

微机械 的制造与应用

谢国章 编著



電子工業出版社

微机械的制造与应用

谢国章 编著

电子工业出版社

0602/13
内 容 提 要

微机械是用硅材料和半导体工艺制成的超微细机械装置，能直接与微电路相接，在生物、医疗及其他现代科技中有广泛应用，能解决许多前所不能解决的问题。本书用各种典型实例，介绍其制法和应用，供从事机械、电子、生物工程、医疗、环境工程、航天、原子能等工作的人员参考。

本书承学部委员、清华大学教授孟昭英先生审阅并写前言，作者谨致衷心的感谢。

微机械的制造与应用

谢国章 编著

责任编辑 郭延龄

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

电子工业出版社发行 各地新华书店经售

北京市燕山联营印刷厂印刷

开本：787×1092毫米 1/32 印张：2.75 字数：57.46千字

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数：2200册 定价：2.50元

ISBN7-5053-1314-2/TN·384

前 言

利用制备集成电路的工艺来制造微型机械元件是最近十数年间发展出来的一种新的工艺。它已得到了非常广泛的应用一如在航天技术、海洋工程、原子能、医药、汽车、生物工程等。

微电子元件的尺度已达到了微米和亚微米级，但只是由于非电子元件的接口和各种传感器未能做到同等尺寸的大小而限制了其体积、重量等的缩小。硅微型机械正是应这种需要而发展起来的。我们可以预见这个工艺将有更大的进展和应用范围。

谢国章君参阅近年来发表的多篇文献，编撰成书，较详尽地介绍了此种技术的各步细节和各类型的微型机械，诚为及时和应需的。希望它能成为开展此工作者的一本好的参考书。

孟昭英

1989年4月于清华大学

目 录

第一章 微机械的开发背景和制造技术基础	1
第一节 微机械的开发背景	1
第二节 硅材料的机械特性	5
第三节 微机械的通用加工技术	9
第二章 微机械的制造和应用实例	25
第一节 微型压力传感器	25
第二节 微型加速计	30
第三节 全集成气相色谱分析系统	34
第四节 墨水喷嘴阵列	39
第五节 光纤耦合器和光集成器件	43
第六节 微型冷却器	46
第七节 硅扭转镜	49
第八节 光调制器阵列	54
第九节 微开关	62
第十节 热印刷头	69
第十一节 微型机械手	72
第十二节 微型涡轮机	77
参考文献	81

第一章 微机械的开发背景和制造技术基础

第一节 微机械的开发背景

当前，微电子技术仍以十分迅猛的势头继续向前发展，它对现代科技、国防和工农业生产的影响也随之愈来愈广泛而深入。现在，从各种尖端科技到日常生活琐事都无不受到微电子技术无孔不入的渗透。

微电子技术的这种强大的生命力，除了来自微电路本身的作用外，还有赖于与微电路接口的各种传感器件和执行器件的协调一致的工作配合。如果把微电路比作人的大脑，那末，传感和执行器件就可比喻为人的五官和手脚。大脑的机能显然离不开五官和手脚的协调配合，只有大脑而没有五官和手脚，即使最聪明的大脑对外界仍无能为力。

传感和执行器件的作用的重要性，加上微电子技术日益迅猛发展的需要，已促使人们把更大的注意力集中在传感和执行器件的发展上。这有两大实际原因：第一，随着微电路向超大规模集成度的发展，电子系统已愈来愈小型化，这就要求与之接口的各种传感器件和执行器件也必须进一步小型化，必要时还须与微电路集成制在同一硅芯片上，使工作速度、功耗、热导、可靠性等性能都能与微电路匹配并达到与微电路同步、协调地工作，从而使整机达到最佳工作性能；第二，目前微电路因采用大生产方法已使其生产成本显著低

于接口的传感器件和执行器件的成本，这是因为后两者还未形成象微电路那样的大生产，故其成本还难以大幅度降下来，这就不能不妨碍电子系统成本的进一步降低，对电子工业带来愈来愈尖锐的矛盾。基于上述两大原因，在发展传感器件和执行器件的问题上，如何寻求小型化、低成本化的途径，是电子技术中一个十分重要的问题。

微电子工作者通过在微电路制造中的长期实践，逐步发现：利用硅单晶材料和硅微电路制造中常用的微细加工技术，能够生产出符合上述要求的传感器件和执行器件。按照这种思路，人们开始大量制造出各种高性能、低成本的微型传感器件和执行器件，从而开辟了一个崭新的技术领域。这种用硅材料和微细加工法制成的传感器件和执行器件，通称为微机械（Micromechanism）^{〔1〕}，其加工法称为微机械加工法。

微机械加工法之所以适宜于解决这个问题，有以下几个因素：

（1）硅材料来源广泛，价格便宜，又有成熟的提纯经验和完美单晶的制备经验，为制造价廉、实用的微机械提供了先决条件。

（2）硅微电路制造中业已成熟的薄膜淀积、光刻、腐蚀、外延、扩散等微细加工技术，都最适宜于制造具有微米级精度和各种特殊几何形状的微机械。由于加工方法和所用材料均与微电路相同，因而这种微机械均具有小型、可靠等特点，能与微电路集成在同一芯片上，速度、功耗等性能都可与微电路相容。这为微机械进一步小型化和整机性能最佳化创造了必要条件。

(3) 微机械加工法可以照搬生产微电路用的大生产方法，其批量大、重复性好、成品率高，因之，其生产成本无疑可大幅度降下来。

微机械的作用和潜力已引起半导体厂家的普遍重视，国外一些有实力的半导体公司和研究机构，纷纷投入力量，开发和生产了不少有特色的产品，其应用已广泛渗透到现代科技领域，特别是现代生物医疗领域，出色地解决了许多以前不能解决的问题，为人类作出了重要贡献。例如，美国斯坦福大学研究所研制的微型温度传感器可注射到肿瘤中去，用于在增高体温法中治疗癌症。所谓增高体温法，就是利用超声波或无线电波的能量把身体某一部位加热到 43°C 以杀死癌细胞；显然，温度不够就效果不好，温度过高又会伤害周围的组织，但医生很难判断肿瘤部位是否达到了这个温度，微型温度传感器很巧妙地解决了这个问题，它可以设计制造得足够小，以致可用注射器注射到肿瘤部位，而且只在加热时停留在那里，因而能出色完成这个任务。又如用微机械加工法制成的微型压力传感器，重量不超过 0.02g ，可用注射或吞服法植入人体，用于血管成形手术中监视疾病治疗情况；这种手术是在动脉中推动一个小气球，以此来清除动脉壁上的硬化斑块，压力传感器就放在气球后面，大夫通过它可以知道斑块清除工作进行得怎么样。这种压力传感器非常精巧，可和有关的信号处理电路集成制在同一芯片上，这种电路可将所得信号处理得使之适合计算机存储。这种压力传感器还可放在机器人手指尖上，使机器人产生触觉。用微机械加工法制成的微型泵和阀，也可植入人体内，它可按规定的剂量给出类似胰岛素那样的药物，以满足某种特殊疾病治疗

的需要。微机械在生物医疗以外的其他领域的出色应用，也是事例很多，举不胜举。例如，西电公司制造的光纤耦合器，是迄今实现光纤的各种对准和耦合的最精确方法。斯坦福大学研制的全集成气相色谱分析系统，巧妙地把色谱柱、各种阀门、热导检测器等全部构件都集成制在一块直径不过5cm的小硅片上，加上外部数据处理设备、整个系统体积不超过一台袖珍计算器大，比传统的普通实验室气相色谱分析系统体积小了几千倍，但其功能并未逊色，能在十多秒钟内以10ppm的精度分析出十多种气体，用于环境监测中连续监控大气污染，发挥了出色的作用。斯坦福大学还研制了一种令人瞠目的微型冷冻器，也是在一块直径不过5cm的小硅片上，用光刻腐蚀技术形成长25cm、直径100 μ m的蛇形冷却管所制成，能在几秒钟内从室温冷冻到77K的温度，冷却容量可从1~100mW，在超导器件、低温红外传感器及生物医疗中有独特应用。近年发展的能在硅片平面内作大范围的旋转与移动的新型微机械，标志着微机械加工技术已能解决诸如机器人运动关节等重要部件的制造，为成功设计制造单片式微型机器人系统迈出了关键的一步，已用此技术制成的微型涡轮机、微型机械手，堪称小巧玲珑，令人叹服，在生物医疗等当代尖端科技应用中有难以估量的作用。以上是业已开发、生产的大批微机械产品中的几个典型例子，但仅此已清楚表明：微机械技术确实是一个生机勃勃、潜力巨大的领域，其应用前景尚未可限量。

微机械的成功发展，为硅材料的应用开辟了一个崭新的方向。硅作为微电子基础材料在当代电子技术中的主宰作用，已突破传统的电子器件的界限，向着与微电子相辅相成

的微机械领域延伸。

微机械技术的出现在国外已有二十多年的历史，但早期发展缓慢，直到近年由于微电子技术迅速发展的需要，才作为一项新兴技术领域迅速发展起来。在我国则至今基本上仍是空白点。为了四化建设的需要，如何积极开发这一领域，显然是个不能等闲的问题。

本书在简述微机械一般制造技术的基础上，着重介绍了各类典型的微机械的开发和应用实例，希望能为促进这一新兴技术在我国生根和发展，发挥添砖添瓦的作用。

第二节 硅材料的机械特性

硅是一种来源广泛的材料，经高度提纯和拉制成单晶后，具有许多独特的机械性质（见表1）⁽²⁾。首先，它是一种脆性材料，因为它不能象金属那样发生塑性形变。但它又不是脆得象金属氧化物那样一敲即碎的材料。就强度而言，它在金属和金属氧化物的行列中名次并不低。例如，硅的杨氏模量（ $1.9 \times 10^{11} \text{N/cm}^2$ ）就不锈钢、镍差不多，而高于石英、多数硼硅玻璃、钠钙玻璃。硅的洛氏硬度（850）和石英差不多，略低于铬而约两倍于镍（557）、铁及大多数普通玻璃（530）。硅单晶的抗拉强度（ $6.9 \times 10^8 \text{N/cm}^2$ ）比不锈钢丝至少大三倍。

尽管有上述种种定量的证据，但从日常经验看，硅能否称得上高强度材料，仍难免令人感到困惑。硅确实存在容易断裂的现象，硅单晶片也确实不难用刀划成小片。由此容易使人错觉：硅不是什么高强度材料。造成这种误解有以下几点因素：（1）硅单晶常切成50~130mm直径、250~300μm

表 1 单晶硅的机械特性的对比^[2]

	屈服强度 ($10^3\text{N}/\text{cm}^2$)	洛氏硬度 ($10^3\text{g}/\text{cm}^2$)	杨氏模量 ($10^{11}\text{N}/\text{cm}^2$)	密 度 (g/cm^3)	热 导 率 ($\text{W}/\text{cm}\cdot^\circ\text{C}$)	热胀系数 ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)
*金刚石	53	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
*铁	12.6	400	1.96	7.8	0.803	12
SiO ₂ (纤维)	8.4	820	0.73	2.5	0.014	0.55
*Si	7.0	850	1.9	2.3	1.57	2.33
钢(最高强度)	4.2	1500	2.1	7.9	0.97	12
W	4.0	485	4.1	19.3	1.78	4.5
不锈钢	2.1	660	2.0	7.9	0.329	17.3
MO	2.1	275	3.43	10.3	1.38	5.0
Al	0.17	130	0.70	2.7	2.36	25

*表示单晶

厚度的圆片使用，这样薄的大圆片是容易碰碎、碰裂的一个原因；如果把这样的大圆片用划片机划成多块 $6\text{mm}\times 6\text{mm}$ 的小芯片，则这种小芯片就能坚固到可经受通常的搬运而不致断裂；(2) 硅单晶容易沿晶面解理，特别当晶片边缘、表面或体内存在缺陷并造成应力沿晶面集中时，尤其如此；(3) 在氧化、淀积等加工中若采用高温处理，易引起内应力，当存在缺陷时这种应力易沿晶片解理面集中而导致断裂。

这些因素说明，虽然高质量硅单晶的固有强度是比较高的，但制成一定的机械零件后的实际强度则取决于硅片的结晶取向、几何尺寸、缺陷的多少和大小，以及在生长、抛光和随后的处理中所积累的应力如何。能够控制这些因素就有可能使其实际强度超过高强度合金钢。如何控制，根据硅集

成电路的制造经验，一般有以下规律可循：

(1) 硅单晶的表面、边缘和体内的缺陷的密度应尽量使之减小，以减少应力集中的可能性。

(2) 可能要经受较大磨损、摩擦或承受较大应力的构件，尺寸要尽量作得小，以减小构件中晶体缺陷的总量。受力较小或受摩擦较轻的构件虽可作得大一些，但最好用适当的夹具支承，以防搬运或操作中因振动引起缺陷。

(3) 大硅片的加工，尽量少用或不用锯、磨、划、抛等常规机械加工法，因为这些操作容易引起边缘上和表面上的缺陷。若要使晶片分离，最好采用腐蚀法。若有必要采用锯、磨或其他机械操作，则操作后要用腐蚀法去除边缘和表面上受损伤较严重的部位。

(4) 不少构件需用各向异性腐蚀法形成，因此容易产生锐缘和锐角，从而可能导致某些几何结构的应力集中。这时，最好采用各向同性腐蚀法或其他适当方法把这些锐缘、锐角打圆。

(5) 硅片如需热加工，应尽量避免采用高温；例如，采用高压氧化、等离子淀积、CVD淀积等工艺，都可适当降低加工温度。采用高温加工时，由于各种掺杂层和淀积层的热胀系数不同，硅片内部易产生高应力，从而增加构件断裂的可能性。

(6) 在受力、磨损或腐蚀较严重的环境中使用，硅片表面应淀积、生长一层钝化膜，例如 SiC 、 Si_3N_4 等，使表面得到保护。

在上述各种措施中，表面钝化是一个应予特别强调的措施，其作用不仅在于保护表面不受机械损伤和污染侵蚀，而

且还能提高其机械疲劳强度。疲劳断裂一般起始于构件的表面，因此，疲劳强度就与表面的制备、形貌和缺陷密度有关。经过精细抛光的表面，其疲劳强度就比粗制表面高得多。用多晶金属膜或合金膜钝化的表面，能抑制水在晶粒间扩散，因而能防止疲劳强度的降低。这些现象都说明，疲劳机理最终决定于表面缺陷的发生过程。在多晶材料中，这些表面缺陷可能是夹杂物、晶粒间界或表面的不规则性，它们的出现和发展将导致应力集中，造成过早的疲劳断裂。因此，要使微机械保持材料的固有疲劳强度，除需采取适当的表面钝化外，还须采用适当的表面处理，例如用表面腐蚀使硅表面达到高度光滑和完美无缺，以减小疲劳裂缝的发生和发展机率。

采用 Si_3N_4 钝化膜对提高微机械的实际强度的作用，可用Iwamura等人最近展示的转盘存贮器作为实例加以说明⁽²⁾。如图1所示，存贮器含有一MNOS结构。其中一根碳

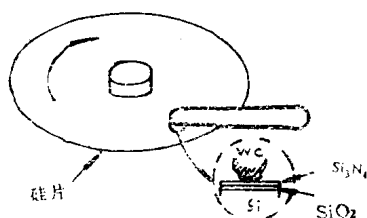


图 1 MNOS转盘数据存贮器⁽²⁾

化钨探针直接与76mm直径的硅片接触，硅片以3600rpm的速率旋转。硅片表面涂覆2nm厚的 SiO_2 层和49nm厚的 Si_3N_4 层作钝化。探针作为上部的金属电极，当正脉冲电压加于探

针时,电子通过 SiO_2 薄膜隧穿,并在 Si_3N_4 膜中被俘获。利用通过金属探针的电容变化,可检测出被俘电荷,从而可读出信号。Iwamura等人用此装置写入并读出的视频信号达 10^6 次以上,数据密度高达 $2 \times 10^6 \text{ bit/cm}^2$,但信号衰减极小,W_C探针磨损报废时硅面上的 Si_3N_4 膜仍完整无损,表明所生长的 Si_3N_4 膜可满足微机械的高可靠要求。

第三节 微机械的通用加工技术

微机械的制造,一般采用硅集成电路制造中常用的微细加工技术,其细节普通半导体工艺书中都有介绍,在此不一一详述,现仅就微机械制造中几项主要通用工艺作概括介绍。

一、腐蚀

腐蚀迄今仍是微机械的主要加工法,可用以形成微米级精度的孔、槽、台面、锥体、薄膜、悬臂梁等多种复杂的几何形状。常用的腐蚀法有溶液腐蚀、电化腐蚀和激光腐蚀。

(1) 溶液腐蚀

溶液腐蚀法使用简便、成本低、效果好、加工范围广,因而是微机械的主要加工法。可用于硅腐蚀的腐蚀剂很多(见表2)^[2],但作用各有不同,有的属各向同性腐蚀,有的属各向异性腐蚀,有的腐蚀速度与掺杂剂的种类和浓度有关,有的还与腐蚀液是否搅拌有关。总之,要根据加工要求来选择。

微机械加工常用的腐蚀剂主要有三种,即:乙(撑)二胺、邻苯二酚和水的混合液(简称EDP);KOH和水的混合液;HF、 HNO_3 和醋酸的混合液(简称HNA)。

EDP是最适宜于微机械加工的腐蚀液,其特点有三:1)

表 2 各种硅腐蚀液的特性^[2]

腐蚀剂 (稀释剂)	典型组成	温度 (°C)	腐蚀速度 ($\mu\text{m}/\text{min}$)	各向异性: (100)/(111) 腐蚀速度之比	与掺杂剂的 关 系	掩蔽膜 (对 掩膜的腐蚀 速度)
HF、HNO ₃ (水、 CH ₃ COOH)	10ml 30ml 80ml	22	0.7~3.0	1:1	$\leq 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 的 n型或P型掺 杂, 腐蚀速度 减小约150倍	SiO ₂ (300Å/min)
	25ml 50ml 25ml	22	40	1:1	无关	Si ₃ N ₄
	9ml 75ml 30ml	22	7.0	1:1	—	SiO ₂ (700Å/min)
	75ml 120g 100ml	115	0.75	35:1	掺硼 7×10^{19} cm^{-3} 时, 腐蚀 速度减小约50 倍	SiO ₂ (2Å/min)
	750ml 120g 240ml	115	1.25			Si ₃ N ₄ (1Å/min) Au, Cr, Ag, Cu, Ta
	40g 100ml	85	1.4	400:1	掺硼 $\geq 10^{20}$ cm^{-3} 时, 腐蚀 速度减小约20 倍	Si ₃ N ₄ SiO ₂ (14Å/min)
	50g 100ml	50	1.0			
H ₂ N ₂ (水、异丙醇)	100ml 100ml	100	2.0	—	无关	SiO ₂ Al
NaOH (水)	10g 100ml	65	0.25~ 1.0	—	掺硼 $\geq 3 \times$ 10^{20}cm^{-3} 时, 腐蚀速度减小 约10倍	Si ₃ N ₄ SiO ₂ (7Å/min)

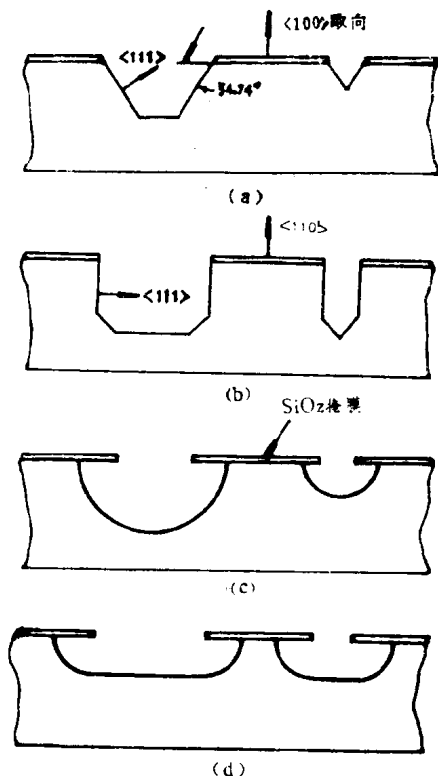


图 2 微机械加工中常用溶液腐蚀法所制孔形

(a)在(100)面上各向异性腐蚀；(b)在(110)面上各向异性腐蚀；(c)带搅拌的各向同性腐蚀；(d)无搅拌的各向同性腐蚀⁽²⁾

能进行各向异性腐蚀，擅长于制出各种独特的几何形状；2) 选择腐蚀性强，适用于 SiO_2 、 Si_3N_4 、Cr及Au等多种材料作掩膜的掩蔽腐蚀；3) 腐蚀速度与掺杂剂密切相关，硅中掺浓硼时的腐蚀速度接近于零。

KOH和水制成的腐蚀剂，其腐蚀速度与硅片的晶向关系

密切，(110)面对(111)面的腐蚀速度比，要比用EDP时大得多。这种腐蚀液极适宜于在(110)面上开深槽，其轮廓清晰、无钻蚀。不足之处是对 SiO_2 的腐蚀速度快，因此不适宜于用 SiO_2 作掩膜进行腐蚀，但可用 Si_3N_4 作掩膜。

HNA是一种较复杂的腐蚀剂，其腐蚀特性取决于硅中掺杂剂的种类和浓度、腐蚀剂中三种组成比以及对腐蚀液的搅拌速度。其选择腐蚀性很差，根本不能用 SiO_2 作掩蔽； Si_3N_4 及Au虽可勉强作掩蔽，但制作较深图形时的掩蔽特性不及EDP。

微机械加工中最常用的腐蚀法，主要有选择腐蚀法和各向异性腐蚀法。现分别举例说明其应用特点如下：

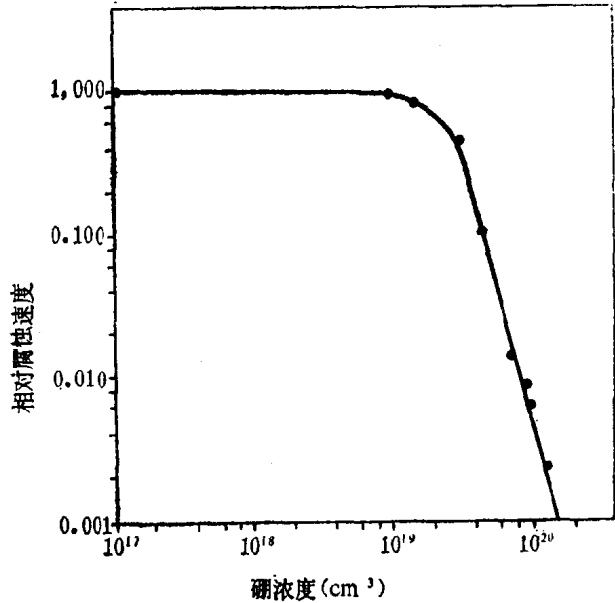


图 3 (100) 硅在EDP腐蚀液中的规一化腐蚀速度与硼浓度的关系⁽⁴⁾