

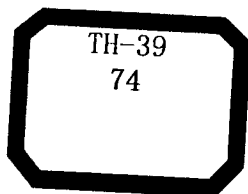
光机电一体化技术丛书

微光机电系统 (MOEMS)

张文栋 熊继军 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





光机电一体化技术丛书

微光机电系统 (MOEMS)

张文栋 熊继军 编著



机械工业出版社

本书介绍了微光机电系统 (Micro-Optical-Electro-Mechanical System, MOEMS) 的国内外发展状况, 微器件的结构设计与仿真, 常用的微制造技术, 如表面工艺、体硅工艺和 LIGA 工艺, 封装技术等。本书的重点是介绍各种 MOEMS 器件, 包括微力学器件、RF 微器件、微光学器件、微流体器件以及微温度传感器和微磁场传感器等。介绍微器件时, 本书从各器件的工作原理、工艺步骤、性能指标等入手, 意在使读者更好地了解目前已经研制成功的各种微器件及微系统, 并能在实际的工程中考考虑选用。

本书可作为从事 MOEMS 技术应用和开发的工程设计人员、科技管理人员以及相关专业研究生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

微光机电系统: MOEMS/张文栋, 熊继军编著.

—北京: 机械工业出版社, 2006.6

(光机电一体化技术丛书)

ISBN 7-111-19266-4

I. 微… II. ①张…②熊… III. 微光技术—应用
—机电系统 IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 057850 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 舒 雯 版式设计: 张世琴 责任校对: 张莉娟

封面设计: 姚 毅 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006 年 8 月第 1 版 · 第 1 次印刷

169mm × 239mm · 10 印张 · 390 千字

0 001—4 000 册

定价: 28.00

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线电话 (010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

光机电一体化技术丛书编委会

主任：李科杰

委员：（按姓氏笔画排列）

王军政	刘明杰	张文栋	范宁军
罗庆生	郑 链	高学山	黄 强

丛 书 序

随着科学技术的快速发展,光机电一体化技术应运而生。光机电一体化技术是机械技术、光电技术、电子技术、自动控制技术以及计算机技术等群体技术的综合运用,光机电一体化技术涉及机械制造、交通、家电、仪器仪表、医疗、玩具娱乐等众多行业,在工业和经济发展中有着重要的地位。信息、生物、空间、海洋、新材料、新能源等高科技领域,国防装备的信息化、现代化及传统产业的改造都离不开光机电一体化技术的发展。

光机电一体化技术发展迅速,其中各项技术正从原来的技术体系分离出来,具有较强的系统特色和相对独立的研究和应用领域。由于随着微电子技术和微系统技术的发展,光机电一体化技术的应用与发展进入了一个全新的阶段。机电产品和光机电产品成为家电、医疗器材、玩具等产业的主要产品;光机电一体化技术对于工业设备改造、提高制造装备精度和效率起到了重要的作用:光机电一体化技术在航空航天、国防、智能机器人研制等凸现国家综合实力的科研领域中更是地位突出。

相比而言,目前图书市场上光机电一体化技术方面的图书还是比较少的。在机械工业出版社的组织下,由北京理工大学和中北大学(原华北工学院)的老师合作编写了这套“光机电一体化技术”丛书,较全面地介绍了国内外光机电一体化技术的发展和运用,以期能够帮助相关工程技术人员学习和更新光机电一体化技术知识,促进光机电一体化技术的发展。

“光机电一体化技术丛书”以光机电一体化领域各项技术的通用原理、具体应用和设计运用为主要内容,分《光机电一体化系统设计》、《光机电一体化系统典型实例》、《控制技术》、《感测技术》、《光机电一体化系统常用机构》、《驱动技术》、《信息识别技术》、《光机电系统仿真与虚拟试验技术》和《微光机电系统(MOEMS)》9个分册。

各分册所介绍的技术内容以先进、通用为标准精心筛选,原理介绍简练准确,具体应用注重结合工程实践经验,使用了大量的图、表和实例,注重加强光机电一体化系统的整体设计和技术协调的理念,各分册均有相应章节深入介绍本技术在系统中的应用和设计实例,以便读者更好的学习、实践和应用,帮助从事单项技术的研发人员快速适应光机电一体化系统的研究开发工作。

丛书力求文字简练、深入浅出、内容精炼、重点突出、实用性较强,目的是为光机电一体化工程实践提供指导。丛书以光机电一体化领域从事应用和科研开

发的中、高级工程技术人员为主要读者对象，也可供大专院校相关专业的学生参考。

由于作者的时间和水平有限，不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

“光机电一体化技术丛书”编委会

前 言

本书意在向广大读者介绍微光机电系统 (Micro-Optical-Electro-Mechanical-System, MOEMS) 的工艺、器件及其封装过程, 可作为工程设计人员及 MOEMS 专业方向研究生的参考书。

微光机电系统是多种学科前沿技术的高度交叉综合, 并为多种学科前沿技术的发展服务, 涉及精密机械、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、光学、力学、生物学等基础学科, 产品具有成本低、体积小、性能高、可批量制作、可与电路集成等特点。

本书的最大特点是注重工程应用性。在介绍 MOEMS 的设计技术、制造工艺时, 没有过多地介绍物理机理, 而是把重点放在具体的工程实现方法上; 在介绍 MOEMS 器件时, 着重介绍已经研制成功的微器件的工作原理、加工工艺过程和指标特性, 而没有过多地涉及微器件理论模型等方面的问题。

本书共分五章, 前三章主要使读者对 MOEMS 的概况以及设计制造, 特别是对国内现有的条件有一个基本了解; 第 4 章、第 5 章着重介绍典型的微器件和微系统。

章节具体安排如下:

第 1 章简要介绍了 MOEMS 的定义、应用和市场前景, 相关的参考文献、会议及商业介绍的主要杂志及网站。

第 2 章分析了微型化带来的“特殊”理论问题, 通过介绍一个具体设计实例使大家了解 MOEMS 的设计及工艺过程, 介绍了 MOEMS 的仿真过程及主要仿真软件的应用。

第 3 章介绍三种常用的微制造技术: 表面工艺、体硅工艺和 LIGA 工艺。

第 4 章从工作原理、工艺步骤、指标特性、与现有同类传感器的特性比较等几个方面分别介绍各类微传感器和执行器, 包括微力学器件、RF 微器件、微光学器件、微流体器件以及其他微传感与执行器件。

第 5 章从特性、原理、设计、封装以及试验结果等方面介绍了微推进系统、微惯性测量系统、微型分布式信息获取单元等几个典型的微系统。

本书编写的主要目的是为了使得读者获得微光机电系统的相关知识, 为进一步深入研究奠定基础。因此, 本书的主要读者对象是从事 MOEMS 技术应用和开发的工程设计人员、科技管理人员以及在校研究生。

最后, 非常感谢参与本书编写工作的鲍爱达老师与研究生毛海央和陈茜同

学，他们在本书稿的资料搜集、整理及校对等方面做了大量工作。清华大学的冯焱颖老师和中国电子集团第十三研究所的吕苗博士对本书提出了许多宝贵的修改意见和建议，在此表示衷心的感谢。同时，向本书所引用的论文、图表和书籍的作者致以深切的谢意。

由于编者水平有限，缺点在所难免。我们诚挚地希望专家、学者、使用本书的工程技术人员、科学管理人员和学生对本书提出意见和建议，指出存在的错误和缺点。

编 者

目 录

丛书序 前言

第 1 章 微光机电系统概述	1
1.1 微光机电系统的定义与历史	1
1.1.1 MOEMS 的定义	1
1.1.2 MOEMS 发展历史	2
1.2 MOEMS 的应用和市场前景	3
1.2.1 MOEMS 器件的特点	3
1.2.2 形成产业的几个 MOEMS 实例	3
1.2.3 MOEMS 器件的市场情况	7
1.2.4 现阶段 MOEMS 研究的主要问题	8
1.3 与 MOEMS 相关的资讯	8
1. 在线资源	8
2. 与 MOEMS 相关的会议	9
3. 参考书与论文收集	9
4. 杂志	9
参考文献	10

第 2 章 MOEMS 的设计与仿真	11
2.1 微型化带来的“特殊”理论问题	11
1. 几何结构学中的尺寸效应	12

2. 部分力的尺寸效应	12
3. 流体力学中的尺寸效应	12
4. 热传递中的尺寸效应	13
2.2 MOEMS 的设计过程	13
2.2.1 微系统设计流程	13
2.2.2 微系统设计实例	14
1. 类型选择和指标确定	15
2. 压阻式微加速度计的结构设计及工作原理	15
3. 工艺流程	18
4. 加速度计主要性能指标测量方法	18
2.3 MOEMS 的仿真及其软件	19
2.3.1 器件设计模拟的具体方法	20
1. 工艺设计	20
2. 掩膜版图设计	20
3. 结构仿真器	21
4. 材料特性数据库	21
5. 器件的模拟和优化	21
2.3.2 MOEMS CAD 软件	21
1. ARCHITECT™	22
2. DESIGNER™	22
3. ANALYZER™	22
4. INTEGRATOR™	23
参考文献	24

第 3 章 典型的微结构制造工艺	26
3.1 微电子工艺概述	26
3.1.1 光刻	26

3.1.2 刻蚀	27	4.1.1 微传感器件通常采用 的敏感原理	46
1. 湿法刻蚀	27	1. 压阻敏感原理	46
2. 干法刻蚀	28	2. 电容敏感原理	47
3.1.3 薄膜淀积	28	3. 隧道电流敏感原理	49
1. 氧化	28	4.1.2 微执行器件通常采用 的执行方式	50
2. 化学气相淀积	28	1. 静电执行方式	50
3. 蒸发	28	2. 压电执行方式	51
4. 溅射	29	3. 热执行方式	52
3.2 表面工艺	29	4. 电磁执行方式	53
3.2.1 表面工艺的工艺流程	29	4.2 微力学器件	54
3.2.2 表面工艺中的关键 工艺	30	4.2.1 微力学传感器	54
1. 制膜工艺	30	1. 微压力传感器	54
2. 牺牲层工艺	31	2. 微加速度计	70
3.2.3 标准工艺	31	3. 微陀螺仪	86
3.3 体硅工艺	34	4. 微传声器	97
3.3.1 体硅工艺的工艺流程	34	5. 微位移传感器	102
3.3.2 体硅工艺中的关键 工艺	34	4.2.2 力学执行器	103
1. 各向同性和各向异性湿 法刻蚀	34	1. 微马达	103
2. 湿法腐蚀	36	2. 微开关	108
3. 干法腐蚀	37	3. 微夹钳	111
4. 感应耦合 (ICP) 离子 刻蚀	38	4.3 RF 微器件	116
3.3.3 标准工艺	39	4.3.1 基本器件	116
3.4 LIGA 工艺	41	1. RF 微开关	116
3.4.1 LIGA 工艺流程	41	2. 微电容	130
1. 标准工艺	41	3. 微电感	141
2. 准 LIGA 工艺	42	4. 微天线	148
3.4.2 LIGA 工艺中的关键 工艺	42	4.3.2 组件	160
3.5 微制造工艺小结	44	1. 移相器	160
参考文献	44	2. 滤波器	167
		3. 谐振器	169
		4.4 微光学器件	172
		4.4.1 典型光学微传感器与 微执行器	173
		1. 红外探测器	173
		2. 数字微镜器件与数字光路 处理器	179
第 4 章 MOEMS 器件	46		
4.1 MOEMS 器件的敏感原 理和执行方式	46		

3. 栅状光阀成像系统	182
4.4.2 微光通信器件	185
1. 微光开关	185
2. 光交叉连接器	192
3. 可调光衰减器	196
4. 微机械光纤耦合器	200
4.5 微流体器件	200
4.5.1 微流体传感器	201
1. 微流量传感器	201
2. 粘度/密度传感器	203
4.5.2 微流体执行器	204
1. 微流体通道	204
2. 微阀	209
3. 微泵	214
4. 微混合器	221
5. 微喷	226
4.6 其他微传感器	228
4.6.1 微磁场传感器	228
1. 光纤弱磁场传感器	229
2. 微型磁场传感器	231
3. 微磁性组件	238
4.6.2 微温度传感器	240
参考文献	243

第5章 微系统集成	265
5.1 微封装技术	265
5.1.1 微电子封装	267
5.1.2 微系统封装	268
1. 分类	268
2. 基本技术及工艺	277
5.2 微系统集成应用实例	286
5.2.1 微推进系统	286
1. 工作原理	286
2. 国内外现状	286
3. 结构	288
5.2.2 微惯性组合	293
1. 工作原理	293
2. 国内外现状	294
3. 结构	294
5.2.3 微型分布式信息获取 单元	300
1. 工作原理	300
2. 国内外现状	300
3. 结构	302
参考文献	308

第 1 章 微光机电系统概述

1.1 微光机电系统的定义与历史

1.1.1 MOEMS 的定义^[1-2]

微型机电系统 (MEMS) 是微米/纳米技术中的一个新兴的高科技领域, 对微型机电系统的定义各个国家和地区的提法不同: 日本使用“微型机械” (micro-machine) 一词, 它是从大机器到制造小机器发展起来的; 微型电子机械系统 (micro electro-mechanical systems, MEMS) 是美国惯用词, MEMS 侧重于用集成电路可兼容技术加工元器件, 把微电子和微机械集成在一起; 欧洲把微系统 (micro systems, MST) 定义为一种智能的微小系统, 它具有传感、信号处理和/或致动功能, 通常组合了两个或多个电、机、光、化学、生物、磁或其他特性的微型元器件, 集成为一个或多个混合芯片。这些名词虽不相同, 但实际上指的是同一领域。国际电技术委员会 (International Electro technical Commission) 的定义强调了这种共性: “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, 并适于以低成本大量生产。” 有人通称 MEMS/MST/Micromachine 技术为 M^3 技术。

随着微光学、微光器件以及微光机电一体化集成技术的发展, 人们在 MEMS 中加了一个“O”, 将微光机电一体化系统称为微光机电系统 Micro-Optical-Electro-Mechanical System, 简称 MOEMS。从发展历程来看 MOEMS 是比 MEMS 定义更为广泛的一个名词, 简略起见, 本书一律称其为 MOEMS。

MOEMS 将电子系统和外部世界联系起来, 它不仅可以感受运动、声、热、磁等自然信号, 将这些信号转换成电子系统可以识别的电信号, 而且还可以通过电子系统控制这些信号。对 MOEMS 的深入研究将涉及电子、机械、材料、信息、物理学、化学及生物等多种工程技术和科学, 其研究内容主要包括基础理论、结构设计、材料、制作工艺、微型传感和执行元件、测试技术、微操作与控制技术、宏/微接口和通信技术、能源供给、系统集成以及应用研究等方方面面。MOEMS 在航天、航空、汽车工业、生物学、医学、信息通信、环境监控、军事以及日常用品等领域都有十分广阔的应用前景^[3]。图 1-1 所示为微系统模型图。

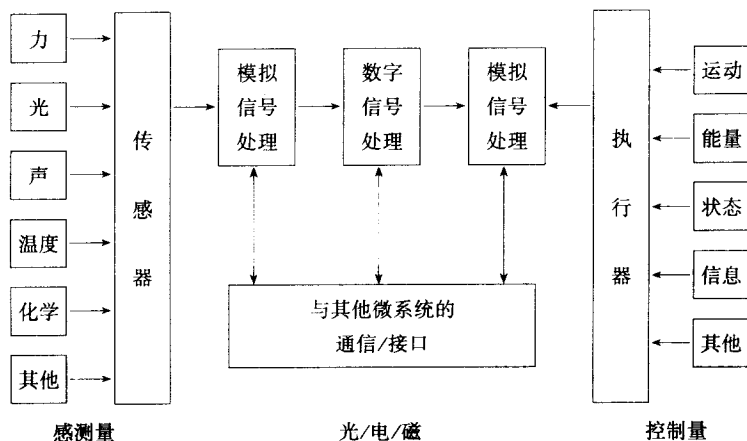


图 1-1 微系统模型图

1.1.2 MOEMS 发展历史

1959 年, Richard P Feynman (1965 年诺贝尔物理奖获得者) 就提出了微型机械的设想^[4]。1962 年硅微型压力传感器问世, 其后开发出尺寸为 $50 \sim 500\mu\text{m}$ 的齿轮、齿轮泵、气动涡轮及联接件等微系统。1965 年, 斯坦福大学研制出硅脑电极探针, 后来又在扫描隧道显微镜、微型传感器方面取得成功。1966 至 1972 年间基本的微加工技术得到了快速发展, 并制造出微机械元件。1988 年美国加州大学伯克利分校研制出转子直径为 $60 \sim 12\mu\text{m}$ 的硅微型静电机, 显示出利用硅微加工工艺制造小可动结构并与集成电路兼容以制造微小系统的潜力^[5]。

MOEMS 技术是伴随着 MEMS 技术和微光学技术的发展而发展起来的, MOEMS 技术的起源追溯到 20 世纪 60 年代科学家对薄膜现象以及波导的研究。1969 年, Milier 就已经提出了“集成光学”的概念, 但由于当时微光学、微电子和微型机械技术, 特别是硅微加工技术的限制, 集成光学的研究没有大的进展。80 年代中期, 微系统技术的迅猛发展, 硅微加工新技术不断涌现, 尤其是利用牺牲层腐蚀技术实现了微可动结构, 为微光机电系统技术的发展打下了坚实的基础。MOEMS 器件将成为未来社会众多领域的核心器件, 鉴于 MOEMS 技术的重要经济潜力和战略性地位, 美国、日本、欧洲的工业发达国家到韩国、新加坡等新兴工业国家, 乃至中国台湾地区, 都认识到发展 MOEMS 对国际竞争的重要意义, 把 MOEMS 与电子信息、航天航空等并列为战略高科技对待^[6], 目前 MOEMS 技术已经进入全面发展阶段。

MOEMS 技术的迅速崛起及其所显示的巨大潜力同样引起我国政府的高度重视, 我国也积极开展相关研究工作。中科院上海微系统所开展了直径为 $400\mu\text{m}$

的多晶硅齿轮和气动涡轮以及微静电电机的研制工作。清华大学精密仪器系试制了多晶硅梁、微流泵与阀、微弹簧等微器件,其热致动微型泵外形尺寸为 $9\text{mm} \times 6\text{mm} \times 1\text{mm}$,输出流量可达 $40\mu\text{L}/\text{min}$ 。长春光机所在微测试技术的研究方面取得了一定的进展。哈尔滨工业大学研制出电致伸缩陶瓷驱动的二自由度微小型机器人,位移范围为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。我国的整体形势是面上正逐渐铺开,深度也逐步深入,但总体起步晚,由于技术基础和资金支持等问题,在研究规模、技术水平上与先进国家相比尚有较大差距。

1.2 MOEMS 的应用和市场前景

1.2.1 MOEMS 器件的特点

MOEMS 器件具有以下优点^[7,8]。

微型化: MOEMS 器件尺寸小、重量轻,因此具有功耗低、惯性小、响应时间短等特点。

材料性能好: 以硅为主要材料,机械电器性能优良;价格低廉,可以批量生产,在关键的性能指标方面,如微光器件的插入损耗、波长平坦度和串扰,MOEMS 技术可达到其他技术所能达到的最高性能;MOEMS 技术可以在极小的晶片上排列大规模矩阵,其响应速度和可靠性也大大提高。

规模化: MOEMS 器件最重要的特征在于利用半导体工艺实现微电子机械系统的大批量生产。硅基 MOEMS 器件可以采用与集成电路制造几乎相同的工艺,批量化制造大量性能一致的微器件,达到规模效应。

集成化: 微系统可以将微传感器、微执行器以及后续调理电路芯片集成在一个芯片上,从而提高功能密度。

低成本: 由于具有以上特性,MOEMS 器件为降低系统成本提供了多种可能。如,MOEMS 芯片的良好性能使得更低成本的网络设置和架构以及光纤层的保护成为可能。MOEMS 尺寸小和功耗低的特性使得系统的外形可以缩小,节省了系统需要占用的面积。而单对器件而言,MOEMS 器件的单批产量很高,经济性好,而且器件与器件之间重复性好,故器件价格较低,进一步降低了系统成本。

1.2.2 形成产业的几个 MOEMS 实例

微光机电系统经过几十年的发展,已成为世界瞩目的重大科技领域之一。目前,全世界有大约 600 家单位从事 MOEMS 的研制和生产工作,已研制出包括微压力传感器、微加速度计、微喷墨打印头、数字微镜显示器在内的几百种产品。下面将分别对已经形成产业的四类器件加以介绍。

(1) 压力传感器。微压力传感器是最早开始研制的 MOEMS 产品,也是 MOEMS 技术中最成熟、最早开始产业化的产品。按敏感原理分,主要有压阻式和电容式微压力传感器。目前,压阻式微压力传感器的精度可达 $0.05\% \sim 0.01\%$,年稳定性达 $0.1\%/F.S.$,温度误差为 $2 \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}$,耐压可达几百兆帕,过压保护范围可达传感器量程的 20 倍以上,并能进行大范围的全温补偿。

日本富士公司和美国的罗斯蒙特公司等,都已经将电容微压力传感器商品化,并且逐步将金属电容传感器淘汰。新一代的电容微压力传感器在精度和长期稳定性等方面都有了很大提高,精度可达 $0.1\% \sim 0.075\%$,传感器在几年的使用时间里免维护,这些特点都是前一代传感器无法比拟的。

微谐振式压力传感器是目前的一个研究热点,它除了具有普通微传感器的优点外,还具有准数字信号输出,抗干扰能力强,分辨率和测量精度高的优点。电热激励/压敏电阻拾振的微谐振式压力传感器价格低廉,与工业 IC 技术兼容,可将敏感元件与信号调理电路集成在一块芯片上,具有诱人的应用前景。目前国内主要有中科院电子所、北京航空航天大学 and 西安交通大学从事这方面的研究,精度可达到 0.37% 。

(2) 微加速度计。微加速度计是微系统技术的重点应用之一,是微型惯性测量组合的关键基础元件^[9],其研究与开发始于 20 世纪 80 年代初,并伴随着汽车安全气囊系统日趋普及而高速增长。微加速度计与传统器件相比具有体积小、成本低、集成化等特点,是国内外多年攻关的重点,由于其性能逐年提高,价格逐年降低,正在继续广泛应用于军民两用高技术领域,如汽车、海陆空的弹药和武器装备系统。

国外在微加速度计的研究方面起步较早,并已取得一定成绩。1979 年 Roylance 和 Angell 就开始了压阻式微加速度计的研制,其样品技术指标为:满量程范围为 $\pm 200g$,灵敏度为 $50\mu\text{V}/(g \cdot V_{\text{supply}})$,偏轴灵敏度为 10% ,压阻效应的温度稳定系数为 $0.2 \sim 0.3\%/^{\circ}\text{C}$ (即灵敏度对温度的变化值),谐振频率为 2330Hz 。随后各种结构的压阻式微加速度计相继出现,并且增加了自检功能和集成 CMOS 电路,测量方面也从单轴逐渐向多轴集成测量发展,其测量范围为 $1g \sim \pm 1000g$,精度为 $0.1\% \sim 2\%$ 。经过 20 年的研究和开发,压阻式微加速度计的设计已经形成了一套比较成熟的理论体系,它具有加工工艺简单、测量方法易行、线性度好等优点,是最早商业化的一种微加速度计,已经于 20 世纪 80 年代末得到了广泛应用。

电容式微加速度计的研制最早出现于 1991 年, Cole 采用表面微加工工艺制作出扭转差分电容结构,配用分立检测电路,陶瓷封装。其敏感部分的加工方法主要有硅外延生长和浅硼扩散,随后出现了可以达到航海级(μg 灵敏度)的微加速度计。

在 MOEMS 器件的应用及商业化领域,美国、德国和日本等国家走在了世界的前列。美国 AD 公司、美国加州大学伯克利分校 (UCB)、德国 Dresden 大学、日本 Toyohashi (丰桥) 大学等开展了各种原理、结构微加速度计的应用研究。最成功的是美国 AD 公司的 ADXL-05 和 ADXL-50 系列单片集成差动电容式微加速度计,目前月产量达到 200 万只,年产值超过 2 亿美元。美国摩托罗拉公司批量生产用于汽车的 MMAS40G 电容式微加速度计,选择双芯片设计制作技术,封装采用双列直插式或单列直插式塑封,加速度测量范围为 $\pm 40g$ 。美国 EG&G IC 传感器公司先后开发成功 3255、3000 系列压阻式微加速度计,3255 型主要用于汽车安全系统,敏感芯片与信号处理芯片封装在表面贴装的外壳内。德国博世、日本电装公司也有类似产品^[10]。

我国从 1992 年开始致力于微加速度计的研究。清华大学、北京大学、东南大学、中国电子科技集团十三所、中科院上海微系统所、中国工程物理研究院电子五所、重庆大学等单位均开展了各种结构微加速度计的研究,并取得了一些阶段性成果。

清华大学微电子所开发了谐振式微加速度计,采用电阻热激励、压阻电桥检测的方式,其敏感结构为高度对称的四角支撑质量块形式,在质量块四边与支撑框架之间制作了四个谐振梁用于信号检测。西安电子科技大学的主要研究对象为压阻式微加速度计。重庆大学则致力于具有自身特色的真空微电子加速度计和二维微加速度计的探索研究。

中科院成功研制了先进引信用高性能冲击微加速度计、多量程高性能微加速度计、高性能微谐振式角速度陀螺仪,发展传感器模块先进集成、封装及组装技术和高性能惯性传感器设计和制作技术,提供专用高性能微器件等作为战略重点。

(3) 微喷。基于 MOEMS 技术的微喷已成为 MOEMS 领域的一种典型器件,它的应用涉及科学仪器、工业控制以及生物医疗等多个领域,目前主要的应用方向有喷墨打印、芯片冷却、气流控制以及微推进系统等,应用于药物雾化供给的微喷研究也正在兴起。

当前,在基于 MOEMS 的微喷系统研究中已进入实用化的产品就是喷墨打印机的喷墨打印头,现今已成年产值数亿美元的市场,而且还在不断扩大。根据 MST news 的统计,2003 年在微光机电系统的相关产品中,喷墨头的需求已增加至 100 亿美元;ITIS 的统计数字显示 2001 年全球墨盒需求量约为 9.71 亿颗,2002 年已达 11.15 亿颗,其年增长率为 14.08%。在 2003 年随着数字打印的需求日渐普及,墨水匣需求量增长至 12.54 亿颗,约有 11.08% 的增长幅度。电阻电热驱动的热气泡式喷墨打印头结构与基本原理如图 1-2 所示。该喷墨打印头由德国柏林技术大学研制,在有 50 个孔的小阵列微喷孔管道一侧采用微工艺制造出多晶

硅加热电阻，阻值为 $30 \sim 100\Omega$ ，当给电阻在极短的时间内 ($2 \sim 5\mu\text{s}$) 通以适当幅值的电压 (60V) 时，微管道内的墨水将急剧汽化形成气泡，将气泡前端的墨滴高速推出微管道，打印在纸上。微喷孔的直径为几十微米，通过适当的设计，可以单独控制每个微喷孔，单个微管道中墨滴的喷射频率最高可达 6kHz 。

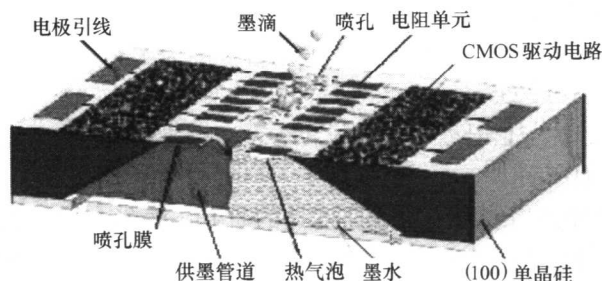


图 1-2 电阻电热驱动的热气泡式喷墨打印头

(4) 数字微镜器件。与传统的 CRT 和 LCD 投影显示技术相比，MOEMS 技术的投影显示有许多优点。首先，它能够提供足够的亮度，同时它在均匀性和稳定性上也有很大的提高。该类投影仪的基本设计方案有两种，即反射显示和衍射显示。反射显示的代表产品是美国德州仪器设计的数字驱动微镜阵列芯片 (DMD, Digital Micromirror Device)，它实际上是反射式微光开关阵列。一个大规模的两维铝微镜阵列被做在集成电路上，同时还包含驱动电路，以及通过静电力倾斜微镜到任意位置的电极。反射微镜下面的支撑机构中，微镜通过支撑柱和扭转梁悬于基片上，每一个微镜对应图像的一个像素，一个微镜的尺寸仅为 $16\mu\text{m} \times 16\mu\text{m}$ 。DMD 是一种非常可靠的 MOEMS 设备，它可以承受 $1500g$ 的机械打击， $20g$ 的振动测验，设备的使用寿命超过了 $1\,000\,000$ 小时。图 1-3 所示是一块完整的 DMD 半导体芯片，它的镜面是由 130 万个微反射镜组成的长方形阵列，每个微镜对应于投影画面中的一个光学像素。

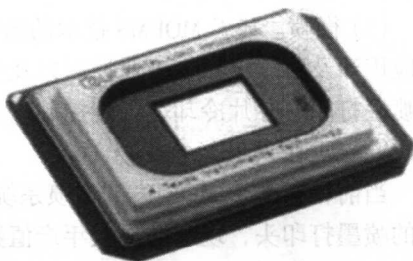


图 1-3 0.55inSVGA 分辨率的 DMD

衍射显示的代表产品是 Silicon Light Machines (SLM) 公司的光栅光阀 (GLV, grating light valve)，它采用平行的长直光阀控制高低不同的位置造成光程差，产生光的干涉而形成明暗不同的区域。首先设计一个一维阵列，然后利用镜面旋转扫描成二维画面。