



上海科技专著
出版资金资助



上海交通大学
学术出版基金资助项目

A project supported by
Shanghai Jiaotong University Academic Publishing Fund

非硅MEMS技术 及其应用

陈文元 张卫平 陈 迪 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

上海科技专著出版资金资助

上海交通大学学术出版基金资助项目

非硅 MEMS 技术及其应用

陈文元 张卫平 陈 迪 著



上海交通大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

非硅 MEMS 技术及其应用/陈文元,张卫平,陈迪著.

—上海:上海交通大学出版社,2015

ISBN 978-7-313-12525-5

I. ①非… II. ①陈…②张…③陈… III. ①微电子
技术—研究 IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 004098 号

非硅 MEMS 技术及其应用

著 者: 陈文元 张卫平 陈 迪

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 上海天地海设计印刷有限公司

开 本: 787mm×960mm 1/16

字 数: 350 千字

版 次: 2015 年 3 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-12525-5/TN

定 价: 150.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 18.5

印 次: 2015 年 3 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-64835344

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪，科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略，上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”，资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

序

Foreword

MEMS 技术是 20 世纪 90 年代由 **IC** 技术发展而来,21 世纪得到迅猛发展的一项高新技术,它集微传感器、微执行器、控制电路于一体,涉及机、电、光、信息、微制造、材料等多学科交叉,可广泛应用于信息、生物、汽车、医疗、国防等领域。

非硅 **MEMS** 技术是在硅 **MEMS** 技术基础上发展起来的,又与硅 **MEMS** 技术互为补充。作者及其团队长期从事非硅 **MEMS** 技术的研究。根据多年的研究,书中详细叙述了非硅 **MEMS** 技术的特点,非硅材料,三维非硅微加工新技术,新型非硅微传感器和微执行器等非硅 **MEMS** 技术及其应用。该书是作者长期从事非硅 **MEMS** 技术研究,理论结合实际,科学研究的总结。

该书可供从事 **MEMS** 技术,微加工、微传感器、微执行器研究和应用的科技人员和高等学校相关专业教师阅读参考,也可作为机电一体化、精密仪器仪表、微机械等专业的本科高年级学生和研究生参考资料。

中国工程院院士
庄松林
2014.12

前 言

Preface

MEMS(micro electro mechanical systems)是 20 世纪 90 年代发展起来的一门新兴技术,它集微传感器、微执行器、控制电路于一体,具有尺寸微小,可批量生产,成本低,有良好的机电性能,集成化程度高等特点,可广泛地应用在汽车、工业自动控制、生化医学、环保、信息和通信、玩具、武器装备等领域。并且随着 MEMS 技术的不断发展,它必将具有更广泛的应用。

MEMS 技术是从 IC 技术发展而来,硅是 MEMS 技术中的主要材料。随着 MEMS 技术的发展及应用的不断提高扩大,人们认识到包括金属、聚合物、高分子化合物、压电、磁性等功能材料也是 MEMS 用得很好的材料,于是进行了研究与开发,逐步形成了从工艺到器件,从系统到应用的非硅 MEMS 技术体系。

作者及其所在团队从 20 世纪 90 年代开始就从事非硅 MEMS 技术的研究和开发。集 20 年研究经验,本书对非硅 MEMS 技术概况;非硅材料性能;三维非硅微制造技术;包括新颖惯性传感器、微光器件、电磁微电机等非硅微传感器和执行器;MEMS 强链;PCR 生物芯片等微系统的原理、设计、加工、检测及应用等作了详细的阐述。以求读者通过本书对非硅 MEMS 技术有所认识 and 了解,并对从事该领域的研究有所帮助。

参加本书撰写的有陈文元教授(第 1, 5, 8, 9 章),张卫平教授(第 5, 8 章),陈迪教授(第 3 章),吴校生副教授(第 2, 7 章),崔峰副教授(第 4, 7 章),李海华副教授(第 6 章),刘武博士(第 4, 7 章)。在此,谨向长期以来共同从事非硅 MEMS 技术的团队同仁表示感谢。

非硅 MEMS 技术还在发展之中,书中存在的错误之处,敬请各位专家和读者批评指正。

目 录

Contents

第 1 章	绪论	1
1.1	MEMS 技术及其特点	1
1.2	MEMS 发展史	3
1.3	MEMS 应用与市场	5
1.4	非硅 MEMS 技术	8
1.4.1	非硅 MEMS 技术的提出	8
1.4.2	非硅 MEMS 技术及其特点	10
1.4.3	本书内容	11
第 2 章	非硅 MEMS 材料	13
2.1	金属	13
2.2	聚合物	14
2.2.1	普通光刻胶	14
2.2.2	SU-8 和 PMMA 光刻胶	16
2.2.3	PDMS	17
2.2.4	聚酰亚胺	19
2.2.5	Parylene	20
2.3	磁性材料	21
2.4	压电材料	22
2.4.1	压电材料的机电特性	23
2.4.2	压电陶瓷 PZT	25
2.4.3	氮化铝及氧化锌	26
2.4.4	压电聚合物 PVDF	29
2.5	形状记忆合金	30

第 3 章	非硅 MEMS 微加工技术	32
3.1	LIGA 技术	32
3.1.1	同步辐射 X 光厚胶光刻工艺	33
3.1.2	微电铸工艺	35
3.1.3	微复制工艺	36
3.2	准 LIGA 技术	37
3.2.1	UV-LIGA 技术	37
3.2.2	DEM 技术	38
3.3	多层、倾斜和可动微结构加工工艺	39
3.3.1	多层微结构加工工艺	39
3.3.2	倾斜微结构加工工艺	42
3.3.3	可动微结构加工工艺	42
3.4	柔性和弹性衬底微结构加工工艺	43
3.4.1	柔性衬底微结构加工工艺	43
3.4.2	弹性衬底微加工工艺	44
3.5	硅/UV-LIGA 组合微加工工艺	44
第 4 章	非硅微执行器	46
4.1	电磁型微电机	46
4.1.1	永磁转子式直流无刷电磁微电机基本原理	46
4.1.2	永磁转子式直流无刷电磁微电机的结构和工作原理	47
4.1.3	微电机的设计	49
4.1.4	微电机的发热及摩擦	49
4.1.5	微电机的加工制造	50
4.2	抗磁悬浮静电微电机	55
4.2.1	可用于静电微电机的悬浮形式	55
4.2.2	静磁悬浮 Earnshaw 理论的限定和超越	55
4.2.3	抗磁悬浮系统的尺度特点	56
4.2.4	抗磁悬浮静电微电机的结构布置	57
4.2.5	抗磁悬浮微电机的悬浮特性	58
4.2.6	抗磁悬浮微电机的旋转驱动分析	65
4.2.7	抗磁悬浮微电机的工艺研究	66
4.2.8	抗磁悬浮微电机测控系统	68
4.2.9	抗磁悬浮微电机的实验	76

4.3	形状记忆合金复合膜微驱动器	78
4.3.1	TiNi 基形状记忆合金膜	79
4.3.2	TiNi 基形状记忆合金膜的制备	80
4.3.3	TiNi 基/Si 形状记忆合金复合膜微泵	82
4.4	基于非硅微加工技术的电化学驱动器	89

第 5 章 聚合物 PCR 生物芯片技术 90

5.1	引言	90
5.1.1	细胞内 DNA 的半保留复制	91
5.1.2	体外 DNA 扩增的 PCR 技术	93
5.1.3	传统 PCR 仪与 PCR 芯片	96
5.1.4	PCR 芯片的研究现状	97
5.2	静态腔式 PCR 芯片	103
5.2.1	反应腔单元设计	103
5.2.2	加热器和温度传感器设计	104
5.2.3	静态腔式 PCR 芯片温度控制单元设计	106
5.2.4	总体布局设计	106
5.3	集成式连续流 PCR 芯片设计	110
5.3.1	芯片反应流体通道布局设计	110
5.3.2	PCR 芯片的集成薄膜加热器和温度传感器	112
5.3.3	连续流式 PCR 芯片控制单元设计	117
5.4	PCR 生物芯片的制造工艺	118
5.4.1	SU-8 工艺研究	118
5.4.2	PDMS 相关工艺	121
5.4.3	导管连接	123
5.4.4	微加热器和传感器	123
5.5	生物实验、结果及其分析	125
5.5.1	PCR 芯片表面改性	125
5.5.2	静态腔式 PCR 生物实验	125
5.5.3	连续流 PCR	129

第 6 章 微光通信器件 137

6.1	光纤连接器	137
6.1.1	简介	137

6.1.2	光纤连接器的研究现状	138
6.1.3	金属盖板光纤连接器的结构及原理	140
6.1.4	曲面金属盖板光纤连接器阵列的加工	144
6.2	MEMS 可调光衰减器	146
6.2.1	电磁驱动挡光片式 MEMS 可调光衰减器	147
6.2.2	电磁驱动错位型 MEMS 可调光衰减器	150
6.3	摆动式电磁驱动 MEMS 光开关	153

第 7 章 微惯性传感器

7.1	微惯性传感器概述	156
7.1.1	微惯性传感器的应用	156
7.1.2	微加速度计	159
7.1.3	微陀螺仪	160
7.2	静电悬浮微惯性传感器	162
7.2.1	静电悬浮微惯性传感器的研究概况	163
7.2.2	静电悬浮微惯性传感器的工作原理	165
7.2.3	静电悬浮微惯性传感器的实现技术	167
7.2.4	静电悬浮微惯性传感器的设计	169
7.2.5	静电悬浮微惯性传感器的制造	171
7.2.6	静电悬浮微惯性传感器的测控	177
7.3	电磁悬浮转子微陀螺	182
7.3.1	电磁悬浮转子微陀螺的工作机理	182
7.3.2	电磁悬浮转子微陀螺的结构及其优化	185
7.3.3	电磁悬浮转子微陀螺的制作工艺	194
7.3.4	电磁悬浮转子微陀螺的悬浮及旋转特性测试	196
7.4	压电式微固体模态陀螺	199
7.4.1	微固体模态陀螺的模型及工作机理	200
7.4.2	微固体模态陀螺的模态、谐振、科氏角速度效应分析	202
7.4.3	微固体模态陀螺的微加工工艺	208
7.4.4	微固体模态陀螺的驱动及检测电路	209
7.4.5	微固体模态陀螺的原理样机测试	211
7.5	抗高过载金属微加速度计	213
7.5.1	抗高过载金属微加速度计的结构设计	213
7.5.2	基于非硅 MEMS 技术的金属微加速度计的微制造	217

7.5.3	电容式金属微加速度计的自检测试	221
第8章	MEMS 强链技术	223
8.1	引言	223
8.1.1	MEMS 强链的组成和工作原理	223
8.1.2	基于 MEMS 技术的强链整机集成研究	224
8.2	MEMS 强链总体方案和设计技术	225
8.2.1	MEMS 强链部件选型	225
8.2.2	MEMS 强链总体方案和工作原理	227
8.2.3	MEMS 强链各部分设计	230
8.3	MEMS 强链的制作技术研究	245
8.3.1	驱动器(微电机)多层线圈定子和转子的制作工艺	245
8.3.2	多层复杂结构反干涉齿轮集一体化制作工艺研究	245
8.3.3	棘轮棘爪的加工工艺	248
8.3.4	支架、微电机轴、光开关耦合轮、垫圈、插片加工	249
8.3.5	精密显微装配	250
8.4	MEMS 强链硬盘加密	250
8.4.1	系统结构与工作原理	250
8.4.2	身份认证与密钥管理	252
8.4.3	数据流硬件加解密	252
8.4.4	仿真与测试	255
第9章	总结与展望	258
9.1	全书总结	258
9.2	展望	258
	参考文献	260
	索引	278

第 1 章

绪 论

1.1 MEMS 技术及其特点

MEMS(micro electro mechanical system)是微电子机械系统或微机电系统的简称。1988 年底在美国盐湖城(Salt Lake City)召开的“Micro Tele-operated Robotics Workshop”,经过一个多小时的激烈讨论,最后 California 大学 Berkeley 分校的 Roger Howe 教授宣布这项技术被称为“MEMS”。

MEMS 是集微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和控制电路,直至接口、通讯和电源等于一体的微器件或微系统。MEMS 是一种设计和制造微小系统的技术和工艺集合,是一种用来制造微小集成器件或系统的工艺技术,它采用集成电路批量加工工艺进行制造,系统或器件尺寸在几微米到几毫米不等。这些器件或系统能够传感、控制和驱动微观尺度,并且在宏观尺度上产生效应。MEMS 技术是一个新兴技术领域,主要属于微米技术范畴(见图 1-1,图 1-2)。

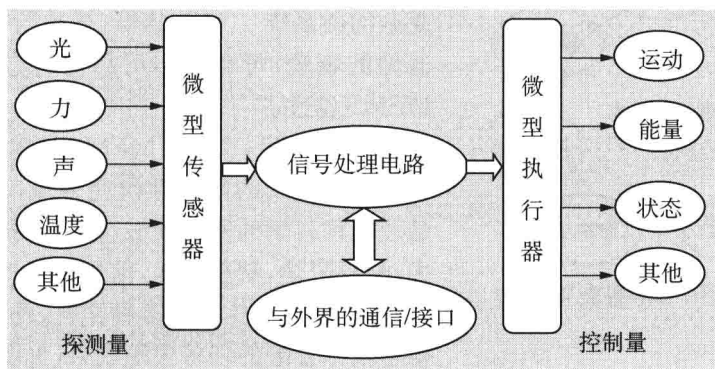


图 1-1 MEMS 构成

MEMS 主要特点如下:

(1) 微型化。MEMS 器件体积小,重量轻,能耗低,惯性小,谐振频率高,响应时间短。MEMS 系统与一般的机械系统相比,不仅体积缩小,并且在力学原理和运动学原理,材料特性,加工,测量和控制等方面都将发生很大的变化。

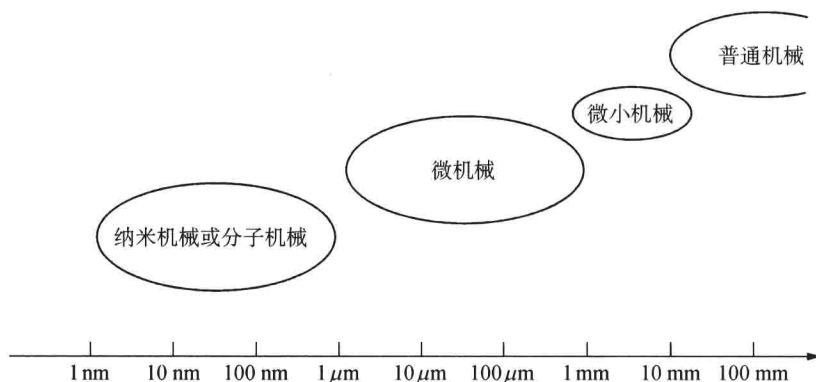


图 1-2 各类机械尺度

(2) 以硅为主要材料,机电性能优良。硅的强度、硬度和杨氏模量与铁相当,密度类似铝,热传导率接近银和钨,因此以硅为主的 MEMS 器件机械和电器性能优良。

(3) 适用于大批量生产。用硅微加工工艺,一片硅片上可同时制造成百上千个 MEMS 器件,制造成本低。

(4) 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,或形成传感器阵列或执行器阵列,甚至把多种功能的器件集成在一起,形成复杂的微系统。微传感器、微执行器和微电子器件的集成,可制造出可靠性、稳定性很高的 MEMS 器件。

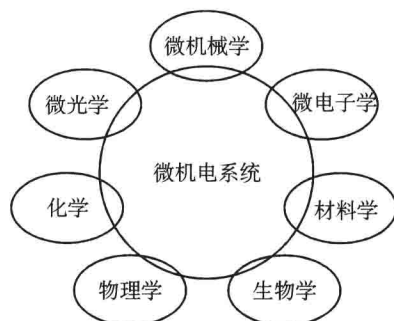


图 1-3 多学科交叉

(5) 多学科交叉。MEMS 技术是一种典型的多学科交叉的前沿性研究领域,几乎涉及自然及工程科学的所有领域,如电子技术,机械技术,材料科学,制造技术,信息与自动控制技术,物理学,化学和生物等多种学科,并集聚了当今科学技术发展的许多尖端成果(见图 1-3)。

在当前 MEMS 所能达到的尺度下,许多宏观世界基本的物理规律仍然起作用,但由于尺寸缩小带来的影响(scaling effects),许多物理现象与宏观世界有很大区别,因此许多原来的理论基础会发生变化。例如:力的尺寸效应、微结构的表面效应。MEMS 器件中,表面积体积比变大后,造成表面力变得更加显著;结构尺寸变小后,宏观尺度下几乎可以忽略的晶粒尺寸带来的结构材料参数影响,在微观尺度下就不可以忽略。

1.2 MEMS 发展史

MEMS 技术被誉为 21 世纪带有革命性的高新技术,它的诞生和发展是“需求牵引”和“技术推动”的综合结果。

随着人类社会全面向信息化迈进,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,也是电子整机部门的需求。过去的几十年中,IC 技术的迅速发展,使得信息系统中的电子系统的微型化进程迅猛发展,不仅使系统体积大大减小、功能大大提高,性能和可靠性大幅上升,功耗和价格大幅度降低。它同时要求信息系统中的非电子系统也要相应微型化,MEMS 技术就是在这种背景下应运而生。其发展简史如下。

1950 年代:

1958 商业化的硅应变计问世。

1959 理查德·菲曼在加州工学院作了里程碑式的报告“在底层有足够的空间”并提出首个制造出尺寸小于 1/64 in 电机的人将获得 1 000 美元的奖励。

1960 年代:

1961 首个硅压力传感器制成。

1967 表面微加工技术的发明。Westinghouse 发明了谐振门场效应管(RGT),他描述了采用牺牲层材料来释放硅基体上的微结构器件。

1970 年代:

1970 首个硅微加速度计诞生。

1979 首个微喷墨喷嘴出现。

1980 年代:

20 世纪 80 年代早期的首个表面硅微加工技术试验成功,并推动了微电子工业的发展,世界范围的试验以及大量的文献,极大地增加了公众的兴趣。

1982 一次性血压计问世。

1982 “硅作为结构材料”一篇有用的论文激起科学研究群体的灵感——以此作为硅的材料特性以及腐蚀的数据参考。

1982 LIGA 工艺诞生。

1988 首个 MEMS 会议——盐湖城会议。

1990 年代:

旨在改善传感器性能的微细加工方法。

1992 在 DARPA(美国国防部高级研究计划局)的资助下,MCNC(北卡罗来纳州微电子中心)开始了多用途 MEMS 工艺(MUMPS)的研究。

1992 首个微铰链研制成功。

- 1993 卖出了首个表面微加工制造的微加速度计(analog devices, ADXL50)。
1994 深度反应离子刻蚀(DRIE)工艺申请专利。
1995 生物 MEMS 得到快速的发展。

2000 年代:

MEMS 光器件在光网络上较大的商业应用。

因此,MEMS 发展史可以归结:

MEMS 萌芽:1950—1960 年代,崛起:1970—1980 年代,发展:1990 年代。

在 MEMS 发展过程中,它的标志性成果有:

(1) 20 世纪 80 年代初发明静电微电机(见图 1-4),引起轰动。

(2) 20 世纪 90 年代初 ADI 的气囊硅微加速度计(见图 1-5)实现产业化。

(3) 20 世纪 90 年代末 Sandia 实验室 5 层多晶硅技术(见图 1-6),表面微机械向多层化发展。

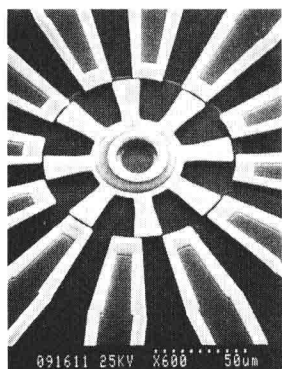


图 1-4 硅微静电微电机

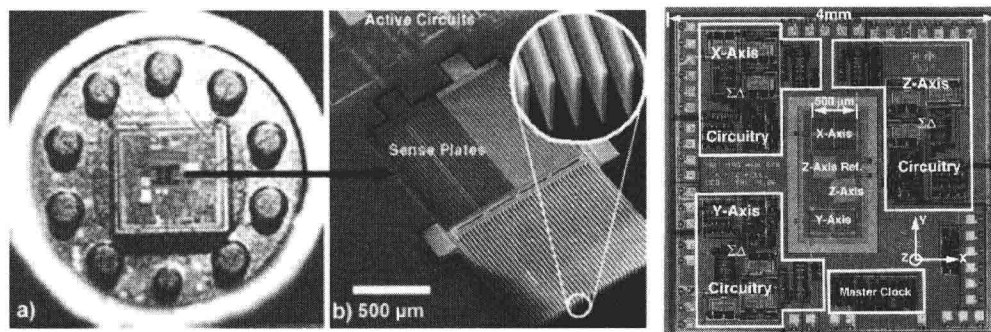


图 1-5 首个商业化 ADI 汽车安全气囊硅微加速度计及集成的 ADI 硅微加速度计

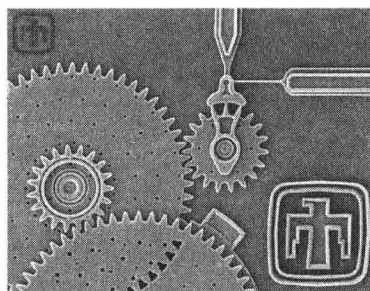


图 1-6 五层多晶硅技术

1.3 MEMS 应用与市场

MEMS 被认为是 21 世纪最有前途的技术之一,目前已在汽车、消费电子、工业、通信、医疗、国防、航空航天等领域得到了广泛应用;有望在工业和日常生活领域引起一场革命,它将会大大改善我们的生活以及改变人类生活方式。以下举几个 MEMS 技术的应用领域。

1. 汽车工业:MEMS 主要市场之一

图 1-7 是众多 MEMS 器件尤其是微传感器在汽车中的应用示例,主要用于汽车安全、刹车及悬挂系统等。例如:

- (1) 微压力传感器:发动机、进气压力、轮胎压力。
- (2) 微加速度计:碰撞、车轮防滑控制。

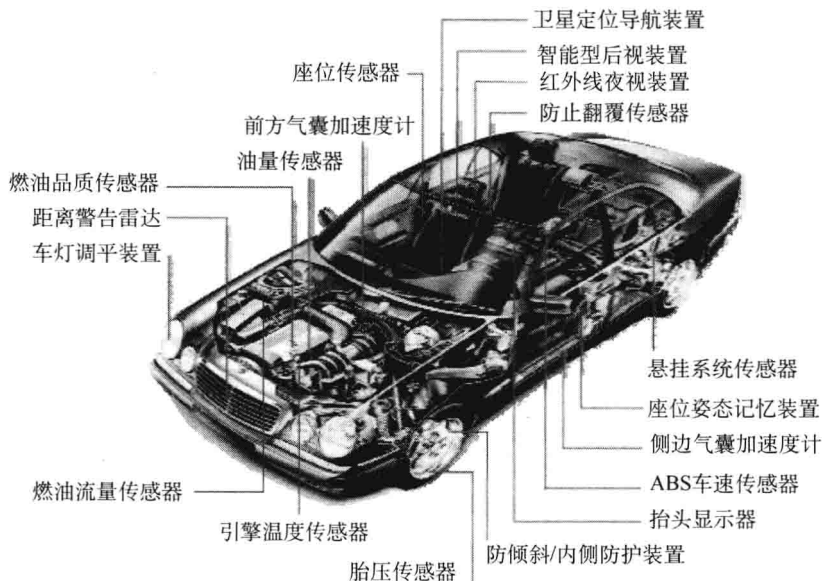


图 1-7 MEMS 在汽车中的应用示例

2. 工业自动控制、办公自动化

例如,压力传感器、打印机喷墨头、投影仪等。

3. 生物化学及医疗

- (1) 生物分析、医疗诊断、监护。

例如,生物医疗传感器和微型生物化学分析装置等,用于肝功能、肾功能、血脂、血糖、乳酸、酮体、胆固醇、白蛋白、肌酐、尿素氮等生化分析和监测。

(2) MEMS 参与介入疗法。

例如心脏维护系统(心脏起搏器、导液管等)、给药系统(胰岛素、镇痛药等)、微创手术等。如图 1-8 所示为 MEMS 在体内医疗应用展望的示例,其中的 MEMS 器件包括微推进系统、通信天线、组织采样用镊子、生化感测阵列、微摄像系统等。优点:微小(可进入人体血管与组织)、智能(能自动进行细微精确的操作)。

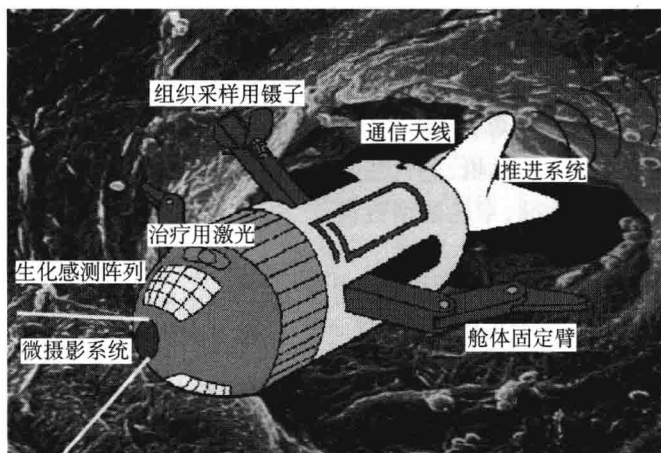


图 1-8 MEMS 在体内医疗应用展望示例

4. 环保仪器(化学分析、环境监测)

(1) 水、天气、气象、水污染、地震等自然灾害。

(2) 电子鼻:食品生产、医疗、制药安全、侦讯、报警、排雷等。

5. 信息和通信产业

例如,数字微镜投影仪,鼠标,手机(天线、射频),光纤插针,微麦克风,光开关,滤波器,电容器,微陀螺,微加速度计等。图 1-9 是 MEMS 尤其是 RF-MEMS 器件在智能手机中的应用示例。

6. 玩具

虚拟现实目镜、游戏棒、智能玩具。

7. 家庭消费类产品

(1) 家用血压仪、血糖仪。

(2) 家用一氧化碳监测仪。

(3) MEMS 惯性仪器、压力传感-摄像机、洗衣机。

8. 武器装备

MEMS 最早最大市场之一: