



国外优秀科技著作出版专项基金资助

硅微机械 加工技术

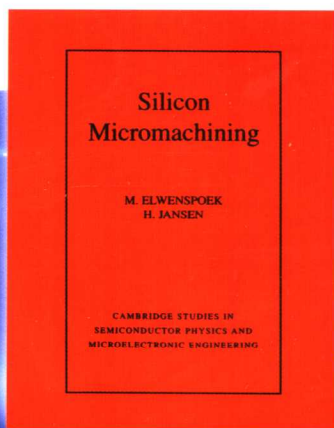
Silicon Micromachining

[法] M. 埃尔温斯波克 (M. Elwenspoek)

著

[捷] H. 扬森 (H. Jansen)

姜岩峰 译



化学工业出版社



国外优秀科技著作出版专项基金资助

硅微机械 加工技术

Silicon Micromachining

[法] M. 埃尔温斯波克 (M. Elwenspoek)

著

[捷] H. 扬森 (H. Jansen)

姜岩峰 译



化学工业出版社

· 北京 ·

英国剑桥大学出版社出版的《Silicon Micromachining》是一本关于微系统加工工艺方面的专著,作者 M. Elwenspoek 和 H. Jansen 等人从事过多年微系统加工工艺方面的研究工作,具有非常丰富的研究经验。本书的主要内容包括:(1) 硅的湿法腐蚀工艺及其物理机制的描述;(2) 硅的表面微机械加工技术;(3) LIGA 工艺;(4) 硅-硅直接键合工艺;(5) 硅的干法腐蚀工艺及物理机制等,涵盖了微机械系统加工工艺中的主要内容,而且其内容经过多次修订,并在法国和英国等大学试用。本书基本概念清楚,具有一定参考价值,适合 MEMS 领域工程技术人员、研究生和高年级本科生阅读和使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

硅微机械加工技术/[法] 埃尔温斯波克 (Elwenspoek, M.),
[捷] 扬森 (Jansen, H.) 著;姜岩峰译. —北京:化学工业出版社, 2006. 8

书名原文: Silicon Micromachining

ISBN 978-7-5025-9258-5

I. 硅… II. ①埃…②扬…③姜… III. 微电子技术 IV. TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 103374 号

Silicon Micromachining/by M. Elwenspoek, H. Jansen

ISBN 0-521-59054-X

Copyright © 2004 by Cambridge University Press. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by

Cambridge University Press

本书中文简体字版由 Cambridge University Press 授权化学工业出版社独家出版发行。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2005-5200

责任编辑: 刘 哲 宋 辉

责任校对: 徐贞珍

装帧设计: 关 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京云浩印刷有限责任公司

装 订: 三河市前程装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张 22½ 字数 426 千字

2007 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

译者序

信息系统的微型化、多功能化和智能化是人们不断追求的目标。为此,20世纪80年代以来,人们研究成功一种由微电子和微机械精密加工技术相互融合的微电子机械加工技术(MEMT)。这一新技术成功地解决了硅系材料和非硅系材料的高深/宽比光刻技术的难题。通过20多年的努力,MEMT得到了不断的完善和发展,成功地研制了新一代的微电子机械系统(Microelectro-mechanical system,简称MEMS)。

MEMS是指采用MEMT技术在一块普通的芯片基体上制造出的集机械零件、传感器执行组件及电子组件于一体的系统,可用于卫星、火箭等尖端科技以及医疗、通信等高技术领域,现已成为各国科技发展战略必争的制高点。MEMS的主要制作工艺是IC工艺和MEMT工艺,前者采用CMOS,工艺技术成熟,而MEMT成为制作MEMS的核心关键技术。MEMT包含5项基础技术:体硅微机械加工技术(湿法和干法)、表面微机械加工技术、衬底键合技术(Si/Si和Si/玻璃)、自对准的LIGA技术或准LIGA技术、封装技术等。

东南大学教育部MEMS重点实验室的黄庆安教授在20世纪90年代出版了国内第一本MEMT方面的专著《硅微机械加工技术》,较集中地论述了90年代之前MEMT技术的发展状况,为我国MEMT技术的普及和发展做出了很大的贡献。译者曾在该实验室工作过一段时间,基于此段经历,译者对MEMT技术一直保持着浓厚的兴趣,非常愿意将法国第二十大学Miko Elwenspoek博士和Henrie Jansen博士的专著《Silicon Micromachining》介绍到国内。该书1998年在英国剑桥大学出版社出版,在2004年做了第一次修订,修订的版本中,加强了对各种加工技术所包含基本物理和化学原理的简要综述,其中对各向同性和异性湿法化学腐蚀、硅片键合、反应离子刻蚀和表面微机械加工技术等进行了重点介绍,这本书中包含了详细的实验结果和理论材料,尤其适合电子工程和材料工程方面的人员学习或研究微电子机械系统(MEMS)的研究生或科研人员阅读。

感谢北方工业大学微电子中心的张媛媛、赵晨光、元媛、张怡、王维英、闫肃、付晶晶、高小飞等所做的部分翻译工作。书中不妥之处,恳请读者指正。

译者

2006年8月20日于北方工业大学

前 言

本书整理自一门“腐蚀技术”课程的讲义，这门课程是欧洲 COMETT 计划的一部分。这门课程是由瑞士 Neuchatel 的 FSRM 计划来推动的，目前仍然是微机械加工技术中教育内容的一部分，被称为 UETP MEMS。这本书的部分内容还被第二十大学在课程“微机械器件和系统：硅的腐蚀”中采用。

本书包括两大部分内容，第一章至第七章为第一部分，主要介绍传统的湿法腐蚀工艺和硅片键合等；第二部分主要介绍硅的干法腐蚀，尤其是反应离子刻蚀 (RIE)。M. E. 是第一部分的主要作者，H. V. J. 是第二部分的作者。与本书原始材料相比，第二部分的内容发生了很大变化，原来的第二部分内容的作者是 Meint de Boer。

有许多同事都积极地给予本书建议并提供材料。其中最主要有 MESA 的微机械加工小组的所有同事，他们是 Rob Legtenberg, Han Gardeniers, Tonny Sonnenberg, Bas Deheij, Meint de Boer, Erwin Berenschot。其他人还有 Frans Blom, Siebe Bouwstra, Hans-Elias de Bree, Johannes Burger, Gert-Jan Burger, Gui Chengun, Job Elders, Twan Korthorst, Joost Van Kuijk, Stein Kuijpers, Theo Lammerink, Peter Leussink, Cees van Mullem, Cristina Neagu, Jasper Nijdam, Wietse Nijdam, Edwin Oosterbroek, Frans van de Pol, Albert Prak, Cees Van Rijn, Stefan Sanches, Edwin Smulders, Vincent Spiering, Jaap van Suchtelen, Niels Tas, Harrie Tilmans, Willem Tjerkstra, Erik van Veenendaal, Theo Veenstra, Henk Wensink, Remco Wiegerink 和 Robert Zwijze。所有这些同事对本书都做出了不同形式的贡献，在此表示感谢。特别感谢 Jan Fluitman 对我们小组的鼓励。

M. E. 希望感谢瑞典 Uppsala 微机械小组，特别感谢 Bertil Hök, Ylva Bäcklund, Leif Smidt, Lars Rosengren 和 Karin Hermansson。感谢同他们在一起的愉快时光，并感谢在 Uppsala 学习到了很多微机械加工的知识。

本书第三章关于硅湿法腐蚀的化学物理方面的内容是 M. E. 在荷兰 Nijmegen 大学 Piet Bennema 小组的博士论文。

目 录

1 简介	1
参考文献	4
2 各向异性湿法腐蚀	5
2.1 简介	5
2.2 单晶硅的机械特性	6
2.3 硅的晶体特性	8
2.4 腐蚀过程	10
2.5 实验方法	13
2.6 各向异性腐蚀剂的特性	19
2.7 $\langle 100 \rangle$ 和 $\langle 110 \rangle$ 晶向硅片的微机械加工	26
2.8 腐蚀自停止机理	31
2.9 掩模材料	41
2.10 边角补偿	43
2.11 其他	50
参考文献	52
3 湿法化学腐蚀的化学物理机制	55
3.1 简介	55
3.2 晶体知识回顾：表面的原子结构	57
3.3 表面自由能和阶梯自由能	60
3.4 热动力学	61
3.5 动力学	66
3.6 腐蚀速率图	71
3.7 阶梯状的直接显示	77
3.8 总结	79
参考文献	80
4 硅片键合	83
4.1 简介	83
4.2 硅熔融键合 (SFB)	83
4.3 阳极键合	92
4.4 低温键合	99

参考文献	101
5 实例和应用	103
5.1 简介	103
5.2 薄膜	103
5.3 梁	115
参考文献	123
6 表面微机械加工	126
6.1 简介	126
6.2 表面微机械处理中的基本制造工艺	126
6.3 应用	133
参考文献	146
7 硅的各向同性湿法化学腐蚀	149
7.1 腐蚀液和腐蚀速率图	149
7.2 扩散和搅拌	150
7.3 掩模材料	151
7.4 阳极 HF 腐蚀	151
参考文献	158
8 微机械加工技术中干法等离子刻蚀技术简介	159
8.1 微机械加工技术	159
8.2 等离子体	160
8.3 刻蚀	163
8.4 概况	164
参考文献	165
9 为何采用等离子体刻蚀	166
9.1 气体刻蚀	167
9.2 湿法刻蚀	167
9.3 干法刻蚀	168
参考文献	171
10 什么是等离子刻蚀	172
10.1 等离子刻蚀基本原理	175
10.2 物理模型	177
10.3 化学模型	196
10.4 等效电路	228
参考文献	231
11 等离子体系统配置	232

11.1	化学性质	233
11.2	频率	233
11.3	电极排列	234
11.4	负载容量和工艺	234
11.5	等离子和样品的距离	235
11.6	工作压强	239
11.7	刻蚀种类	240
	参考文献	242
12	接触式等离子体刻蚀	243
12.1	IBARE 中的刻蚀定向性	243
12.2	纯的等离子化学剂	245
12.3	混合等离子化学剂	247
12.4	多步等离子化学剂	250
12.5	等离子体参数/效应	251
12.6	掩模材料/影响	254
12.7	存在的问题和解决方法	258
12.8	数据获取	260
12.9	终点检测和等离子诊断	267
12.10	发展趋势	268
	参考文献	271
13	远程等离子体刻蚀	273
13.1	真空刻蚀综述	273
13.2	刻蚀设备	275
13.3	热辅助离子束刻蚀综述	276
13.4	刻蚀机理	276
13.5	毛刺	280
13.6	实验	282
13.7	结果及应用	284
	参考文献	286
14	高深宽比沟槽刻蚀	288
14.1	定性分析	289
14.2	设备和实验	294
14.3	HARTs	295
14.4	RIE 滞后的定量分析	301
14.5	结论	329
	参考文献	332

15 微型结构的铸模	334
15.1 干法刻蚀	334
15.2 电镀	335
15.3 铸模	336
15.4 用光刻胶做掩模版的干法刻蚀	337
参考文献	338
16 可动的微结构的制造	339
16.1 SCREAM	339
16.2 SIMPLE	340
16.3 BSM-ORMS	341
参考文献	344
关键词英汉对照	345

1 简介

硅的腐蚀和键合是微系统技术（MST）的基本工艺技术。由于近年政府和公司财政投入支持的增加，MST 技术发展得非常快。

MST 的前景是壮观的，其工艺是从集成电路加工派生出的批量加工技术。预期，MST 将会同集成电路一样，通过新的而且便宜的产品来改变人们的生活。MST 潜在的应用包括汽车里的压力传感器和加速度计，也包括流量传感器、温度传感器、力传感器、位置传感器、磁场传感器、化学传感器、光传感器、红外辐射传感器等，MST 不但便宜，而且具有独特的性能。我们认为，下一代的器件将使用微泵、流量传感器、微混合器、微筛、微反应器等，在医药、过程控制、化学分析等领域应用在生物、化学和生化分析系统中。再向未来作进一步展望，微型机器人将应用在电荷耦合器件（CCD）照相机中，对 CCD 芯片的位置做主动的优化；也可以应用在 CD 设置中，用来定位光学元件；还可以帮助外科医生做手术；可以维修其他微系统；微机器人能够在超净间执行操作和检修任务。这里列出的是近几十年内 MST 的一些可能应用，有许多可能并没有列出，因为 MST 的发展在很大程度上是不可预料的，就像 20 年前的电脑游戏一样。目前我们必须解决很多问题，这些问题是与工艺的控制相关的，我们必须掌握如何设计微系统，必须开发适用于微系统的设计、模拟和仿真工具。随着系统尺寸的缩小，我们正面临许多物理和化学上的新问题。我们必须把三维的尺寸、原理、设计和工艺转化成平面的，或 2.5 维的原理、设计和工艺。

微观世界与宏观世界有很大的差别。微观世界中，表面力起到了主要作用，例如表面张力和表面摩擦力等。只有在特殊场合，惯性力和重量对微系统才有意义，如加速度计或共振传感器等，而静电力和流量剪切力将使机械结构产生严重的变形。流动具有非常小的雷诺数，所以所有的流量都相当黏滞。在微米级系统中，表面看起来非常粗糙，但机械结构却非常硬和结实，周围的温度将由于强烈的 Brownian 移动而发生变化。

举个例子，蚂蚁不会洗脸，为什么呢？因为水滴的表面张力太大，蚂蚁克服不了。如果蚂蚁被裹在水滴里，它也没办法离开。它们也不会生火，因为火花的尺寸太大了，远远超过蚂蚁的尺寸。它们也无法读书，因为微尺寸的书页之间存在的表面张力是蚂蚁克服不了的。有一部电影名叫“奇妙的航海”，里面有一个奇妙的机器能把人缩小，如果把人缩小的话，我们肯定无法战胜蚂蚁，因为我们人体的结构不适合这样的尺寸。

费曼在 1959 年预期了微系统物理和微系统给人类可能带来的影响,其代表性论文“在底层有足够的发展空间 (There is plenty room at the bottom)”^[1]在 Journal of Microelectromechanical system 中被重印出版。费曼预期到光刻、薄膜技术、高密度存储、静电电机等的重要性。20 年后,费曼在这个主题上发表了第二个讲演,如文献 [2] 中所示。

当设计微系统的时候,我们要了解微观世界是如何感知的。设计者要训练一种新的直觉。如果设计人员从现象学的观点观察,就能够发现一些有趣的趋势。

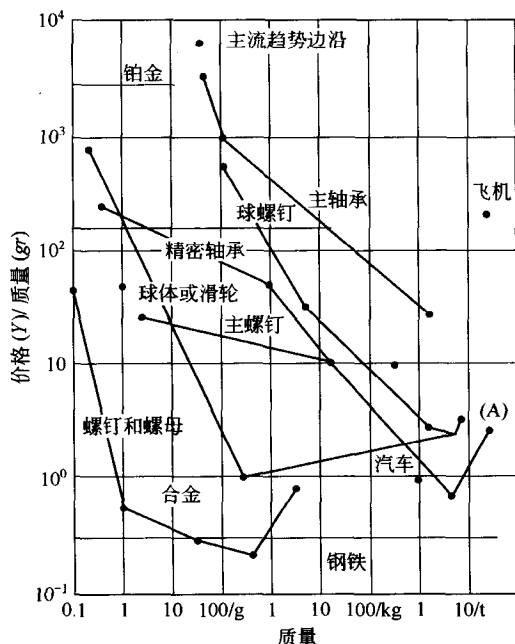


图 1.1 单位质量的机器其价格和尺寸的关系^[3]

图 1.1 中列出机器和机械元件单位质量的价格,可以清楚看出小产品要比大产品贵得多。

图 1.2 证明了尺寸效应。如图所定义的雷诺数,所有动物,从细菌到鲸鱼,它们的长度和雷诺数之间的关系都在一条线上分布。

微系统的工艺是以两种截然不同的传统技术为基础的,一种是机械方法,另一种是微电子的光刻工艺。光刻工艺能够制造出 $1\mu\text{m}$ 量级的部件,相对精度不超过 $1/10000$ 。而机械方法的精度为 $10\mu\text{m}$,相对精度要高 1 到 2 个数量级。两种技术之间最大的差别是光刻工艺适合于批量生产,但三维工艺受投影的影响。

本书侧重于微电子工艺。图 1.3 示出基本的光刻过程。我们可以看到用二维结构如何实现三维结构。这里的三维并不是真正的三维,是从平面结构引导出的准三维结构。这里我们只能用投影方法,但用这种方法做不出螺栓和螺母,而且我们不需要这些,因为没有可用的安装机器来使用这些零件。

对于微机械工程师来说主要的挑战在于:需要设计一个不需要一个部件一个部件装配的微系统,就是不需要装配的过程。我们不是做微机械元件,然后再装配它们,而是要设计系统。可用的微机械加工技术不只是限制了设计的可能性,而且提出了新的设计原理。我们能够设计厚度为 $1\mu\text{m}$ 、长度为 1cm 的微桥,这相当于宏观世界中 1km 长、 10cm 厚的桥。图 1.4 示出腐蚀的各种可能性。这里示出的所有形状都可以通过湿法和干法腐蚀来完成。然而,湿法各向异性化学腐

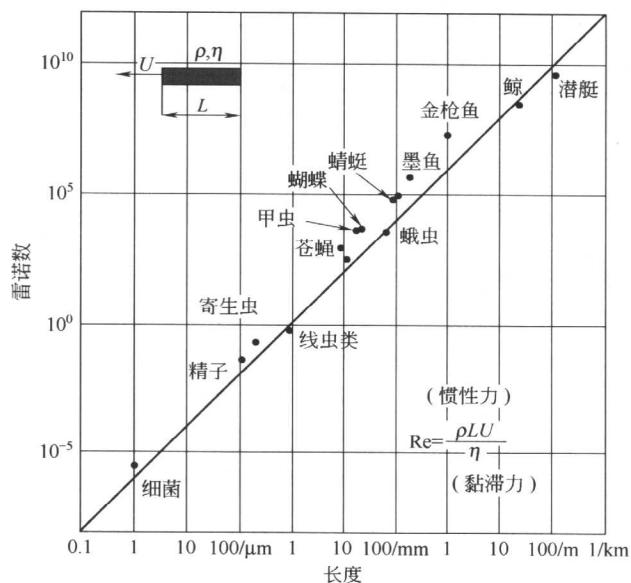
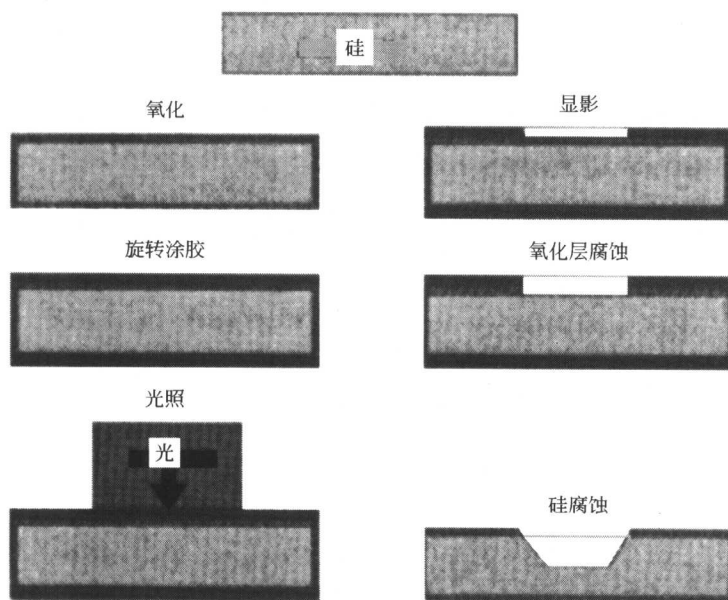
图 1.2 雷诺数与尺寸的关系^[3]

图 1.3 光刻的基本工艺流程

蚀与晶向有关，而干法则和晶向无关。所以干法腐蚀比湿法显得更方便，但干法工艺较难控制，设备相对也太贵。

在微系统（MST）技术方面工作的工程师面临的现实情况是，MST 是一个

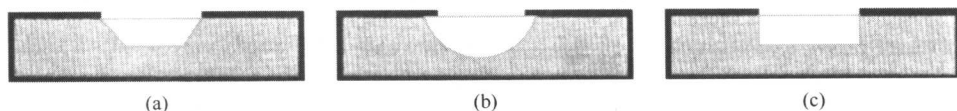


图 1.4 腐蚀可能出现的几种情况
(a)、(c) 各向异性腐蚀；(b) 各向同性腐蚀

多学科的研究领域。在理想情况下，工程师需要掌握基本的物理和化学知识，从而能够对微器件和系统进行设计和模拟；而且也需要知道很多机械方面的知识，尤其是材料强度、弹性力学、摩擦学等；也需要在电子工程方面有一些技能，会使用不同的模拟工具，如有限元工具和 SPICE 等；必须对光学和磁学的基础知识有所掌握，并且不同的应用有不同的难点。例如，在医学方面需要工程师和医生交流，而在空间科学中的应用则需要完全不同背景的知识。

以上所有这些要求不可能集中在一个人身上。在微系统方面的研究只有以团队的形式，需要物理、化学、电子、机械工程师的合作。我们相信，在对微系统工程师的培养方面，无论对多学科综合的程度要求有多高，工程师都需要在单个学科内进行培养。因此，在微系统方面的教学需要新的规划。

参 考 文 献

- [1] R. P. Feynman, J.MEMS 1, 60 (1992).
- [2] S. D. Senturia, J.MEMS 4, 309 (1995).
- [3] T. Hayashi, Proc. MEMS'94, Oiso, Japan, January 25-28, p. 39, 1994.

2 各向异性湿法腐蚀

2.1 简介

硅片的各向异性湿法腐蚀是硅片微机械加工的重要技术之一。与“表面微机械加工”不同，表面微机械加工所对应的结构由薄膜构成，可在不影响体材料的情况下，由同种材料薄膜释放形成。各向异性湿法腐蚀被认为是“体微机械加工”，因其可以腐蚀硅片的体结构。

基于硅片的晶向结构的各向异性湿法腐蚀中，由体微机械加工所能实现的各种形状与腐蚀速率较慢的晶面相关，主要是 $\{111\}$ 晶面。硅片的 $\{001\}$ 晶面或 $\{110\}$ 晶面被涂上一层薄膜物质后，在硅腐蚀液中的腐蚀速度要慢很多，在薄膜上用标准的光刻技术打开窗口，然后将样品浸泡在腐蚀剂中。通过扫描电子显微镜 (SEM) 拍照，如图 2.1 (a) 所示，显示了通过各向异性湿法腐蚀形成的凹陷横截面，图 2.1 (b) 是通过同向腐蚀得到的凹陷。

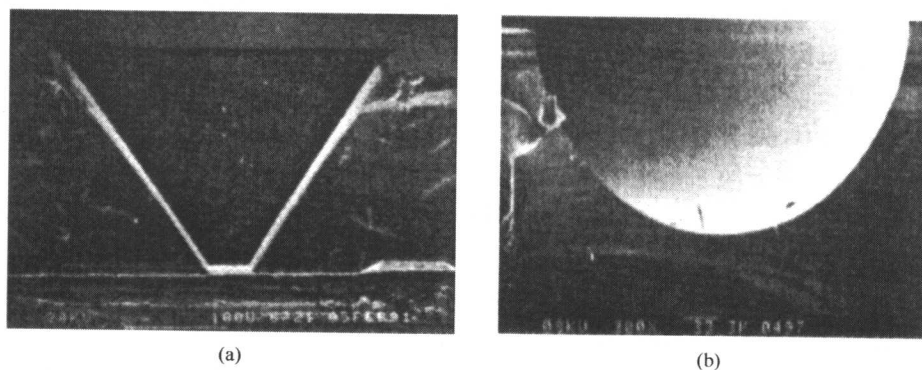


图 2.1 掩模板开窗口形成的腐蚀坑
(a) EDP; (b) $\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{CH}_3\text{OOH}$

第二个例子通过球体的腐蚀证明了各向异性湿法腐蚀的特点。一个球体所有的晶向都暴露在腐蚀剂里，显然，球体的腐蚀形状取决于腐蚀速率快的晶向。结果如图 2.2 所示，硅球体在 CsOH 里被深度腐蚀（大约几个小时）。图中扁平区域相当于快速腐蚀晶向，凸点相当于慢速腐蚀晶向。图中可清晰地分辨出三重轴与四重轴，分别对应于 $\langle 111 \rangle$ 和 $\langle 001 \rangle$ 晶向。

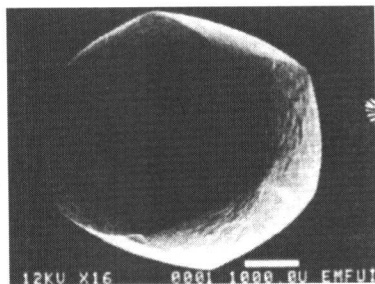


图 2.2 在 CsOH 中腐蚀的球面
扁平区域对应腐蚀速率较快的晶向，
凸点对应腐蚀速率较慢的晶向（〈111〉
和〈001〉）（Hesketh 等^[1]）

各向异性湿法腐蚀是项重要技术。它使我们可以通过控制掩模与晶向的对准方向来达到精确控制微结构的形状和深度的目的。利用其优势，这项工艺目前用于制造压力传感器、动力传感器、流量传感器和加速传感器。因此，在对产品的市场需求日益增加的前提下，产品的成本会相对降低。

单晶硅有许多显著的机械价值，使得其对机械器件制造有巨大吸引力。这些将在 2.2 节中详细讨论。各向异性湿法腐蚀与硅

晶体结构密切相关，将在 2.3 节讨论与晶体结构相关的问题。

使用各向异性湿法腐蚀控制微机械加工，需要一系列可行的工艺。光刻技术绝对是不可或缺的。它是 IC 技术的标准工艺，这里不做过多叙述。此外，硅片清洗设备是必需的，这将在 2.4 节中进行讨论，并详述腐蚀的典型过程。在 2.5 节中，还将介绍学习各向异性湿法腐蚀的不同经验技术。在 2.6 节中，将回顾腐蚀液的成分，重点是 KOH，EDP 和 TMAH，这些系统都是被广泛使用并被全面研究的。在 2.7 节中，将讨论腐蚀自停止机制，掩模材料和边界补偿。最后一节，将对目前正在发展的腐蚀模拟系统进行综述。在第 3 章中，将讨论各向异性湿法腐蚀的物理化学背景。

2.2 单晶硅的机械特性

单晶硅有许多突出的机械特性。硅作为半导体，其化学连接是共价键。共价键的连接势垒有强烈的各向异性，并有最小值。这与金属连接电势明显不同，在金属中晶体的位错比半导体中的位错更易于移动。金属是易延展的，而半导体是易碎的，通过锻造形成这样的材料是不可能的。

机械工程师总是避免使用类似玻璃这样易碎的材料，但是易延展的材料容易塑性变形，意味着这类材料容易受力学滞后影响。可以制造出没有任何缺陷的单晶材料。在加负载的过程中，原来无缺陷的单晶硅里没有可以移动的位错，通过加负载引入新的位错可以立即使材料断裂——硅断裂。在室温下，单晶硅只能被弹性变形，没有力学滞后。

硅的屈服强度相当高，可与不锈钢相比拟。因此，硅是一种强度比得上钢的材料，然而它没有任何塑性延迟和力学滞后。以上特性使得硅在许多应用中优于任何一种金属。注意，尽管如此，不锈钢在张力方面强于硅。图 2.3 是钢和硅的

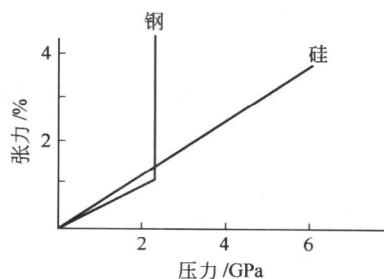


图 2.3 典型的金属和半导体
压力-张力曲线图

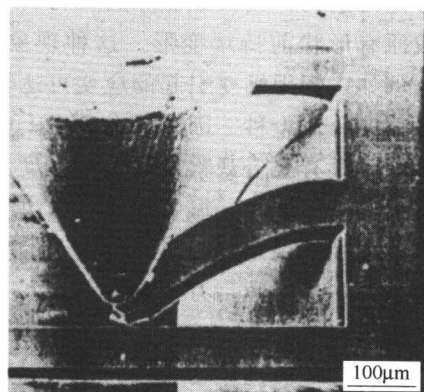


图 2.4 硅悬臂梁在点负载重压下的
扫描电子显微镜图像 (SEM)

压力-张力图。

在微观结构中，弹性变形能力是最重要的。图 2.4 显示扫描电子显微镜图像 (SEM)，对硅悬臂梁施加强大的负载，悬臂梁将发生大幅度弯曲^[2]。如果解除负载，悬臂梁又恢复其原来形状。

表 2.1 (Petersen^[3]) 给出单晶硅与其他材料对比的特性。

表 2.1 单晶硅与其他材料的对比

材 料	屈服强度 /GPa	努氏硬度 /kg · mm ⁻²	弹性模量 /100GPa	密度 /1000kg · m ⁻³	线胀系数 /×10 ⁻⁶ K ⁻¹
钻石	53	7000	10.35	3.5	1.0
SiC	21	2480	7.0	3.2	3.3
Si ₃ N ₄	14	3486	3.85	3.1	0.8
Si	7	850	1.9	2.3	2.33
不锈钢	2.1	660	2.0	7.9	17.3
Al	0.17	130	0.7	2.7	25

GaAs 与硅有类似的特性^[4]，虽然其屈服强度比硅小两个数量级，但这种材料对微机械应用仍有足够的吸引力。

在一些特定环境下，特别是温度升高时，单晶硅发生塑性变形。但是，这种情况对硅微机械加工仅有很少的影响。

如果材料所加负载远低于屈服强度，材料将迅速变形（时间量程受声速控制）。但经过此变形后，材料继续以更大的时间量程（以分钟计算）变形。这种

变形是可逆的：当负载撤除后，材料均匀地恢复成原来的形状和尺寸，并且在恢复成原有形状前持续变形。这种现象称为蠕变（creep）。这种蠕变的影响相当大，例如，钢因蠕变引起的应变可达数千数量级。对硅来说，这种影响的时间量程是百万分之十秒。因此，在这点上，硅属于出众的材料。

似乎没有报告观察到硅的疲劳度。例如，根据我们自己试验的经验，微机械加工的硅谐振器的共振频率并不取决于时间，如果可以观察到时间依赖性，那是由于时间的不稳定性或者外加负载的变化。自共振频率达到数千赫兹后，在1小时内材料将遭受数百万次的变形。

根据 Schweitz^[2] 介绍，多晶硅微结构的机械特性（如弹性模量和屈服强度）与单晶硅类似。这主要是因为，在室温下，硅中的位错线相对稳定。

表 2.1 列出在微加工工艺中经常使用的另一种材料：氮化硅。可以看出，它是种特别强硬的材料，而且在很多酸中不受腐蚀。在下面我们将看到其在众多领域的应用。

2.3 硅的晶体特性

硅的晶体是金刚石结构，其晶格常数 $a = 5.43 \text{ \AA}$ ，结构类似 F.C.C.（面心立方），但在核中有两个原子。以 F.C.C. 晶格为例，如图 2.5 所示，由原子 A 构成一个面心立方晶格，另一个面心立方晶格是由 B 原子沿 A 的空间对角线位移四分之一构成的，这两个立方晶格一起构成了金刚石结构。

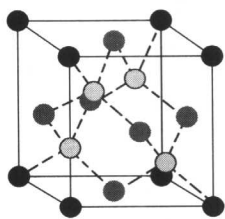


图 2.5 立方晶格单元

注：图中最深色点为 A，
最浅色点为 B

晶面由三个指标定义，称为 Miller 指数，所示向量与上述晶面正交。例如，在简单的立体晶格中，原子在 x , y , z 三个方向上的距离与晶格常数 a 是整数关系。向量 a_x 和 a_y 横跨一个平面， a_z 与之正交。这个晶面定义为 (001) 。类似的，晶面 (011) 是 a_x 正交于 $(a_y + a_z)$ 。最后，晶面 (111) 是指 $(a_x + a_z)$ 正交于 $(a_y + a_z)$ 。Miller 指数是倒格矢向量的组成部分。晶面 $\{100\}$ ， $\{110\}$ 和 $\{111\}$ 已满足我们这里讨论问题的需要。 $\{\dots\}$ 表示一组对称相等的晶面，例如， (100) ， (010) 和 (001) 都可以记为 $\{100\}$ 。晶面 (100) ， (110) 和 (111) 如图 2.6 所示。在半导体物理上可以找到更多的相关细节^[6,7]。晶向由 $\langle \dots \rangle$ 指出。

相关晶面之间的方向对各向异性腐蚀的特殊方向有重要的影响。例如 (111) 晶面是目前腐蚀最慢的晶面，因此需要知道硅片方向与 (111) 晶面之间的夹角。对微机械来说，两个重要的硅片方向是 (100) 和 (110) 。微机械加工中， (111) 硅片并不用于各向异性腐蚀（在 2.11.1 中讨论的特殊情况除外）。晶向的计算可