

光机电一体化丛书

# 微机电系统 设计与制造

莫锦秋 梁庆华 汪国宝 王石刚 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

光机电一体化丛书

# 微机电系统设计与制造

莫锦秋 梁庆华 汪国宝 王石刚 编著

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

**图书在版编目 (CIP) 数据**

微机电系统设计与制造/莫锦秋,梁庆华,汪国宝,  
王石刚编著. —北京:化学工业出版社, 2004. 3  
(光机电一体化丛书)  
ISBN 7-5025-5237-5

I. 微… II. ①莫…②梁…③汪…④王… III. 微  
机电 IV. ①TM38②TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 016820 号

---

光机电一体化丛书

**微机电系统设计与制造**

莫锦秋 梁庆华 汪国宝 王石刚 编著

责任编辑:任文斗

文字编辑:王金生

责任校对:蒋宇

封面设计:蒋艳君

\*

化学工业出版社 出版发行  
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 11 $\frac{3}{4}$  字数 283 千字

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5237-5/TH·186

定 价: 30.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

## 《光机电一体化丛书》编辑委员会

主 任 林 宋

副主任 王生泽 王石刚 程愿应

委 员 (排名不分先后)

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 胥信平 | 黎 放 | 林 宋 | 王生泽 | 王石刚 | 程愿应 |
| 胡于进 | 张卫国 | 莫锦秋 | 何 勇 | 董方祥 | 刘继英 |
| 罗学科 | 朱宏军 | 崔桂芝 | 殷际英 | 方建军 | 田建君 |
| 马全明 | 王延璋 | 赵 坤 | 周洪江 | 刘杰生 | 徐胜林 |
| 韩少军 | 程 铭 |     |     |     |     |

## 序

光机电一体化是激光技术、微电子技术、计算机技术、信息技术与机械技术的相互交叉与融合,是诸多高新技术产业和高新技术装备的基础。它包括产品和技术两方面:光机电一体化产品是集光学、机械、微电子、自动控制和通讯技术于一体的高科技产品,具有很高的功能和附加值;光机电一体化技术是指其技术原理和使光机电一体化产品得以实现、使用 and 发展的技术。

目前,国际上产业结构的调整使得各个行业不断融合和协调发展。作为光学、机械与电子相结合的复合产业,光机电一体化以其特有的技术带动性、融合性和普适性,受到了国内外科技界、企业界和政府部门的特别关注,它将在提升传统产业的过程中,带来高度的创新性、渗透性和增值性,成为未来制造业的支柱,被誉为 21 世纪最具魅力的朝阳产业。我国已经将发展光机电一体化技术列为重点高新技术发展项目,北京市政府也于 2001 年 7 月 23 日批准正式成立了北京市光机电一体化产业基地,预计到 2010 年,北京市光机电一体化产业总产值将达到 336 亿元。

随着光机电一体化技术的不断发展,各个行业的技术人员对其兴趣和需求也与日俱增。但到目前为止,国内还鲜有将光机电一体化技术作为一个整体技术门类来介绍和论述的书籍,这与其方兴未艾的发展势头形成了巨大反差。有鉴于此,由北方工业大学、东华大学、华中科技大学和上海交通大学联合编写光机电一体化丛书,旨在适时推出一套光机电一体化技术基本知识和应用实例的科技丛书,满足科研设计单位、企业及高等院校的科研和教学的需求,为有关技术人员在开发光机电一体化产品时,提供从产品造型、功能、结构、材料、传感测量到控制等诸方面有价值的参考素材。

本丛书共十本,包括《光机电一体化实用技术》、《现代数控机床》、《光机电一体化系统设计》、《智能机器人》、《光机电一体化技术产品实例》、《楼宇设备自动化技术》、《关节型机器人》、《微机电系统设计与制造》、《激光在加工和检测中的应用》、《光电传感器及其应用》。自 2003 年 8 月起陆续出版发行。

丛书的基本特点,一是内容新颖,力求及时地反映光机电一体化技术在国内外的最新进展和作者的有关研究成果;二是系统全面,丛书分门别类地归纳总结了光机电一体化技术的基本理论和在国民经济各个领域的应用实例,重点介绍了光机电一体化技术的工程应用方法和实现方法,许多内容,如楼宇自动门的专门论述,尚属国内首次;三是深入浅出,每本书重点突出,注重理论联系实际。既有一定的理论深度,又偏重实用性,力求满足不同层次读者的需求,适合工程技术人员阅读和高校机械类专业教学的需要。

由于本丛书涉及内容广泛,相关技术发展迅速,加之作者水平有限,时间紧促,书中错误和不妥在所难免,恳请专家、学者和读者不吝指教为盼!

《光机电一体化丛书》编辑委员会

2003 年 5 月于北京

# 前言

微机电系统 (MEMS, 即 Micro Electro Mechanical System) 是一门新兴的交叉科学, 与微电子学、信息学、材料科学和纳米技术的发展等密切相关。被公认为 21 世纪的重点发展学科, 受到极大重视, 是国家重点发展的高技术产业, 发展前景看好。

微机电系统是微电子技术的拓宽和延伸, 通过传感器、致动器、信号处理、控制等多项功能, 与外部世界有机地联系起来。微机电不仅可以感受运动、光、声、热、磁等自然界信号, 并将这些信号转换成微电子系统可以认识的电信号, 而且还可以通过微电子系统控制这些信号, 进而发出指令, 控制执行部件完成所需要的操作。微机电系统将微电子技术和精密机械加工技术相互融合, 实现了微电子与机械融为一体的系统, 不仅可以降低机电系统的成本, 而且还可以完成许多大尺寸机电系统无法完成的任务。微机电系统将信息获取、处理和执行融为一体, 集中了微米尺度的机械、电子、光学元器件和各种传感器, 派生出多种新原理、新器件和新系统, 将进一步促进产品的微型化和智能化, 在空间、信息、汽车、工业控制、通信、大容量数据存储、光信息处理、仪表仪器和国防等领域有广泛用途。

本书主要从普及的角度介绍微机电系统及其相关技术, 全书共分为 12 章, 分别对微机电系统的定义、起源及研究现状、制造技术、系统构成、设计技术进行了深入浅出、通俗易懂的介绍。本书的特点是信息量大、系统全面, 包含了微机电系统制造过程中微机械加工、微封装、微检测各个环节; 微机电系统构成中的各种微传感器、微执行器、微构件、微系统的工作机理; 先进的微机电系统设计技术以及计算机辅助技术; 多种设计手段和实用软件。

本书可供希望了解或采用微型机电系统的工程技术人员阅读, 也可作为机械工程类学生学习专业选修课时的教学参考书。

本书的第 1、6、7、8、9 章由莫锦秋编写, 第 2、3、4 章由汪国宝编写, 第 5、10 章由王石刚编写, 第 11、12 章由梁庆华编写, 全书由莫锦秋统稿。在本书的编写过程中, 林烨、孙小文、顾华平、程志国、王颖峰、姜文华、王高中等同学给予了大力的支持和协助, 中科院微系统所车录锋老师给予了不少指教, 在此表示谢意。

由于我们水平有限, 且时间仓促, 难免的错误和不妥之处, 敬请批评指正。

编者

2004 年 1 月

## 内 容 提 要

微机电系统 (MEMS, 即 Micro Electro Mechanical System) 与微电子学、信息学、材料科学和纳米技术等密切相关, 具有体积小、精度高、重量轻、性能可靠稳定、能耗低、灵敏度高、工作效率高, 以及多功能智能化和适于大批量生产, 成本低廉等一系列优点, 有巨大的应用前景和经济效益, 被公认为 21 世纪的重点发展高科技前沿学科。

本书主要从普及的角度介绍微机电系统及其相关技术, 全书共分为 12 章, 分别对微机电系统的定义、起源及研究现状、制造技术、系统构成、设计技术进行了深入浅出、通俗易懂的介绍。本书的特点是信息量大、系统全面, 包含了微机电系统制造过程中微机械加工、微封装、微检测各个环节; 微机电系统构成中的各种微传感器、微执行器、微构件、微系统的工作机理; 先进的微机电系统设计技术以及计算机辅助技术; 多种设计手段和实用软件。

本书可供希望了解或采用微机电系统的工程技术人员阅读, 也可作为机械工程类学生学习专业选修课时的教学参考书。

# 目 录

|                      |    |
|----------------------|----|
| <b>第 1 章 概论</b>      | 1  |
| 1.1 微机电系统简介          | 1  |
| 1.2 微机电系统的起源         | 3  |
| 1.3 微机电系统的发展现状       | 4  |
| 1.3.1 国外的发展现状        | 4  |
| 1.3.2 国内的发展现状        | 5  |
| <b>第 2 章 微机电系统材料</b> | 8  |
| 2.1 硅材料              | 8  |
| 2.2 压电材料             | 10 |
| 2.3 形状记忆合金           | 10 |
| 2.4 超磁致伸缩材料          | 12 |
| 2.5 凝胶               | 13 |
| 2.6 电流变体             | 13 |
| <b>第 3 章 微机械加工技术</b> | 14 |
| 3.1 传统超精密与特种加工技术     | 14 |
| 3.1.1 超精密机械加工        | 14 |
| 3.1.2 微细电火花加工        | 15 |
| 3.1.3 高能束微机械加工技术     | 15 |
| 3.2 微机电系统常用的集成电路工艺   | 17 |
| 3.2.1 薄膜成形           | 17 |
| 3.2.2 掺杂技术           | 19 |
| 3.2.3 光刻技术           | 20 |
| 3.3 硅微机械加工技术         | 22 |
| 3.3.1 体微加工技术         | 22 |
| 3.3.2 表面微加工          | 27 |
| 3.3.3 键合技术           | 28 |
| 3.4 光刻电铸模造工艺         | 30 |
| 3.5 微机械加工实例          | 32 |
| <b>第 4 章 微封装</b>     | 35 |
| 4.1 封装技术             | 36 |
| 4.1.1 晶片级封装          | 36 |
| 4.1.2 单芯片封装          | 37 |
| 4.1.3 多芯片与微系统封装      | 39 |
| 4.1.4 表面微加工法用于封装     | 39 |
| 4.2 三维堆装             | 40 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 4.3 未来微机电系统封装发展趋势和方向 | 40  |
| <b>第5章 微检测技术</b>     | 41  |
| 5.1 微结构的材料特性检测技术     | 41  |
| 5.1.1 弹性模量的测定        | 41  |
| 5.1.2 微结构材料应力的检测     | 42  |
| 5.1.3 微结构材料热物性参数的检测  | 48  |
| 5.2 微机电系统构件的几何量检测    | 50  |
| 5.2.1 光学法测量几何尺寸      | 50  |
| 5.2.2 扫描隧道显微测量技术     | 54  |
| 5.2.3 薄膜构件的膜厚测量      | 55  |
| 5.3 微系统的性能检测         | 56  |
| 5.3.1 结构动态参数的识别      | 56  |
| 5.3.2 微执行器运动的检测      | 57  |
| 5.3.3 动态微结构的视觉检测法    | 58  |
| <b>第6章 微传感器</b>      | 61  |
| 6.1 物理传感器            | 61  |
| 6.1.1 微型力学量传感器       | 61  |
| 6.1.2 微型光学量传感器       | 69  |
| 6.1.3 微型热学量传感器       | 70  |
| 6.1.4 微型声学量传感器       | 71  |
| 6.2 微型化学量传感器         | 72  |
| 6.2.1 微型气体传感器        | 72  |
| 6.2.2 微型离子敏传感器       | 74  |
| 6.3 微型生物传感器          | 75  |
| 6.3.1 生物传感器的分类       | 75  |
| 6.3.2 悬臂梁式生物传感器      | 78  |
| <b>第7章 微执行器</b>      | 81  |
| 7.1 静电执行器            | 81  |
| 7.2 压电执行器            | 85  |
| 7.3 电磁执行器            | 87  |
| 7.4 SMA 执行器          | 89  |
| 7.5 热执行器             | 91  |
| 7.6 微流体执行器           | 92  |
| <b>第8章 微构件</b>       | 94  |
| 8.1 结构梁              | 94  |
| 8.2 薄膜               | 97  |
| 8.3 铰链               | 101 |
| 8.3.1 平面柔性铰链微铰链      | 101 |
| 8.3.2 非平面表面微铰链       | 102 |
| 8.4 隧道探针             | 103 |

|             |                        |            |
|-------------|------------------------|------------|
| 8.5         | 压阻换能器件 .....           | 104        |
| 8.6         | 静电微构件 .....            | 105        |
| <b>第9章</b>  | <b>微系统应用</b> .....     | <b>108</b> |
| 9.1         | 在汽车工业中的应用 .....        | 108        |
| 9.1.1       | 压力传感器 .....            | 108        |
| 9.1.2       | 硅加速度传感器 .....          | 108        |
| 9.2         | 微机器人 .....             | 109        |
| 9.3         | 微型飞行器 .....            | 111        |
| 9.4         | 在航空航天中的应用 .....        | 112        |
| 9.5         | 在医学中的应用 .....          | 114        |
| 9.5.1       | 植入式人造器官 .....          | 114        |
| 9.5.2       | 体内显微手术 .....           | 114        |
| 9.5.3       | 微喷雾给药 .....            | 115        |
| 9.6         | 在军事中的应用 .....          | 116        |
| 9.7         | 在生物科学中的应用 .....        | 118        |
| 9.7.1       | DNA PCR 扩增芯片 .....     | 119        |
| 9.7.2       | DNA 毛细管电泳芯片 .....      | 120        |
| 9.7.3       | 微型 DNA 流体控制芯片 .....    | 120        |
| 9.7.4       | 集成 DNA 微系统芯片 .....     | 120        |
| 9.8         | 在信息技术中的应用 .....        | 120        |
| 9.8.1       | 微光机电器件 .....           | 121        |
| 9.8.2       | 无线电微机电系统 .....         | 123        |
| <b>第10章</b> | <b>微尺度效应</b> .....     | <b>126</b> |
| 10.1        | 微摩擦基础 .....            | 126        |
| 10.2        | 微尺度热学 .....            | 127        |
| 10.2.1      | 热传导的尺度效应 .....         | 127        |
| 10.2.2      | 热交换的尺度效应 .....         | 129        |
| 10.2.3      | 热辐射的尺度效应 .....         | 129        |
| 10.3        | 微流体的尺度效应 .....         | 129        |
| 10.4        | 微执行器的尺度效应 .....        | 131        |
| 10.4.1      | 静电执行器的尺度效应 .....       | 132        |
| 10.4.2      | 电磁执行器的尺度效应 .....       | 132        |
| 10.4.3      | SMA 执行器的尺度效应 .....     | 134        |
| 10.5        | 尺度效应的实例 .....          | 134        |
| <b>第11章</b> | <b>微机电系统设计技术</b> ..... | <b>135</b> |
| 11.1        | 引言 .....               | 135        |
| 11.2        | 微机电系统设计的概念、任务及类型 ..... | 139        |
| 11.2.1      | 微机电系统设计概念及本质 .....     | 139        |
| 11.2.2      | 设计类型 .....             | 140        |
| 11.2.3      | 微机电系统设计内容 .....        | 140        |

|               |                               |            |
|---------------|-------------------------------|------------|
| 11.2.4        | VLSI、宏机械以及微机电系统设计 .....       | 141        |
| 11.2.5        | 设计原则 .....                    | 142        |
| 11.3          | 微机电系统设计过程 .....               | 143        |
| 11.4          | 微机电系统健壮性设计方法简介 .....          | 145        |
| 11.4.1        | 健壮性设计理论 .....                 | 145        |
| 11.4.2        | 优化算法 .....                    | 147        |
| 11.4.3        | 设计实例——两自由度微谐振器 .....          | 149        |
| 11.5          | 微机电系统设计方法学与发展方向 .....         | 151        |
| <b>第 12 章</b> | <b>微机电系统计算机辅助技术 .....</b>     | <b>153</b> |
| 12.1          | MEMS CAD 设计原则 .....           | 154        |
| 12.2          | MEMS CAD 结构体系 .....           | 154        |
| 12.3          | MEMS 建模与仿真 .....              | 156        |
| 12.3.1        | 加工过程模拟 .....                  | 157        |
| 12.3.2        | 器件特性仿真 .....                  | 158        |
| 12.3.3        | 器件行为模型与系统仿真 .....             | 159        |
| 12.4          | 宏模型 .....                     | 160        |
| 12.4.1        | 微机械宏模型技术现状及类型 .....           | 160        |
| 12.4.2        | 宏模型设计的基本原则和常用方法 .....         | 162        |
| 12.5          | 建模语言 VHDL-AMS 简介 .....        | 162        |
| 12.5.1        | VHDL-AMS 语言的起源: VHDL 语言 ..... | 162        |
| 12.5.2        | VHDL-AMS 语言基本特点 .....         | 163        |
| 12.5.3        | VHDL-AMS 语言的语法 .....          | 163        |
| 12.5.4        | 微机械系统 VHDL-AMS 描述举例 .....     | 167        |
| 12.6          | 常用软件介绍 .....                  | 168        |
| 12.6.1        | SUGAR .....                   | 168        |
| 12.6.2        | AnsysMems .....               | 171        |
| 12.6.3        | MEMS Pro .....                | 174        |
| <b>参考文献</b>   | .....                         | <b>177</b> |

# 第 1 章 概 论

## 1.1 微机电系统简介

为了说明微机电系统 (Micro Electro Mechanical System, MEMS), 还是先从机电系统谈起。现代化的汽车就是一个典型的机电系统, 有几百只传感器、电子控制的点火装置、进油和进气量控制系统、制动系统、安全气囊, 甚至电子导航系统。由传感器检测出汽车的运行参数, 并以电信号的形式将信息传送给电子控制电路, 电子控制电路则根据这些信息作出判断并发出控制命令, 这些命令通过机械执行器实现对汽车运动状态的控制。由此可知机电系统的基本组成部分是传感器、电子控制电路 (微处理器) 和机械执行器。

人们在微电子技术的基础上发展了微机械加工技术, 如硅微加工、光刻电铸模造 (LI-GA) 技术和精密机械加工等, 并将用微机械加工技术制成的微执行器与微电子器件甚至固态传感器有机地集成于一体, 发展出了微机电系统。

微机电系统的概念始于 20 世纪 80 年代, 一般泛指尺度在亚微米至亚毫米范围的装置, 目前定义尚未统一。对应于微机电系统有不同的相关术语及其解释。

(1) MEMS (Micro Elector Mechanical System) 美国北卡罗来纳微电子中心 (MCNC) 定义

微机电系统是由电子和机械组成的集成化器件或系统, 采用与集成电路兼容的大批量处理工艺制造, 尺寸在微米到毫米之间。尤其是将计算、传感与执行融合为一体, 从而改变了感知和控制自然界的方式。

(2) Micro System Technology 欧洲 NEXUS (The Network of Excellence in Multi-functional Microsystems) 定义

微结构产品具有微米级结构, 并具有微结构形状提供的技术功能。微系统由多个微元件组成, 并作为一个完整的系统进行优化, 以提供一种或多种特定功能, 在许多场合包括微电子功能。

(3) Micro Machine 日本微机械中心定义

微机械是由只有几毫米大小的功能元件组成的, 它能够执行复杂、细微的任务。

(4) Micro System 国际电工委员会 (ICE) 定义

微系统是微米量级内的设计和制造技术。它集成了多种元件, 并适于以低成本大批量生产。

这些术语及其解释虽然有一定的不同处, 但有一点是相同的, 即微机电系统是由关键尺寸在亚微米至亚毫米范围内的电子和机械元件组成的器件或系统, 它将传感、处理与执行融为一体, 以提供一种或多种特定功能。

微机电系统应通过尺寸和功能来定义, 而不应限定于任何制作工艺, 因为工艺技术是不断发展和完善的。微机电系统器件并不能完全用总尺寸来定义, 而应用特征尺寸来表征。特征尺寸是决定器件性质和加工工艺的关键尺寸, 如扩散硅压力传感器的膜厚。如图 1-1 所示, 特征尺寸在亚毫米以上的机械电子系统基本上属于传统机电一体化装置, 传统的机械加

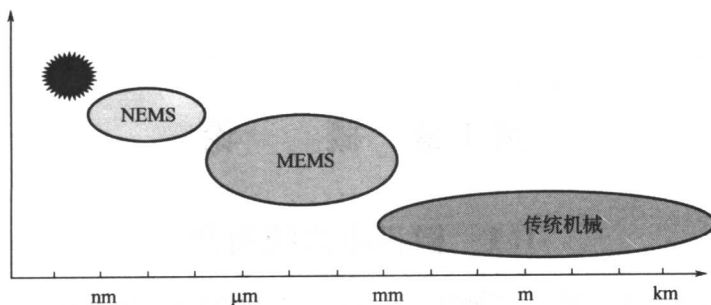


图 1-1 MEMS 的尺度范围

工技术已经能够满足要求。而特征尺寸在亚微米以下的机械电子系统，由于纳米效应、量子效应的作用，其理论基础与加工技术已经完全改变，应属于纳机电系统（Nano Electromechanical System, NEMS）。

由于微机电系统的基于微电子技术的背景，使其具有一般集成电子器件的共同优点，如适于批量加工、可低成本大批量生产，还有微型化带来的高速化、功耗低等优点，因此可以开拓出许多新的应用领域。国内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。

汽车内安装的微传感器已达几十甚至上百个，用于传感气囊、压力、温度、湿度、气体等的情况，以及进行智能控制。其中用于制导、卫星控制的微惯性传感器及微型惯性测量组合在汽车中也能应用于自动驾驶、防撞气囊、防抱死系统（ABS）、定控制等。

在生物医学方面，特别是现代生物医疗领域，微机电系统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，增高体温法治疗癌症是利用超声波或无线电波的能量把身体某一部位加热到  $43^{\circ}\text{C}$  以杀死癌细胞。在治疗时温度不够效果就不好，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。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，而且只在加热时停留在那里。又如血管成形手术中，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，可用注射或吞服法将用微机械加工法制成的微型压力传感器放在气球后面，大夫通过它可以知道斑块清除工作进行得怎么样。通过微机械加工技术已经能制造出可以夹起一个红细胞的微型镊子。用微机械加工法制成的微型泵和阀，也可植入人体内，用于微推进、伤员救护的微流量系统和微分析仪，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的治疗需要。

在信息领域中，现代计算机的外设摄像头、鼠标投影仪、喷墨打印机、高密度海量数据存储器等广泛应用了微机电系统技术。同时，作为信息产业的新方向，光通信正在向有光交换功能的全光通信网络方向发展而无线通信则要求增强功能（如联网等）和减小功耗，包括美国朗讯公司在内的一些公司和大学正在研究全光通信网用的微系统及无线通信用射频微系统。

军事领域是微机系统技术的最早应用领域，大量采用微米/纳米和微系统器件改进武器性能已成为发展新型高科技武器装备的方向。如微型加速度计已成功用于武器系统以改进武器性能。另外，军用微型陀螺、微型化学传感器均制备出样品，将在武器装备中试用。

在航空领域中，微机电系统技术用于改进飞机性能、保证飞机安全舒适、减少噪声。而在航天方面则用于天际信息网、微重力测量。目前的状况是用作运行参数测量的微加速度计已进行了地面辐照实验，正在进行飞行搭载实验，已全面展开微陀螺、微推进和微喷管等微

系统基础。

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、生产的大批微机电产品中的几个典型例子，充分证明微机电系统确实是一个生机勃勃、潜力巨大的领域。

## 1.2 微机电系统的起源

### (1) 微电子-MEMS 技术的基础

微机电系统的起源与微电子技术的发展密切相关。1947 年半导体晶体管的发明，20 世纪 50 年代末至 60 年代初半导体集成电路的研制，使人类得以在微米尺度上大规模制作电子元件、器件与电路。而集成电路的迅速发展，使硅成为了最重要的微电子材料，也为微机电系统技术的发展奠定了基础。

### (2) 压阻现象——引入机械物理量，形成机电系统

1954 年史密斯发现了半导体压阻效应，1958 年人们采用硅单晶制成了半导体应变片，其灵敏系数比传统的金属应变片高出数十倍。由于半导体应变片是粘贴在弹性体上的，并且两种材料的温度膨胀系数不同，使半导体应变片式传感器存在较大的蠕变、滞后、温漂等误差。

20 世纪 60 年代末至 70 年代初，美、日等国先后以压阻效应为基础，研制出扩散压力传感器。扩散压力传感器采用制作集成电路的平面工艺技术，在硅片上光刻、扩散敏感电阻，又在硅片背面研磨加工出凹坑，形成 C 形硅膜片（又称硅杯）。由于敏感电阻和弹性体在同一硅片上，彻底消除了粘贴应变片所带来的误差，而且又可在硅片上制作补偿电阻和电路，使扩散硅压力传感器的精度大为提高。扩散硅压力传感器的发展使硅成为了优良的机械电子材料。

20 世纪 70 年代中期，美国 Kulite 压力传感器公司首先用光刻方法在硅片背面形成氧化硅或氮化硅掩膜，再用各向异性化学腐蚀代替机械研磨来制作扩散压力传感器膜片，并采用静电键合技术进行传感器组装。这种压力传感器可以认为是微型传感器的雏形。由于可以对大硅片进行各向异性化学腐蚀，使得压力传感器能够高精度地批量生产，同时又消除了研磨加工所带来的机械残余应力，提高了传感器的稳定性和成品率。为了加固边框，可将腐蚀加工后的硅片与玻璃静电键合在一起，然后再将整个硅片切割成压力传感器芯片，并封装成器件。这种加工技术能够将几何尺寸控制在微米级，同时又主要通过对硅的深腐蚀和硅片的整体键合来实现，故又称为体微加工技术（Bulk Micromachining）。

### (3) 机械运动部件——真正的微机电系统

20 世纪 80 年代初、中期，美国加州大学 Berkeley 分校、威斯康星大学 Madison 分校等单位研制出了仅从硅片正面对淀积生长的薄膜进行加工而形成微结构的方法。他们利用集成电路中已经广泛应用的多晶硅薄膜作为结构材料，以磷硅玻璃作为牺牲层，制成了压力传感器、硅梁和连杆、弹簧等机械运动零件。1982 年美国加州大学 Berkeley 分校采用表面牺牲层技术成功制作微型静电电机，使机械部件与集成电路集成制作成为现实，微机电系统进入新纪元。由于全部加工仅涉及到硅片正面的薄膜称为表面微加工（Surface Micromachining）技术，这一技术避免了体微加工所要求的双面对准、背面腐蚀等问题，使集成电路工艺的兼容

性大大提高。

与此同时,在德国卡尔斯鲁厄原子核研究所,诞生了以同步辐射 X 射线光刻、电镀和模铸为特征的光刻电铸模造 (LIGA) 技术,可以制成高为数百微米、横向尺寸仅约  $1\mu\text{m}$  的微机械结构,加工材料也突破了传统的平面工艺限制,扩展到金属、塑料和陶瓷,大大增加了灵活性。用 LIGA 工艺制作的电磁电机,其转矩比静电电机大为提高。但是由于要使用同步辐射 X 射线光源,使这一技术的工业应用受到了限制。

体微加工、表面微加工和 LIGA 技术构成了微机械加工 (Micromachining) 技术的主体。通过硅工艺、大规模集成技术以及微机械加工技术,使人们能够把信息传感、数据处理、执行机械以及其他一些微器件,按照集成电路的制造原则,以高密度、低成本的方式集成在一起,产生了微机电系统这一概念。

#### (4) 微机电系统深入应用

人们在发展微电子技术和微机械加工技术的过程中,不断地开发了一系列新的设计和制造原则,以及各种新技术和加工手段,当这些新的设计和制造技术用于传统上并不属于电子学领域里的问题时,如传感器、执行器、传动装置、流体机械 (泵、阀等)、光学器件等,带来了革命性的变化。

20 世纪 90 年代喷墨打印头、硬盘读写头、硅加速度计和数字微镜器件等相继规模化生产充分展示了微系统技术及其微系统的巨大应用前景。90 年代初,美国 ADI 公司成功地将微加速度计商品化,并大批量应用于汽车防撞气囊。90 年代中出现了深槽刻蚀技术,围绕该技术发展了多种新型加工工艺,促进体硅工艺的快速的发展,微米/纳米和微系统技术的发展达到了高峰。1999 年以来,国际上微米/纳米技术及微系统的专利数呈指数形式上长。90 年代末 Sandia 实验室五层多晶硅技术代表了当时的最高水平 (见图 1-2)。

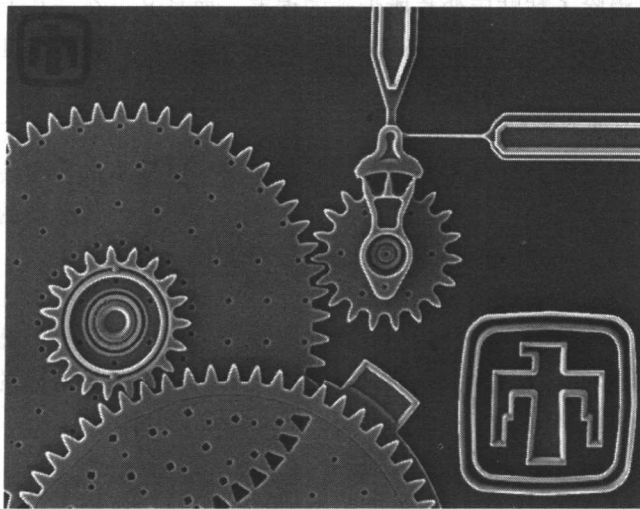


图 1-2 五层多晶硅

### 1.3 微机电系统的发展现状

#### 1.3.1 国外的发展现状

由于有军事应用的牵引,微机电系统研究在国际上得到了迅速发展。其投资集中用于研究和发展先进材料、器件、系统和加工方法,从而使这些技术快速方便地向实用化转化。

美国国家自然科学基金、先进研究计划、国防部等投资 1.4 亿美元进行微机电系统技术研究。最新资料表明,美军已将今后微机电系统在军事领域的应用归纳为九大类,确定了利用 MEMS 技术改进武器性能的九大主攻方向。

- ① 武器制导和个人导航的惯性导航组合。
- ② 超小型、超低功率无线通讯 (RF 微米/纳米和微系统) 的机电信号处理。
- ③ 军需跟踪、环境监控、安全勘察和无人值守分布式传感器。
- ④ 小型分析仪器、推进和燃烧控制的集成流量系统。
- ⑤ 武器安全、保险和引信。
- ⑥ 有条件保养的嵌入式传感器和执行器。
- ⑦ 高密度、低功耗的大量数据存储器件。
- ⑧ 敌友识别系统、显示和光纤开关的集成微光学机械器件。
- ⑨ 用于飞机分布式空气动力学控制和自适应光学的主动共型表面。

美国的大学、国家实验室和公司已有大量的微机电系统研究小组,并有几种实用化的产品进入市场。如 Texas 公司已开发出的用于彩色图像投影显示的数字镜面器件 (DMD); Park 公司开发出的用于扫描隧道显微镜 (STM) 和原子显微镜 (AFM) 的微型传感器,由悬臂梁、微针尖以及信号检测和放大的集成电路组成。

欧共体为了加强各国之间的组织和合作,成立了 NEXUS (多功能微系统研究合作机构) 组织。德国在 20 世纪 80 年代中期发展的 LIGA 工艺,可用来制作高宽比大于 200 的三维立体结构,并可实现大批量生产。目前德国的 LIGA 技术处于国际领先水平,其中有代表性的是 Karlsruhe 核研究中心、微技术研究所 (IMM) 和 Microparts 公司,研究人员已在实验室里制造出了微传感器、微电机、微执行器、集成光学和微光学元件、微型流量计以及直径为数百微米的金属双联齿轮等微机械零件。

日本曾制定了纳米制造计划 (1985~1990)、埃技术计划 (1992~2001)、微型机器人计划。目前日本共有以企业为中心的 60 多个微机电系统研究组,每年举行一次微机电系统国际研讨会。而 1990 年成立微机械中心 (MMC) 和微机械学会 (MST),每年举行一次微机械展览会。

综上所述,微机电技术已经受到工业发达国家的高度重视。从微机电发展的总体水平看,许多关键技术已经突破,正处于从实验室研究走向实用化、产业化阶段。而各国在开发微机电技术时,也各有特点。德国是以采用 LIGA 技术为代表发展起来的;日本则以精密加工技术为特点;而美国则主推以集成电路加工技术为基础的硅体加工技术。

由于硅加工技术所取得的成就,目前国际上硅加工技术已成为微机电系统的技术集中在以下几点:

- ① 表面微加工技术向多层、集成化方向发展。
- ② 体微加工主要表现为键合与深刻蚀技术的组合,追求大质量块和低应力。
- ③ 表面微加工技术与体微加工技术进一步结合。
- ④ 设计手段向专用 CAD 工具方向发展。

### 1.3.2 国内的发展现状

我国的微系统研究起步并不晚,在基础研究和相关技术方面都取得了一些有特色的成果。目前我国从事微机电系统研究的单位已有 60 多个,主要集中在高校、中科院及信息产业部的研究所,所取得的主要进展如下。

① 加工技术 北京大学微电子所建立了五套比较成熟的硅基微机械加工工艺，在 ICP Lag 效应抑制、金属剥离技术及硅化物在表面微机械中的应用等单项工艺技术取得了很大的进展。目前还在进行电路与微机电器件的集成化工艺研究，并已经取得了一些初步的成果。中科院上海微系统与信息技术研究所（原中科院上海冶金所）在原有重点实验室 2 英寸硅片加工工艺线的基础上，引进了多种专用设备，具有了比较完备的加工能力。信息产业部十三所也具有比较完备的加工设备，可以进行多种类型的器件加工，其中的熔硅工艺技术在国内外领先。清华大学微电子所在原有电路工艺实验室基础上开发相关的硅基微机电系统加工工艺，其中多孔硅的制备和腐蚀技术很有特色。上海交通大学主要开展了 LIGA 及准 LIGA 加工技术研究，开发出一套 DEM（Deep etching, electroforming and microreplication）工艺，具有工艺周期短、加工成本低等特点。

② 微陀螺 清华大学研制的振动轮式陀螺，利用熔硅工艺加工，具有机械耦合小，对外界加速度灵敏度低等特点。采用的“余弦”型弹性梁可以减小振动时的非线性。中科院上海微系统与信息技术研究所研制的电容式振动陀螺可以在空气环境下取得较高的 Q 值，不需要真空封装就可以很好的工作。复旦大学研制了一种利用相位检测的压阻式振动陀螺，与一般的振幅检测陀螺相比，具有高精度，低温度系数等特点。

③ 微型加速度计 国内研制微机械加速度计的单位有北京大学微电子所、清华大学、上海冶金所、信息产业部电子第十三所、信息产业部第四十九所，哈尔滨工业大学、华北工学院等十多家单位。一些微机械加速度计样机指标见表 1-1。

表 1-1 一些微机械加速度计样机指标

| 研究单位      | 量 程       | 灵 敏 度      | 线性度    | 分辨率 | 零轴稳定性                 |
|-----------|-----------|------------|--------|-----|-----------------------|
| 北京大学      | -1~+1g    | 3V/g       | 0.391% | 1mg | $2 \times 10^{-4}$ mg |
| 清华大学      | ±10g      | >0.4V/g    |        |     |                       |
| 上海冶金所     | ±0.01~±1g | 0.05%~0.1% |        |     |                       |
| 信息产业部第十三所 | >75g      | 0.1V/g     |        | 1mg |                       |

④ 射频微机电系统（RF MEMS） 总体水平离国际先进水平尚有一定差距。北京大学微电子所在 2000 年研制平面硅谐振器和侧向微机械继电器的基础上，2001 年开发出了微机械可调电容和采用新型三明治硅梁结构的 RF 开关。清华大学研制出了基于多孔硅牺牲层技术的微电感，并制作出了微机械天线和谐振器样品。重庆大学对用多晶硅技术制作微开关的技术进行了探索，并制作出了双 C 微带天线等样品。电子第五十五所利用表面工艺研制出了在 S 波段有很好射频性能的 RF 开关。电子第十三所用硅溶片工艺研制出纵向单晶硅梁微机械开关，并对开关的动态特性和失效模式进行了研究。华东师范大学研制出了基于牺牲层工艺的毫米波移相器。

⑤ 微光机电系统（MOEMS） 国内的研究工作主要集中在面向全光传送网的 MEMS 光开关、可变光衰减器，以及微小光学仪器等方面。北京大学开展了以扭转微镜为核心结构的光开关及其阵列化的研究，已基于普通硅衬底研制出了  $2 \times 2$  光开关阵列。清华大学开展了以法布里-泊罗（F-P）微腔为核心结构的光开关、运用材料应力参与驱动的光开关、可变光衰减器等研究。上海冶金所开展了以上下垂直滑动微镜为核心结构的光开关及其阵列的研究。信息产业部电子第十三所开展了以水平滑动微镜为核心结构的光开关的研究。上海交通大学开展了基于非硅及硅材料的以电磁驱动微镜为核心结构的光衰减器的研究。重庆大学光电工程系开展了基于微机电系统的微光谱仪的研究。