

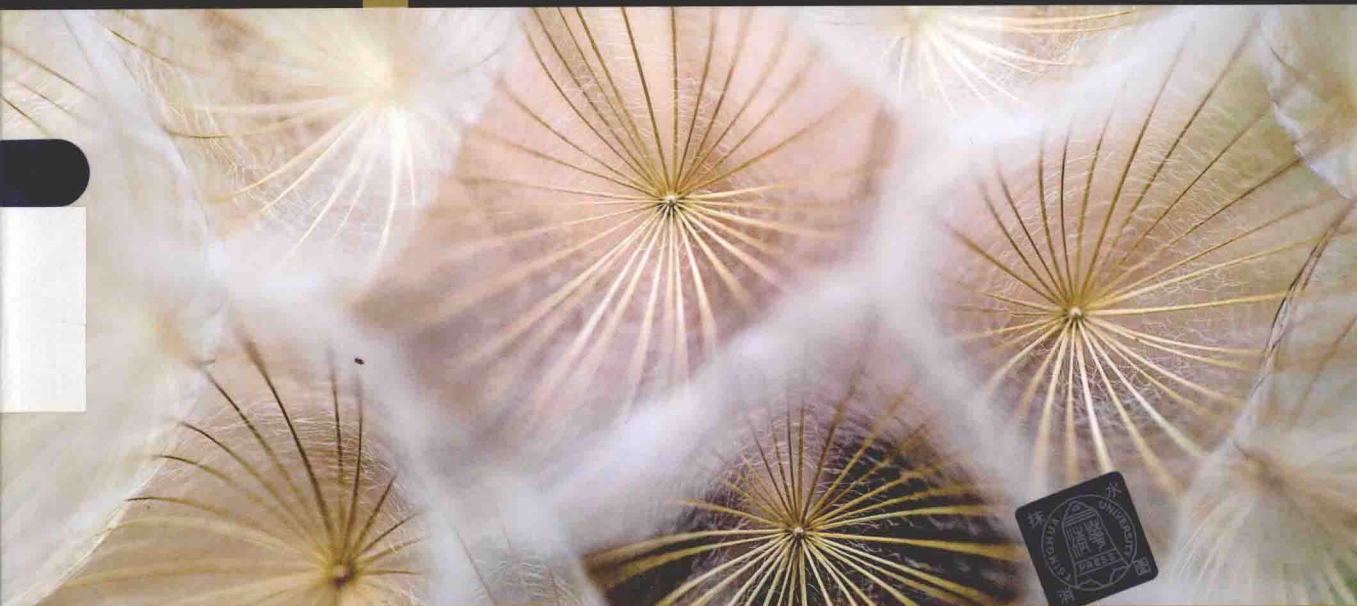
信息、控制与系统技术丛书

MS

Microsystem Design and Fabrication
2nd

微系统设计 与制造 第2版

王喆焱 编著



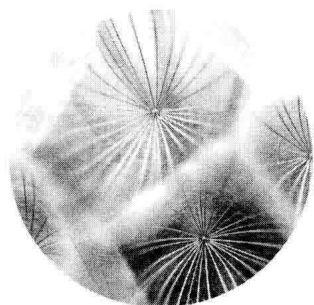
清华大学出版社



Microsystem Design and Fabrication 2nd

微系统设计 与制造 第2版

王喆卉 编著



清华大学出版社

内 容 简 介

本书结合微系统(MEMS)技术的基础理论、典型器件和发展趋势,介绍微系统的力学、电学和物理学基本理论,针对典型器件的分析设计方法和制造技术,以及多个前沿应用领域,力争成为具有一定深度和广度的MEMS领域的教材和实用参考书。主要内容包括:微系统基本理论、制造技术、微型传感器、微型执行器、RF MEMS、光学MEMS、BioMEMS,以及微流体和芯片实验室。本书强调设计与制造相结合、基础与前沿相结合,在基础理论和制造技术的基础上,深入介绍多种典型和量产MEMS器件的设计和制造方法,以及重点和前沿应用研究领域的发展。本书可供高等院校电子、微电子、微机电系统、测控技术与仪器、精密仪器、机械工程、控制工程等专业的低年级本科生、研究生和教师使用,也可供相关领域的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

微系统设计与制造/王喆垚编著.--2版.--北京:清华大学出版社,2015

信息、控制与系统技术丛书

ISBN 978-7-302-39167-8

I. ①微… II. ①王… III. ①微电子技术—设计 ②微电子技术—制造 IV. ①TN40

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第017993号

责任编辑:文怡

封面设计:李召霞

责任校对:白蕾

责任印制:宋林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载:<http://www.tup.com.cn>,010-62795954

印刷者:清华大学印刷厂

装订者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:47.25 字 数:1180千字

版 次:2008年2月第1版 2015年10月第2版 印 次:2015年10月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:98.00元

产品编号:055169-01

第 2 版 前 言

Preface

本书自 2008 年出版以来,正值 MEMS 历史上发展最快的时期。以智能手机和汽车为代表的应用领域拉动 MEMS 高速发展,全球 MEMS 产品的产值从 2008 年的 55 亿美元迅速增长到 2013 年的 124 亿美元,预计到 2018 年全球 MEMS 芯片供货将超过 235 亿颗,产值将达到 225 亿美元。作为智能手机和平板电脑等产品的主要制造国,国内消耗了全球 25% 以上的 MEMS 产品,巨大的市场和技术进步也推动国内 MEMS 产业开始初现端倪。传统 MEMS 器件日趋成熟,多种 MEMS 产品先后推向市场,学术研究向纳米、生物和多学科融合的方向发展,而产业界向集成、低成本、小体积和多功能的方向发展。

本书第二版仍定位为具有一定深度和广度的微系统专业教材,着重提取基础、重点和共性知识,强调基础理论和制造方法在不同领域的应用,并紧密结合前沿的学术研究和工业界的产品发展动态。本书第二版仍旧保持了第一版的结构,并且进一步强调设计与制造相结合、前沿与基础相结合,在补充和增强实际 MEMS 产品的同时,尝试提取共性知识作为基本学习内容,并且增强了结构设计、制造工艺、圆片级真空封装、噪声等 MEMS 器件开发过程中的主要环节。

针对本书的定位和 MEMS 领域的发展趋势,第二版做出以下的修订和调整:①补充更多产品分析实例。考虑到量产产品在结构、制造和可靠性方面的优点,补充了部分量产压力传感器、加速度传感器、陀螺、麦克风、谐振器等产品作为 MEMS 器件的举例,有助于全面和深入理解 MEMS 的技术特征和发展状况,并使本书的实例和前沿内容更加丰富。②增添了新技术内容。根据近年 MEMS 产品和技术的发展趋势,第二版中增加了微悬臂梁传感器、圆片级真空封装、键合、三维集成以及深刻蚀等内容,并增加了传感器噪声等重要的基础内容。③增加了习题。在主要章节增加了习题,使本书更适合作为教材使用。④大幅删减了基础内容。由于篇幅的限制,第二版删除了第一版关于基础力学和半导体工艺的内容,并删除了一些举例。⑤修订第一版的一些错误。

本书第一版出版以来,有幸被近十所院校采用为 MEMS 课程的教材,部

分授课教师对本书提出了一些建议,一些热心的读者和清华大学的学生相继指出了第一版中存在的一些错误,作者在此深表谢意。正是这些读者的支持,使编者有动力花费大量的时间去完善出版本书的第二版。编者还要感谢清华大学微电子所的领导同事、国内 MEMS 领域的同仁,以及清华大学出版社的文怡编辑,他们对本书的出版给予了大力的支持。

由于编者的水平、知识背景和研究方向的限制,书中难免存在错误和遗漏之处,恳请各位读者、专家和 MEMS 领域的研究人员不吝指正。

王喆焱

2015年6月于清华大学

电子邮件: z.wang@tsinghua.edu.cn

第 1 版前言

Preface

微型化是当今科学技术的重要发展方向。实现微型化和利用微型化的重要途径之一是利用微系统技术。微系统(也称微电子机械系统, MEMS)起源于集成电路制造技术,通过在芯片上集成制造微机械、微结构、微传感器、微执行器、信号控制处理电路等功能器件和单元,实现测量、驱动、能量转换等多种功能。微系统的出现使芯片远远超越了以处理电信号为目的的集成电路,将其功能拓展到机、光、热、电、化学和生物等领域。广义地讲,集成电路是电子线路系统的微型化,而其他领域的微型化都可以划分在微系统的范畴。

微系统具有微型化、集成化、智能化等特点,与宏观系统相比,能够大批量生产,成本低、性能高,甚至能够实现宏观系统所无法实现的功能,符合并促进了科学技术的发展方向,因此已经广泛应用于仪器测量、无线和光通信、能源环境、生物医学、军事国防、航空航天、汽车电子以及消费电子等多个领域,已经并将继续对人类的科学技术和工业生产产生深远的影响。

微系统是一门多学科高度交叉的前沿学科领域,其设计、制造和应用广泛涉及物理学、化学、力学、电子学、光学、生物医学和控制工程等多个学科。由于微系统涉及内容广泛,大量借用了相关学科的基础理论,因此微系统本身的理论体系不够系统。尽管微系统已经发展出自己相对独立的设计和制造方法,但是从严格意义上讲,微系统领域纷繁复杂以至于它本身不是一个真正独立的学科,而是一个开放式的系统。这些特点为学习、研究和应用微系统带来了困难。尽管如此,微系统仍旧具有一些重要的共性基础知识,通过掌握这些基础知识,可以逐渐深入地掌握微系统的内容。

本书的目的是尝试提供一本具有一定深度和广度的微系统专业教材,探索高度交叉学科领域的人才培养方式。针对微系统领域的特点,本书着重提取基础的、重点的和共性的问题,强调基础理论和制造方法在不同领域的应用。通过基础知识和重要、前沿发展方向的多种典型器件的介绍,掌握微系统的相关基础理论、分析设计方法和制造技术,并了解微系统在多个领域的应用。本书共分为 9 章,主要内容概括如下。

第 1 章 微系统概述。介绍微系统的概念、历史、特点,微系统与集成电路的关系,微系统的设计和制造方法概论等内容。

第 2 章 微系统力学基础。主要介绍微系统设计中常用的弹性力学、动

力学、流体力学等基本知识,以及多种常用结构的力学分析方法。

第3章 微系统制造技术。介绍用于微系统制造的集成电路工艺基础、表面微加工技术、体微加工技术,以及特殊微加工技术,并介绍制造过程中的基本物理、化学、力学等问题。

第4章 微型传感器。介绍物理传感器的主要敏感原理、分析设计和制造方法,以及如何利用力学、电学等基础理论与敏感机理相结合来分析、设计微型物理传感器。

第5章 微型执行器。主要介绍静电、电磁、压电、电热等执行器的基本原理、结构和制造方法,重点介绍微型执行器的分析、设计方法。

第6章 射频微系统(RF MEMS)。介绍微系统在无线通信领域的应用,包括开关、谐振器、可调电容、三维电感等器件和滤波器、压控振荡器等电路,以及设计和 IC 集成制造方法,重点是将电学、力学和动力学应用于 RF MEMS 器件的分析设计。

第7章 光学微系统(MOEMS)。介绍微系统在光通信和显示器件领域的应用,包括微镜和二维、三维光开关等,重点阐述微镜的分析、设计与制造,以及力学、电学和光学在 MOEMS 中的应用。

第8章 生物医学微系统(BioMEMS)。介绍微系统在药物释放、组织工程、临床诊断和治疗、神经探针等生物医学领域的应用,结合流体力学和静力学分析设计药物释放微针等。

第9章 微流体与芯片实验室。介绍微流体器件的软光刻制造工艺,阐述生化分析中驱动、混合、分离、检测等功能的芯片实现方法,介绍芯片实验室在 DNA、细胞和蛋白分析中的应用。

本书强调两个方面的结合。一是设计与制造相结合。微系统的设计强烈依赖于制造工艺,在对制造工艺深入了解和实践以前,任何一个简单的器件都难以设计、优化并通过制造实现。因此本书在以基础理论为重点的同时,深入介绍微系统制造工艺和典型器件的制造方法。二是前沿与基础相结合。共性的基础理论和制造技术是微系统的基础,将设计和制造等基础应用于实际问题是最终目的,因此全书贯穿多个典型实例的分析、设计和制造方法。微系统仍处于高速发展阶段,本书较为全面地介绍微系统的重点和前沿领域,力争展示微系统的全貌。

本书可供高等院校电子、微电子、微机电系统、测控技术与仪器、精密仪器、机械工程、控制工程等专业的低年级本科生、研究生和教师使用,也可供相关领域的工程技术人员参考。本书曾在清华大学微纳电子学系和电子工程系作为本科生高年级课程“微系统设计与制造”的讲义,在出版时作了适当的删节和修改。由于本书内容较多,建议教师选择部分内容讲授,剩余内容可以作为学生的课外阅读材料。

本书的出版得到了很多人的帮助,清华大学微电子所李志坚院士、刘理天教授、伍晓明博士、方华军博士,清华大学精密仪器系董永贵教授等为本书提出了很多建设性的意见。作者还要感谢试用本书的学生和我的研究生,特别是庄志伟和周有铮,他们为本书的插图做了大量的工作,并提出了很多修改意见。作者还要感谢清华大学出版社的田志明和王一玲为本书出版所做出的努力。

由于作者的水平、知识背景和研究方向的限制,书中错误和遗漏之处,恳请各位读者、专家和 MEMS 领域的研究人员不吝指正。

王喆焱

2007年8月于清华大学

电子邮件: z. wang@tsinghua. edu. cn

目 录

Contents

第 1 章 微系统概述	1
1.1 微系统的概念	1
1.2 微系统的特点	4
1.2.1 MEMS 的典型特点	4
1.2.2 尺寸效应	6
1.3 MEMS 的实现	7
1.3.1 MEMS 设计	7
1.3.2 建模、模拟与数值计算	8
1.3.3 MEMS 制造	10
1.4 微系统的历史、发展与产业状况	12
1.4.1 历史	13
1.4.2 产业状况	16
1.4.3 发展趋势	22
参考文献	26
本章习题	27
第 2 章 力学基础	29
2.1 材料的基本常数	29
2.1.1 硅的弹性模量	29
2.1.2 热学参数	31
2.2 弹性梁	31
2.2.1 梁的基本方程	31
2.2.2 悬臂梁	33
2.2.3 双端支承梁	35
2.2.4 折线弹性支承梁	37
2.3 薄板结构	40
2.3.1 矩形薄板	40
2.3.2 圆形薄板	44

2.3.3 动力学——瑞利法	44
2.4 流体力学	45
2.4.1 流体力学基本概念	45
2.4.2 流体阻尼	49
参考文献	57
本章习题	59

第3章 微系统制造技术	60
3.1 MEMS 常用材料及光刻技术	60
3.1.1 MEMS 常用材料	61
3.1.2 MEMS 光刻	64
3.2 体微加工技术	67
3.2.1 湿法刻蚀	67
3.2.2 干法深刻蚀	76
3.3 表面微加工技术	95
3.3.1 表面微加工	95
3.3.2 薄膜的残余应力	102
3.3.3 表面微加工的应用和发展	108
3.4 键合	111
3.4.1 键合原理	111
3.4.2 键合对准方法	115
3.4.3 直接键合	121
3.4.4 阳极键合	126
3.4.5 金属中间层键合	128
3.4.6 高分子键合	135
3.5 高深宽比结构与工艺集成	140
3.5.1 高深宽比结构的制造方法	140
3.5.2 工艺集成	148
3.5.3 MEMS 代工制造	149
3.6 MEMS 与 CMOS 的集成技术	151
3.6.1 单片集成技术	152
3.6.2 三维集成技术	161
3.7 MEMS 封装技术	180
3.7.1 MEMS 封装	180
3.7.2 三维圆片级真空封装	184
参考文献	195
本章习题	202

第 4 章 微型传感器	205
4.1 微型传感器的敏感机理	205
4.1.1 压阻式传感器	206
4.1.2 电容式传感器	211
4.1.3 压电式传感器	214
4.1.4 谐振式传感器	217
4.1.5 隧穿效应	219
4.2 压力传感器	220
4.2.1 压力传感器的建模	221
4.2.2 压阻式压力传感器	222
4.2.3 电容式压力传感器	229
4.2.4 谐振式压力传感器	233
4.3 麦克风	237
4.3.1 麦克风的建模	238
4.3.2 电容式麦克风	240
4.3.3 集成麦克风	248
4.4 加速度传感器	250
4.4.1 加速度传感器的模型	251
4.4.2 加速度传感器的结构与测量原理	254
4.4.3 三轴加速度传感器	268
4.4.4 加速度传感器的制造	270
4.5 微机械陀螺	274
4.5.1 谐振式陀螺的原理	275
4.5.2 微机械陀螺的结构与工作模式	281
4.5.3 陀螺的微加工技术	300
4.6 微型悬臂梁传感器	304
4.6.1 微型悬臂梁传感器的敏感机理	305
4.6.2 压阻式微型悬臂梁传感器的模型	308
4.6.3 微型悬臂梁传感器的制造方法	312
4.6.4 微型悬臂梁传感器的应用	313
4.7 传感器噪声	318
4.7.1 噪声的来源	318
4.7.2 电学噪声	319
4.7.3 热力学噪声	323
4.7.4 MEMS 传感器噪声	326
参考文献	333
本章习题	343

第5章 微型执行器	345
5.1 静电执行器	347
5.1.1 平板电容执行器	347
5.1.2 梳状叉指电极执行器	356
5.1.3 静电马达	362
5.1.4 直线步进执行器	363
5.2 压电执行器	367
5.2.1 线性压电执行器	368
5.2.2 弯曲压电执行器	369
5.3 磁执行器	373
5.3.1 微型磁执行器的力和能量	374
5.3.2 线性执行器	375
5.3.3 扭转执行器	378
5.4 电热执行器	379
5.4.1 一维热传导模型	380
5.4.2 V形执行器	381
5.4.3 双膜片执行器	383
5.4.4 冷热臂执行器	384
5.4.5 热气驱动	385
5.5 微泵	386
5.5.1 往复位移微泵	387
5.5.2 蠕动微泵	392
5.5.3 其他微泵	393
参考文献	394
本章习题	399
第6章 射频 MEMS	401
6.1 RF MEMS 概述	401
6.1.1 RF MEMS 器件	401
6.1.2 基于 RF MEMS 的收发器前端结构	403
6.2 MEMS 开关	404
6.2.1 开关的类型	405
6.2.2 MEMS 开关的静态特性	410
6.2.3 开关的动态特性	414
6.2.4 开关的电磁特性	415
6.2.5 MEMS 开关的制造	417
6.3 微机械谐振器	420
6.3.1 振动模式及静电换能器	421
6.3.2 弯曲振动模式谐振器	427
6.3.3 体振动模式	446

6.3.4	厚度剪切振动模式	456
6.3.5	MEMS 谐振器的制造	462
6.4	基于谐振器的信号处理器	464
6.4.1	低损耗窄带 HF 和 MF 滤波器	464
6.4.2	混频滤波器	467
6.4.3	本机振荡器	472
6.5	可调电容、电感与压控振荡器	473
6.5.1	可调电容	473
6.5.2	电感	478
6.5.3	压控振荡器	483
	参考文献	484
	本章习题	490
第 7 章	光学 MEMS	491
7.1	MEMS 微镜	492
7.1.1	MEMS 材料与结构的光学性质	492
7.1.2	MEMS 微镜的设计	494
7.1.3	微镜的制造	508
7.1.4	微镜的驱动与控制	514
7.2	光通信器件	519
7.2.1	MEMS 光开关	519
7.2.2	可变光学衰减器	536
7.3	显示器件	544
7.3.1	反射微镜 DMD	545
7.3.2	光栅光阀 GLV	550
7.3.3	其他 MEMS 显示器件	555
7.4	其他光学 MEMS 器件	560
7.4.1	自适应光学可变形微镜	560
7.4.2	光学平台扫描微镜	562
7.4.3	菲涅耳微透镜	564
7.4.4	可调激光器	564
	参考文献	569
第 8 章	生物医学 MEMS	575
8.1	药物释放	577
8.1.1	生物胶囊和微粒	578
8.1.2	微针	584
8.1.3	可植入主动药物释放	598
8.2	生物医学传感器	600
8.2.1	医学平台传感器	600

8.2.2	个人及可穿戴传感器	601
8.2.3	可植入传感器	603
8.3	执行器	608
8.4	神经微电极与探针	609
8.4.1	高密度神经探针阵列	610
8.4.2	无线接口可植入神经探针	613
8.5	组织工程	614
8.5.1	支架制备	615
8.5.2	细胞培养	616
8.5.3	细胞图形化和培养	617
8.6	细胞与分子操作	620
	参考文献	622
第9章	微流体与芯片实验室	629
9.1	概述	629
9.1.1	LOC的发展历史	629
9.1.2	LOC的特点	631
9.1.3	微流体的特性	633
9.2	软光刻技术	634
9.2.1	软光刻与高分子聚合物	635
9.2.2	软光刻母版和弹性印章	637
9.2.3	软光刻图形复制	639
9.2.4	软光刻制造微流体管道	647
9.3	微流体的驱动与运输	651
9.3.1	机械驱动	651
9.3.2	电动力驱动	655
9.4	LOC与微流体的基本操作	664
9.4.1	试样预处理	664
9.4.2	混合	669
9.4.3	分离	679
9.4.4	DNA放大——PCR	701
9.4.5	集成试样处理系统	703
9.5	检测技术	704
9.5.1	光学检测	705
9.5.2	电化学检测	708
9.5.3	质谱检测	715
9.6	LOC的应用	716
9.6.1	细胞生物学及干细胞工程	716
9.6.2	微流体DNA芯片	721
9.6.3	蛋白质分析	729
	参考文献	731

第 1 章 微系统概述

微系统(Microsystems)也称微电子机械系统(Microelectromechanical Systems, MEMS)或微机械(Micromachines),是利用集成电路(Integrated Circuits, IC)制造技术和微加工技术(Micromachining 或 Microfabrication)把微结构、微传感器、微执行器、控制处理电路,甚至接口电路、通信电路和电源等制造在一块或多块芯片上的微型集成系统。微系统的出现使芯片的概念远远超越了以处理电信号为目的的集成电路,其功能拓展到机、光、热、电、化学、生物等领域。广义地讲,集成电路是电子线路系统的微型化,而其他领域的微型化都可以划分在微系统的范畴。

微系统具有微型化、集成化、智能化、成本低、性能高、可以大批量生产等优点,已经广泛应用于仪器测量、无线通信、能源环境、生物医学、军事国防、航空航天、汽车电子以及消费电子等多个领域,并将继续对人类的科学技术、工业生产、军事国防、能源化工等领域产生深远的影响。

1.1 微系统的概念

微系统包括了微(机械)结构、微型传感器、微型执行器和控制处理电路等功能单元,可以实现外界信号的测量、对外执行输出、不同能量域的转换和信息处理决策等功能,构成一个智能系统。图 1-1 所示为典型微系统的功能构成,传感器感知外界信息将其转变为电信号并传递给信号控制处理电路,电信号经过信号转换、处理、分析、决策等功能后,将指令传递给执行器,执行器根据该指令信号做出响应、操作、显示或者通信。这样,控制电路通过传感器、执行器和通信模块与外界联系起来,形成具有感知、思考、决策、通信和反应控制能力的智能集成系统。因此,微传感器、控制处理电路和微执行器的功能可以分别比作人的感官系统、大脑和手。

微系统的概念通常指一个较为全面的功能集成体,包括上述的多种功能。但是由于制造能力的限制,目前多数微系统只包括微机械结构、微传感器、微执行器中的一种或几种,只有个别的微系统组成了功能完善的系统。这种情况下更多地用 MEMS 来代替微系统。MEMS 这一名词已经被世界各国广泛接受并大量出现在文献中,本书主要使用 MEMS 一词。目前 MEMS 不仅仅局限于系统的概念,根据不同的场合,可以指微系统这种

“产品”，也可以指设计这种“产品”的方法学或制造它的技术手段。

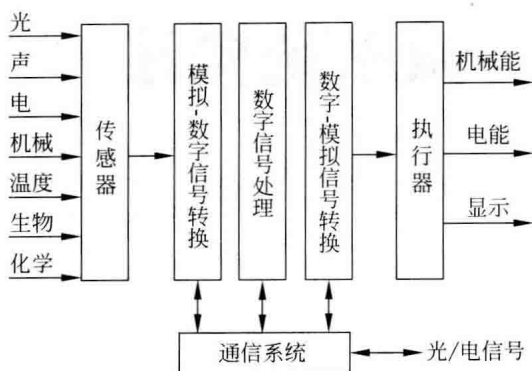


图 1-1 典型微系统的功能组成

微系统技术几乎与集成电路技术同期出现,并且其制造方法也大量地依赖于集成电路的制造技术,二者既有紧密的关系,也有明显的区别。如图 1-2 所示,集成电路中单个晶体管的特征尺寸已经进入到 $2x\text{ nm}$ 的水平,大芯片的尺寸达到了厘米量级,而微系统的特征尺寸一般在微米量级,芯片尺寸通常在毫米或厘米的量级。从组成来看,集成电路仅包括一层晶体管 and 多层互连,而微系统中既包括了信号处理电路,更主要的是由各种三维微结构构成的功能单元。在功能方面,集成电路提供了电路的功能,主要是电信号的处理,而微系统的功能还包括信息的感知和执行功能,因此功能广泛得多。在制造方面,集成电路的制造技术尽管包括 CMOS、Bipolar 和 BiCMOS 等种类,但是每种制造技术基本是标准的,不同的公司在主要工艺流程上差异不大,而微系统的制造既利用了集成电路的制造工艺,更主要的是依靠与集成电路制造技术不同的微加工技术实现复杂的三维结构。

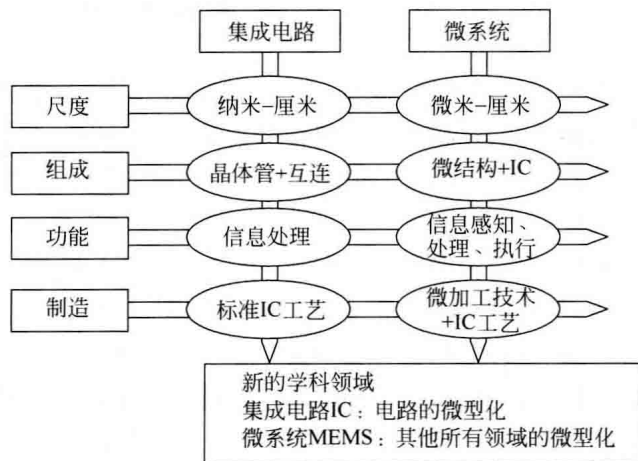


图 1-2 微系统与集成电路的对照

微系统或 MEMS 包括多个功能单元,涉及学科和应用领域十分广泛,对其做一个系统的分类是比较困难的。根据组成单元的功能不同, MEMS 大体可以分为微传感器、微执行器、微结构,以及包括多个单元的集成系统;根据应用领域不同,将 MEMS 应用于无线通信、光学、生物医学、能源等领域,就分别产生了 RF MEMS、Optical MEMS、BioMEMS、Power MEMS

等。实际上,多个领域的微型化或应用都会产生对应的 MEMS 分支方向。

微传感器是感知和测量物理或化学信息的器件,是历史最长、产业化最早、产值最高的 MEMS 器件。图 1-3 所示为 Analog Devices 公司(ADI)制造的单片双轴微加速度传感器 ADXL202,图 1-3(a)~(d)分别为封装照片、加速度敏感结构静止状态、测量状态和芯片照片。测量加速度的传感器机械结构位于芯片中心位置,是利用表面微加工技术制造的悬空多晶硅梳状叉指电容,BiMOS 工艺制造的信号处理电路分布在测量结构的周围。当有加速度作用时,作用在质量块上的惯性力改变了可动叉指与固定叉指之间的距离,引起叉指电容的变化,通过集成的电路测量电容的变化得到加速度信号。

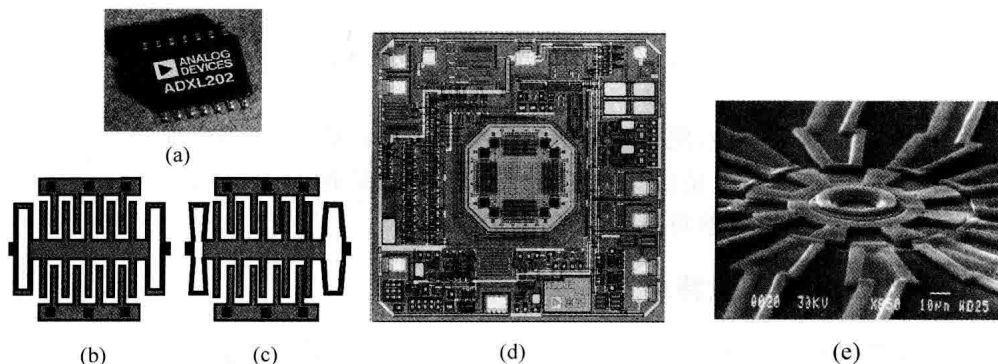


图 1-3 ADXL202 微加速度传感器和静电马达

微执行器是用来驱动 MEMS 内部微器件或者对外输出动作的器件,是 MEMS 的另一个重要组成部分。图 1-3(e)所示为加州大学 Berkeley 分校(UCB)在 20 世纪 80 年代后期研制的直径为 $100\ \mu\text{m}$ 左右的微静电马达,通过静电控制输出旋转运动。微执行器除了单独使用外,还是很多 MEMS 应用器件的核心组成部分,例如应用于光通信的微镜利用微执行器的动作反射光线。

将 MEMS 应用于无线通信系统的 RF MEMS 是 MEMS 的重要方向之一,它通过实现高性能的集成无源器件,如开关、谐振器、可调电容和可调电感等,使无线通信系统能够像 CMOS 集成电路使用三极管一样大量使用无源器件,从而提高无线通信系统的性能、降低成本、减小体积,具有广阔的应用前景。例如安华高(Avago)公司开发的薄膜体声波谐振器,工作时在两个电极之间的 AlN 压电薄膜上产生驻波,尺寸比石英谐振器小 20 倍,频率高达 $20\ \text{GHz}$ ^[1]。

MEMS 在光通信和显示领域得到了广泛的应用。例如德州仪器公司(TI)利用表面微加工技术制造的用于高清晰电视和投影机的数字微镜(DMD)。DMD 的电路首先对光信号进行数字处理,静电执行器根据该信号控制微镜转动,数字式地控制和调整反射光的方向,实现高质量的图像。利用 MEMS 工艺制造的光开关具有插入损耗小、开关时间短、体积小、调整容易、功耗低等优点,能够实现光通信中的光-光转换,是光通信领域研究的热点,如日本 NTT 和美国的朗讯公司等都有产品应用。近年来自适应光学的快速发展,将光学微镜带入了一个高速发展时期,如 AOA Xinetics 和 Iris AO 等公司都有集成了上百个微镜的阵列产品^[2,3]。

生物微系统(BioMEMS)和芯片实验室(Lab on a Chip, LOC)是 MEMS 的另一个研究热点,包括药物释放、临床诊断、微创外科手术、微型生物化学分析系统等。LOC 可以把生化样品运输、分离、混合、纯化、反应、识别检测等多种功能集成在芯片上,具有所需样品量少、效率

高、速度快、自动化等优点。BioMEMS 和 LOC 在疾病诊断、外科治疗和生化分析等领域有广泛的应用。

尺度的缩小将 MEMS 向纳米尺度延伸,产生了纳电子机械系统(NEMS);但很多 NEMS 又不完全是 MEMS 的缩小,而是利用纳米尺度出现的量子效应,大幅度提高灵敏度、减小体积、降低功耗。例如有些 NEMS 传感器可将灵敏度提高 10^6 倍,功耗减小 10^2 倍。采用多壁纳米碳管研制的纳米谐振器,通过谐振频率的变化可测量 3×10^{-14} g 的质量,能够作为检测分子或细菌质量的分子秤;而尺度为 100 nm 的 SiC-NEMS 谐振器,频率高达 GHz, Q 值高达数万以上,而驱动功率只有 10^{-12} W。

1.2 微系统的特点

微系统的多样性和复杂性,使得很难给微系统一个准确的定义,但是通常它们具有一些共同的特点。微系统的这些特点是由其尺度、功能和结构决定的,从某种意义上说,这些特点构成了微系统的内涵,甚至由这些特点界定了微系统的范畴。

1.2.1 MEMS 的典型特点

一般来说,微系统的共同特点包括:①结构尺寸微小:MEMS 的尺寸一般在微米到毫米量级,例如 ADXL202 加速度传感器和微马达的结构尺寸在一百至几百微米,而单分子操作器件的局部尺寸仅在微米甚至纳米水平。尽管 MEMS 器件的绝对尺寸很小,但一般说来其相对尺寸误差和间隙却比较大,例如传统宏观机械的相对尺寸精度高达 $1:200\,000$,而 MEMS 的相对尺寸精度只有 $1:100$ 左右。②多能量域系统:能量与信息的交换和控制是 MEMS 的主要功能。由于集成了传感器、微结构、微执行器和信息处理电路,MEMS 具有了感知和控制能力,能实现微观尺度下电、机械、热、磁、光、生化等领域的测量和控制。例如加速度传感器是将机械能转换为电信号;打印机喷头将电能转换为机械能;生化传感器可以将化学和生物反应能量转换为电能或机械能。③基于微加工技术制造:MEMS 起源于 IC 制造技术,大量利用 IC 制造方法,力求与 IC 制造技术兼容。但是,由于 MEMS 的多样性和三维结构的特点,其制造过程引入了多种新的微加工方法,使 MEMS 制造与 IC 制造的差别很大。然而,近年来 IC 领域三维集成技术又借用了 MEMS 领域的深刻蚀和键合技术,使二者共性进一步增加。④MEMS 不完全是宏观对象的按比例缩小:尽管多种不同领域的微型化都可以发展和应用自己的微系统,但是 MEMS 并不是宏观系统的简单缩小,而是包含着新原理和新功能,这是由比例效应决定的。例如微马达不仅结构与传统宏观马达不同,其利用静电驱动的工作原理也与传统宏观马达的磁力驱动明显不同。⑤在 MEMS 范畴内,经典物理学规律仍然有效,但影响因素更加复杂和多样:物理化学场互相耦合、器件的表面积与体积比急剧增大,使宏观状态下忽略的与表面积和距离有关的因素,例如表面张力和静电力,跃升为 MEMS 范畴的主要影响因素。进入纳米尺度后,器件的量子效应、界面效应和纳米尺度效应等新效应更加突出。目前人们还没有能够像掌握宏观世界一样掌握微尺度下的规律。

集成电路技术的发展依赖于特征尺寸的不断缩小,使集成电路的集成度、功能、性能以及性价比不断提高;而 MEMS 的性能取决于精细的微机械结构,这些结构制造复杂、难以缩小,因此 MEMS 的性价比取决于微机械结构。一般地,微系统中晶体管的数量基本标志着系统处