响与温度的关系

图 2.5 给出了高 HF 区的腐蚀速率与温度的关系。在高 HF 区腐蚀速率与晶体取向无关，但与是否加催化剂有关。在该区，化学反应受 HNO<sub>3</sub> 浓度的影响，HNO<sub>3</sub> 浓度越高，腐蚀