



微纳制造的基础研究学术著作丛书

M i c r o N a n o M a n u f a c t u r i n g

微机电系统(MEMS) 制造技术

苑伟政 乔大勇 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

微纳制造的基础研究学术著作丛书

微机电系统(MEMS)制造技术

苑伟政 乔大勇 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要论述微机电系统(MEMS)制造技术,全书共9章。第1章阐述MEMS制造技术的定义、发展历程和发展趋势;第2章介绍MEMS制造的材料基础;第3章阐述MEMS制造中的沾污及洁净技术;第4章阐述包括光刻技术和软光刻技术在内的图形转移技术;第5章阐述湿法腐蚀与干法刻蚀技术;第6章阐述氧化、扩散与注入技术;第7章介绍各种薄膜制备技术;第8章介绍包括表面牺牲层工艺、体加工工艺和混合工艺在内的MEMS加工标准化工艺;第9章阐述MEMS的芯片级和圆片级封装工艺。本书结合大量设备操作实例和工艺实例,贴近实践,易于理解。同时,考虑到MEMS加工工艺过程涉及大量化学品的使用,还专门以附录的形式对MEMS制造常用化学品物质安全资料表和基本化学品安全术语进行了介绍。

本书适合作为MEMS相关专业研究生教材,也可供相关领域的科技人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

微机电系统(MEMS)制造技术/苑伟敬,乔大勇著. —北京:科学出版社, 2014.3

(微纳制造的基础研究学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-123997-4

I. ①微… II. ①苑…②乔… III. ①微机电-生产工艺 IV. ①TM380.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第041115号

责任编辑:刘宝莉 孙 芳 / 责任校对:刘亚琦
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014年3月第一次印刷 印张:16

字数:304 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《微纳制造的基础研究学术著作丛书》编委会

顾 问： 姚建年、解思深、熊有伦、钟掘、温诗铸、李同保、田中群

主 编： 卢秉恒

副主编： 王国彪、雒建斌、黎明

编 委：(按姓氏笔画排序)

丁 汉(华中科技大学)

丁玉成(西安交通大学)

刘 冲(大连理工大学)

刘 明(中国科学院微电子研究所)

孙立宁(苏州大学)

孙洪波(吉林大学)

朱 荻(南京航空航天大学)

张其清(中国医学科学院)

李圣怡(国防科学技术大学)

李志宏(北京大学)

苑伟政(西北工业大学)

姜 澜(北京理工大学)

段吉安(中南大学)

夏善红(中国科学院电子学研究所)

郭东明(大连理工大学)

顾长志(中国科学院物理研究所)

崔 铮(中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所)

黄文浩(中国科学技术大学)

董 申(哈尔滨工业大学)

蒋庄德(西安交通大学)

《微纳制造的基础研究学术著作丛书》序

随着人们认识世界尺度的微观化,制造领域面临着面向极小化的挑战,其基础研究正经历着从可视的厘米、毫米尺度向基于分子、原子的纳米制造技术过渡。纳米制造科学是支撑纳米科技走向应用的基础。国家自然科学基金委员会(以下简称基金委)重大研究计划项目“纳米制造的基础研究”瞄准学科发展前沿、面向国家发展的重大战略需求,针对纳米精度制造、纳米尺度制造和跨尺度制造中的基础科学问题,探索制造过程由宏观进入微观时,能量、运动与物质结构和性能间的作用机理与转换规律,建立纳米制造理论基础及工艺与装备原理。重点研究范围包括基于物理/化学/生物等原理的纳米尺度制造、宏观结构的纳米精度制造、纳/微/宏(跨尺度)制造、纳米制造精度与测量、纳米制造装备新原理等。本重大研究计划旨在通过机械学、物理学、化学、生物学、材料科学、信息科学等相关学科的交叉与融合,探讨基于物理/化学/生物等原理的纳米制造新方法与新工艺,揭示纳米尺度与纳米精度下加工、成形、改性和跨尺度制造中的尺度效应、表面/界面效应等,阐明物质结构演变机理与器件的功能形成规律,建立纳米制造过程的精确表征与计量方法,发展若干原创性的纳米制造工艺与装备原理,为实现纳米制造提供坚实的理论基础,并致力提升我国纳米制造的源头创新能力。正如姚建年院士指出的那样:该重大研究计划意义重大,通过原始创新性研究,旨在推动机械工程学科在基础性、前沿性等方面不断进展,在国际上取得重要地位,在某一领域形成中国学派。同时,他强调了纳米制造研究内容的创新性、学科交叉性、项目实施的计划性等,并期望在基础研究领域产生重大突破,取得重大成果。

《微纳制造的基础研究学术著作丛书》是科学出版社依托基金委“纳米制造的基础研究”重大研究计划项目,经过反复论证之后组织、出版的系列学术著作。该丛书力争起点高、内容新、导向性强,体现科学出版社“三高三严”的优良作风。丛书作者都曾主持过重大研究计划“纳米制造的基础研究”项目或国家自然科学基金其他相关项目,反映该研究中的前沿技术,汇集纳米制造方面的研究成果,形成独特的研究思路和方法体系,积累丰富的经验,具有创新性、实用性和针对性。

《微纳制造的基础研究学术著作丛书》涉及近几年来我国围绕纳米制造科学的国际前沿、国家重大制造工程中所遇到的基础研究难题等方面所取得的主要创新研究成果,包括表面纳米锥的无掩模制造及光电特性,光刻物镜光学零件纳米精度制造基础研究,铜互联层表面的约束刻蚀化学平坦化新方法,大尺度下深纹纳米结构制造方法与机理表征,基于为加工技术的微纳集成制造原理及方法研究,微纳流

控系统跨尺度兼容一体化集成制造基础研究,微/纳光学阵列元件的约束刻蚀剂层加工技术与系统的基础研究,等等。

毫米制造技术的应用,带动了蒸汽工业革命,推动了英国的振兴;微米制造技术的发展,带来了信息工业革命,带领美国的崛起;纳米制造技术也必将引领第三次工业革命的浪潮,我国的纳米制造业若能把握住历史的机遇,必将屹立于浪潮之巅,为实现中华民族的伟大复兴贡献出强劲的力量。

作为基金委重大研究计划项目“纳米制造的基础研究”的指导专家组组长,我深信《微纳制造的基础研究学术著作丛书》的及时出版,必将推动我国纳米制造学科的深入发展,在难题攻克、人才培养、技术推动等方面发挥显著作用。同时,希望广大读者提出建议和指导,以促进丛书的出版工作。



2013年10月28日

前 言

大多数微机电器件都利用具有一定深宽比的复杂微结构与外部环境之间进行能量交互,其制造技术虽然源于半导体工艺和微电子工艺,但又在它们的基础上发展、提高,具有很大不同,涉及残余应力变形、黏连和静电拉入等许多与工艺相关的特有问題。即便是具备丰富微电子工艺经验的研究人员,在没有经过相关 MEMS 工艺学习的情况下,也无法保证设计出具备可制造性的 MEMS 器件。同时, MEMS 工艺与微电子工艺最大的不同在于: MEMS 还没有发展到设计与制造完全分离的阶段。微机电领域的设计者必须通晓 MEMS 制造技术,以便于在进行器件结构设计的同时完成工艺设计或可加工性验证。

MEMS 是一个多学科融合的技术领域,从器件应用角度接触 MEMS 的多数研究者没有机会在实践中接触与传统加工方式存在很大差异的微 MEMS 制造工艺,所设计出的创新器件很多过于强调结构特点、尺寸的精细和精准,而忽略了工艺实现的可行性、工艺能量或化学腐蚀的兼容性,最终导致微结构加工失败,使太多的创新设计流于纸面。这些问题的存在严重影响了 MEMS 行业的发展。

本书针对行业发展中的问题,在总结一批国家级基金项目成果的基础上,以 MEMS 制造工艺实践为切入点,内容覆盖 MEMS 加工技术的基本工艺方法和比较复杂的工艺流程组合,针对 MEMS 读者群专业背景广泛的特点,大量使用图表以增加易读性,并特别附加介绍了与工艺相关的化学品特性和工艺过程相关的安全问题,可作为 MEMS 专业科研人员、工艺技术人员、研究生和本科生的参考书。

全书共 9 章,分别介绍了 MEMS 制造技术发展历程和发展趋势、MEMS 制造材料基础、MEMS 制造中的沾污及洁净技术、MEMS 制造中的图形转移技术、湿法腐蚀与干法刻蚀技术、氧化扩散与注入、薄膜制备技术、MEMS 标准工艺和 MEMS 封装技术。附录给出了 MEMS 常用化学品特性和安全术语,以供读者参考。

最后要特别说明的是,作者有限的经验和知识不能详括包容万千的 MEMS 技术,书中不尽之处敬请读者谅解。

作 者

2013 年 7 月于西安

目 录

《微纳制造的基础研究学术著作丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 微机电系统定义	1
1.2 MEMS 制造技术	3
1.3 MEMS 制造技术发展历程	4
1.4 MEMS 制造技术发展趋势	10
参考文献	13
第 2 章 MEMS 制造材料基础	15
2.1 引言	15
2.2 硅材料	15
2.3 硅化合物	20
2.3.1 二氧化硅	20
2.3.2 氮化硅	21
2.4 压电材料	22
2.5 形状记忆合金	24
2.6 超磁致伸缩材料	28
2.7 电流变/磁流变体	28
2.8 有机聚合物材料	29
2.8.1 PI	30
2.8.2 PDMS	30
2.8.3 PMMA	33
2.9 聚合物前驱体陶瓷	34
参考文献	36
第 3 章 MEMS 制造中的沾污及洁净技术	38
3.1 MEMS 制造中的沾污	38
3.1.1 洁净间技术	39
3.1.2 去离子水技术	41
3.1.3 防静电技术	44
3.2 MEMS 制造中的清洗	48

3.2.1	SPM 清洗	48
3.2.2	RCA 清洗	49
3.2.3	DHF 清洗	50
3.2.4	超声/兆声清洗	50
3.2.5	其他清洗	53
3.2.6	标准清洗流程	53
参考文献		55
第 4 章 图形转移		56
4.1	引言	56
4.2	光刻技术	56
4.2.1	光刻基本原理	56
4.2.2	制版	58
4.2.3	脱水烘	60
4.2.4	涂胶	61
4.2.5	软烘	67
4.2.6	对准	68
4.2.7	曝光	71
4.2.8	中烘	77
4.2.9	显影	77
4.2.10	坚膜	79
4.2.11	镜检	79
4.2.12	去胶	79
4.3	剥离	80
4.3.1	单层胶氯苯处理法	81
4.3.2	双层胶法	81
4.3.3	图形反转胶法	82
4.3.4	其他方法	83
4.4	软光刻技术	85
4.4.1	嵌段共聚物自组装	85
4.4.2	微复制成形	89
4.4.3	微转印成形	91
4.4.4	微接触印刷	92
4.4.5	毛细管微成形	95
4.4.6	溶剂辅助微成形	97
4.4.7	电诱导微成形	98

参考文献	100
第 5 章 湿法腐蚀与干法刻蚀	102
5.1 湿法腐蚀	102
5.1.1 硅的各向同性湿法腐蚀	104
5.1.2 硅的各向异性湿法腐蚀	106
5.1.3 二氧化硅的湿法腐蚀	114
5.1.4 氮化硅的湿法腐蚀	115
5.1.5 铝的湿法腐蚀	115
5.1.6 其他材料的湿法腐蚀	115
5.2 干法刻蚀	115
5.2.1 等离子基础	117
5.2.2 等离子体的产生	120
5.2.3 溅射刻蚀	121
5.2.4 等离子刻蚀	122
5.2.5 反应离子刻蚀	123
5.2.6 深度反应离子刻蚀	127
参考文献	132
第 6 章 氧化、扩散与注入	134
6.1 氧化	134
6.1.1 氧化设备	134
6.1.2 Deal-Grove 氧化模型	135
6.2 扩散	136
6.3 离子注入	145
参考文献	147
第 7 章 薄膜制备	148
7.1 化学气相沉积	148
7.2 真空镀膜	155
7.3 外延	157
7.4 SOI 制备	158
7.5 浸渍提拉法	160
7.6 激光快速固化成型	161
参考文献	164
第 8 章 MEMS 标准工艺	165
8.1 引言	165
8.2 表面牺牲层标准工艺	166

8.2.1	MUMPs 表面牺牲层标准工艺	166
8.2.2	SUMMiT 工艺	175
8.3	体加工标准工艺	178
8.3.1	溶片工艺	178
8.3.2	SCREAM 工艺	181
8.3.3	SOI 工艺	183
8.3.4	LIGA 工艺	189
8.4	混合工艺	192
8.4.1	体表混合工艺	193
8.4.2	MEMS 加 CMOS 混合工艺	194
	参考文献	204
第 9 章	MEMS 封装	205
9.1	引言	205
9.2	芯片级封装	206
9.2.1	探针测试	206
9.2.2	减薄/喷金	208
9.2.3	划片	209
9.2.4	上芯	210
9.2.5	压焊	211
9.2.6	封帽	214
9.3	圆片级封装	217
9.3.1	真空薄膜密封	218
9.3.2	阳极键合	219
9.3.3	熔融键合	221
9.3.4	共晶键合	222
9.3.5	其他中间层键合	222
	参考文献	223
附录 A	MEMS 制造常用化学品	224
附录 B	化学品安全术语	236
	索引	241

第 1 章 绪 论

1.1 微机电系统定义

微机电系统(micro electromechanical systems, MEMS)是指可批量制作的,集微机构、微传感器、微执行器及信号处理和电路,乃至通信和电源等于一体的微型器件或机电系统。如图 1.1 所示, MEMS 通过微传感器感知外界环境,通过处理器对环境信号进行处理和决断,然后通过微执行器对外界环境作出反应。部分 MEMS 还内置有通信组件,可以在不同的 MEMS 器件或系统间进行信息交互。不同于微电子电路, MEMS 不仅能对电流的开、合进行控制,还能对外界的光、磁、热、流体、速度和温度等多种环境变量进行感知和操纵。



图 1.1 MEMS 示意图

MEMS 是随着半导体集成电路技术、微细加工技术和超精密机械加工技术发展而发展起来的。MEMS 技术的目标是通过系统的微型化、集成化来探索具有新原理、新功能的器件和系统,从而开辟一个新技术领域和产业。MEMS 既可以深入狭窄空间完成大尺寸机电系统所不能完成的任务,又可以嵌入大尺寸系统中,把自动化、智能化和可靠性提高到一个全新的水平。21 世纪, MEMS 将逐步从实验室走向实用化,对工农业、信息、环境、生物工程、医疗、空间技术、国防和科学发展产生重大影响。MEMS 技术是一种典型的多学科交叉研究领域,几乎涉及电子技术、机械技术、物理学、化学、生物医学、材料科学、能源科学等自然及工程科学的所有领域。MEMS 具有微型化、集成化和批量生产等如下三个基本特征:

(1) 微型化。MEMS 器件体积小,特征尺寸为 $1\mu\text{m}\sim 10\text{mm}$,其在尺度体系中的位置如图 1.2 所示。MEMS 的小体积带来了重量轻、耗能低、惯性小、谐振频率高(数千赫兹,甚至吉赫兹)和响应时间短等各方面的优势。

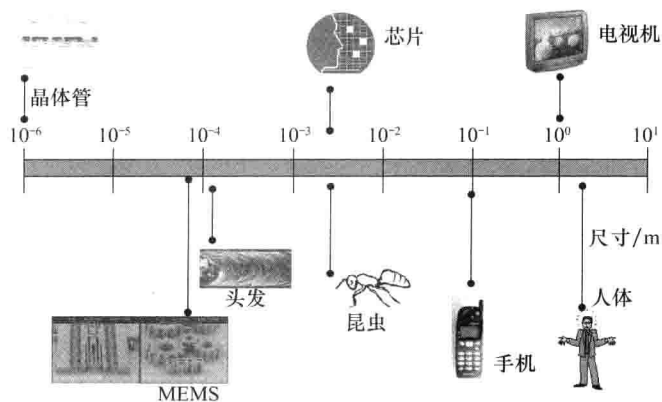


图 1.2 MEMS 的特征尺寸范围

(2) 集成化。可以把不同功能、不同敏感方向或致动方向的多个传感器或执行器集成于一体,或形成微传感器阵列、微执行器阵列,甚至可以通过微电子工艺和微制造工艺的兼容化,实现传感器、执行器、信号处理和控制电路的单片集成,形成复杂的微系统。图 1.3 展示了由加州大学伯克利分校研制的智能微尘(smart dust)系统^[1],在不到 1cm^3 的空间内集成了传感、通信、运算控制电路和电池等复杂的功能,能够大量散布于战场、桥梁和楼宇等场所,并通过各智能微尘间的通信和自协调形成监控网络。

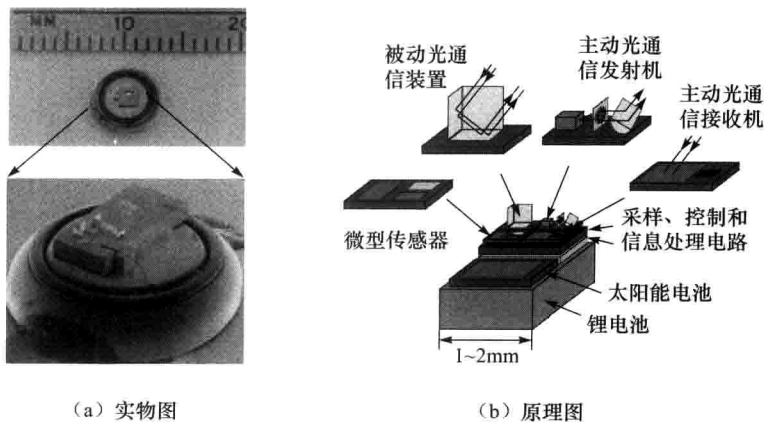
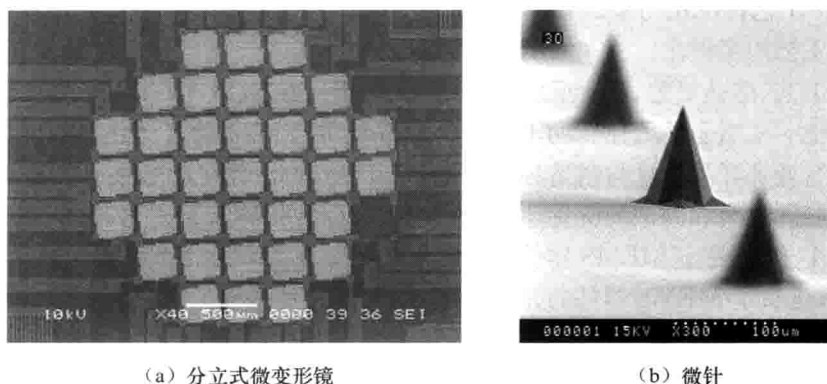


图 1.3 智能微尘

(3) 批量生产。用源于半导体工艺的微制造工艺在一片衬底上同时批量制造成百上千个微型机电器件,从而大大降低生产成本。图 1.4(a)是采用表面牺牲层工艺制备的分立式微变形镜阵列,整个阵列由大量镜面单元组成,所有的镜面单元

都是经过相同的加工工艺一次加工而成,单元的一致性高、成本低,如果使用传统工艺制备,每个镜面单元需要分别制作并手工装配和测试,成本高昂。图 1.4(b)是采用 KOH 各向异性湿法腐蚀工艺制备的微针阵列,所有微针一次制成,如果采用传统超精密机械加工方法制备,工作量是十分巨大的。



(a) 分立式微变形镜

(b) 微针

图 1.4 MEMS 的批量化优势

(图片来源于西北工业大学空天微纳教育部重点实验室)

1.2 MEMS 制造技术

MEMS 制造工艺(MEMS fabrication process)是下至纳米尺度、上至毫米尺度微结构加工工艺的通称。广义上的 MEMS 制造工艺,其方式十分丰富,几乎涉及各种现代加工技术,主要制造技术途径有以下三种:

- (1) 以美国为代表的、以集成电路加工技术为基础的硅基微加工技术。
- (2) 以德国为代表发展起来的 LIGA 技术。
- (3) 以日本为代表发展的精密加工技术。

本书所介绍的 MEMS 制造工艺主要是指起源于半导体和微电子工艺,以光刻、外延、薄膜淀积、氧化、扩散、注入、溅射、蒸镀、刻蚀、划片和封装等为基本工艺步骤来制造复杂三维形体的微加工技术。微机电器件制造过程中常用的体工艺、表面工艺及键合技术都是由半导体工艺演变而来,要掌握 MEMS 制造工艺技术,必须要熟悉半导体制造技术的基本工艺步骤。但是,由于 MEMS 需要可动并具有一定纵向高度的微结构,需要与外部环境之间进行能量交互,涉及残余应力变形、工艺及工作黏附和静电拉入(pull-in)等微器件的特有问题,其 MEMS 制造工艺又在半导体工艺的基础上有所发展,具有显著的不同之处,因此,本书主要从以下三个方面对 MEMS 制造工艺技术进行介绍:

- (1) 基本半导体工艺。MEMS 制造工艺由光刻、薄膜淀积、湿法腐蚀和干法

刻蚀等基本半导体工艺组成,但由于 MEMS 又具有高深宽比、可动结构等半导体或微电子器件所不具备的特点,其所使用的半导体基本工艺又涉及高深宽比涂胶、RIE Lag 效应和释放黏附等独有的技术特点,本书结合 MEMS 特点首先对其制造所涉及的基本半导体工艺技术进行介绍。

(2) 工艺标准化与集成技术。MEMS 的多学科交叉特性导致了其器件种类和加工工艺的多样化。正在使用和研究中的加工工艺有体硅湿法腐蚀工艺、表面牺牲层工艺、溶硅工艺、深度反应离子刻蚀(DRIE)工艺、SCREAM 工艺、LIGA 工艺和其他一些微器件所独有的工艺等。MEMS 加工工艺的多样化导致其无法像微电子行业那样将设计与制造独立开来,每个 MEMS 研究者都必须熟知 MEMS 设计、制造、封装和测试的所有环节,各 MEMS 研究机构都针对自己的 MEMS 器件定制工艺,而特定 MEMS 器件的成熟工艺又无法为其他 MEMS 器件的加工提供支持,延长了 MEMS 器件的开发周期,加大了开发难度。制定一套或几套能够满足大多数 MEMS 器件加工需求的标准化工艺以提供商业化代工服务,并实现 MEMS 工艺与集成电路工艺的单片集成以解决微器件与外接电路间的寄生电容和电阻问题,对于提高 MEMS 器件的性能和缩短 MEMS 器件的研发周期非常重要。本书在基本工艺的基础上,介绍了表面牺牲层标准工艺和体加工标准工艺两大类标准工艺组合。

(3) 封装技术。MEMS 封装不仅像集成电路封装那样要保护芯片及与其互连的引线不受环境的影响,还要实现芯片与外界环境的能量交互,实现高气密性、高隔离度(固态隔离)和低应力,比微电子封装面临更多挑战,是 MEMS 器件失效的主要原因。对于一般 MEMS 器件来说,封装成本占到其总制造成本的 80%,而对于特种 MEMS 器件(如高温压力传感器),这一比例则高达 95%。MEMS 封装腔体内可能需要真空、充氮、充油或其他特殊条件,其悬置结构或薄膜释放后容易在清洗和划片过程中损坏,发生黏附或沾染灰尘,需要在释放后马上封装或者将封装融合到其制造过程中。本书主要对微器件划片后进行的芯片级封装和微器件划片前进行的圆片级封装两大类封装方式进行介绍。

1.3 MEMS 制造技术发展历程

1824 年,瑞典化学家 Berzelius 在如图 1.5 所示的石英晶体中发现了质量含量占地球地表 25.7% 的硅,为微电子技术和 MEMS 技术的发展奠定了材料基础。

1926~1928 年,Lilienfeld^[2]在专利中首次提出了场效应晶体管(field effect transistor, FET)的结构和原理,而 Bell 实验室则在 1947 年利用半导体材料锗研制出如图 1.6 所示的第一个晶体管,奠定了半导体产业的基石。

1954 年,Bell 实验室的 Smith^[3]发现了硅与锗的压阻效应,即当有外力作用

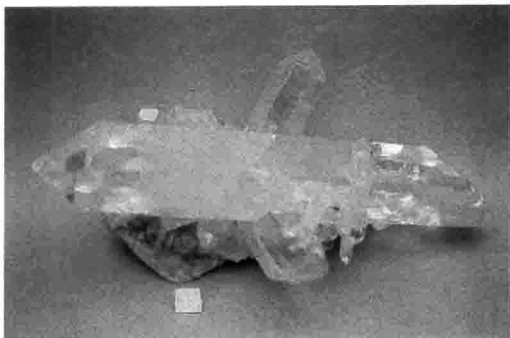


图 1.5 石英晶体
(图片来源于史密森学会)

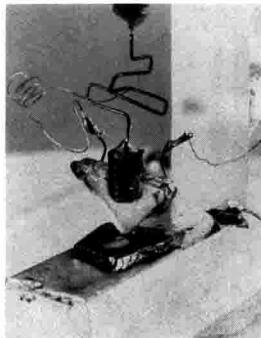


图 1.6 第一个晶体管
(图片来源于 AT&T)

于半导体材料时,其电阻将明显发生变化,这为微型压力传感器的研制提供了理论基础。1956 年,硅应变计成为商业化产品^[4],而美国 Kulite 公司则于 1961 年展示了第一个基于体硅工艺的压阻式压力传感器。1959 年,诺贝尔物理学奖获得者 Feynman 在加州理工学院做了著名的“底层大有可为”演讲,预言制造技术将沿着从大到小的途径发展,即用大机器制造出小机器,用这种小机器又能制造出更小的机器,并许诺将给第一个研制出直径小于 1/64 英寸^①马达的人员 1000 美元的奖励。

1967 年,Nathanson 等^[5]提出了表面牺牲层工艺技术,并以金作为结构材料,制备出了具有高谐振频率(5kHz)的悬臂梁结构。而加州大学伯克利分校的 Howe 和 Muller^[6]则在此基础上继续发展,于 1982 年提出了以多晶硅为结构材料制备悬臂梁结构的表面牺牲层工艺,所制备的微梁结构如图 1.7 所示,并于 1984 年进一步将多晶硅微桥结构与 NMOS 电路集成到一个芯片上。

1970 年,美国 Kulite 公司展示了第一款硅基加速度计。1977 年,Stanford 大学展示了第一款电容式压力传感器。1979 年,第一个微喷墨打印头诞生。1980 年,Petersen^[7]研发出第一款单晶硅材料的静电力驱动微扫描镜。1982 年,Honeywell 研发出第一款抛弃型血压传感器(价格为 40 美金)。

1981 年,第一届 Transducers 会议(固态传感器、执行器与微系统国际会议)在 Boston 召开,会议由葛文勋教授任大会主席,这是微技术研究领域的第一次专门性学术会议,也见证了华裔科学家在世界 MEMS 发展史上所作出的突出贡献。1982 年,IBM 的 Peterson^[8]发表了长达 38 页的论文,详细论述了硅作为机械结构材料的优良特性。同年,德国核能研究所提出了一种以高深宽比结构为特色的

^① 1in(英寸)=2.54cm。

LIGA 工艺,用于制造微齿轮等微型机械部件。采用 LIGA 工艺制备的高深宽比结构如图 1.8 所示。

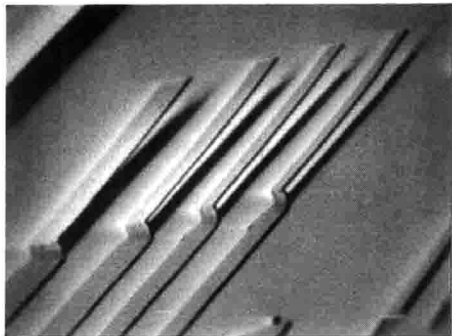


图 1.7 使用表面牺牲层工艺制备的多晶硅悬臂梁

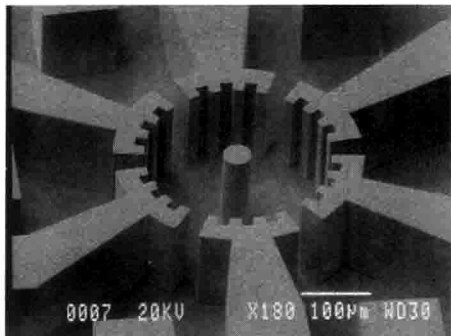


图 1.8 使用 LIGA 工艺制备的微结构

1987 年, MEMS 作为一个正式的名称在美国诞生, 并吸纳了各个领域的专家和学者, 开始蓬勃发展, 这是 MEMS 发展史上的里程碑。同年, 美国 AD 公司开始了微加速度计项目。1988 年, 加州大学伯克利分校的 Fan、Tai 和 Muller 首次研制出如图 1.9 所示的静电力驱动微型马达, 将 Feynman 的愿望在 29 年后变成现实。同年, 美国 Novasensor 公司还使用硅-硅熔融键合技术实现了微压力传感器的量产。1988 年, 第一届 IEEE MEMS 国际会议召开, 此会议现在已经成为 MEMS 领域的国际顶级会议。

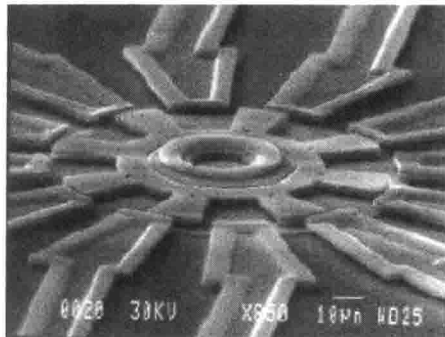
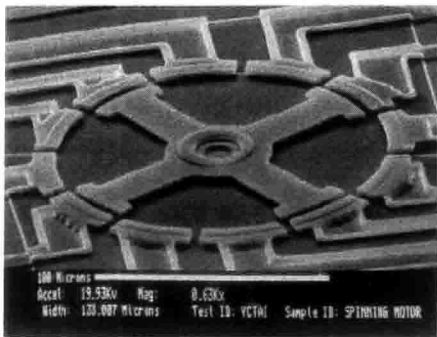


图 1.9 两个静电驱动微马达

1989 年, 加州大学伯克利分校的 Tang、Nguyen、Judy 等^[9]利用多晶硅表面牺牲层工艺研制出第一个梳齿式静电力驱动器, 如图 1.10 所示。