



“十二五”国家重点图书出版规划项目
陕西出版资金资助项目

新兴微纳电子技术丛书

微机电技术

Micro Electro Mechanical Technology

田文超 姜利飞 编著 ●



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

西安电子科技大学

“十二五”国家重点图书出版规划项目
陕西出版资金资助项目

新兴微纳电子技术丛书

Micro Electro Mechanical Technology

微机电技术

田文超 娄利飞 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了微机电技术基本内容、分析方法和主要应用,包括微机电系统概述、材料、工艺、典型器件、应用,RF MEMS 及重构天线,MEMS 力学问题等。书中包含大量图、表,研究成果及相关结论,内容丰富。

本书可供高年级本科生和研究生使用,也可以作相关工程技术人员及科技管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微机电技术/田文超,娄利飞编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2014.8

(新兴微纳电子技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3335 - 0

I. ①微… II. ①田… ②娄… III. ①微电机 IV. ①TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 145035 号

策 划 李惠萍

责任编辑 阎 彬 曹 锦

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×960 毫米 1/16 印 张 26.5

字 数 546 千字

印 数 1~3000 册

定 价 50.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3335 - 0/TM

XDUP 3627001 - 1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

“十二五”国家重点图书出版规划项目
陕西出版资金资助项目

新兴微纳电子技术丛书

编写委员会名单

编委会主任 庄奕琪

编委会成员 樊晓桢 梁继民 田文超 胡 英 杨 刚
张春福 张进成 马晓华 郭金刚 金 钊
娄利飞 何 亮 张茂林

前 言

微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS),是指可批量制作的,集微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和电路,直至接口、通信和电源等于一体的微型器件或系统。其涉及多学科交叉,包括材料、机械、电子、微电子、生物学、医学、信息等工程技术学科和物理学(特别是力学和光学)、化学等基础学科,具有能够在狭小空间内进行作业而又不扰乱工作环境的特点,有着广泛的应用前景。MEMS在航空航天、精密机械、生物医学、汽车工业、家用电器、环境保护、通信、军事、物联网等领域有着广泛的应用潜力,成为广大科技工作者研究的热点。

本书比较全面地介绍了 MEMS 的基本概念、研究现状、常用材料、主要工艺、典型器件、工作原理、分析方法、应用领域、RF MEMS 及重构天线、相关力学等。书中有少部分内容是作者在德国 FREIBURG 大学 IMTEK 研究所工作期间所收集的研究成果,由于篇幅所限,有关推导过程和实验过程均作了省略。编写本书的目的是为高年级本科生和研究生提供有关 MEMS 技术的基本知识,同时也为广大工程技术人员从事 MEMS 研究提供帮助。

全书由七章组成,各章的主要内容如下:

第 1 章介绍 MEMS 的基本概念、研究范围、研究现状、主要特点和面临的挑战。

第 2 章介绍 MEMS 的常用材料,首先介绍硅及其化合物,其次介绍陶瓷、形状记忆合金、聚合物、凝胶、电流变体,最后介绍石墨烯、碳纳米管、金刚石、硅烯等新兴材料。

第 3 章介绍 MEMS 的常见工艺方法,主要包括传统超精密和特种微细加工技术、硅微机械技工技术、键合技术和 LIGA 技术等。

第 4 章介绍 MEMS 典型器件工作原理,涉及微传感器与微执行器、微加速度计、微陀螺仪、MEMS 微谐振器、DMD 数字微镜等。

第 5 章详细介绍 MEMS 的应用,包括 MEMS 在汽车工业、军事领域、医学领域、光通信领域、航空航天、手机、家用电器、生物芯片和物联网等领域中的最新应用。

第 6 章介绍 RF MEMS 及重构天线,包括 RF MEMS、MEMS 移相器、MEMS 滤波器、RF 开关、重构天线、频率重构天线、方向图重构天线、极化可重构微带天线等。

第 7 章介绍涉及 MEMS 微尺度效应的有关力学知识,包括梁和膜的变形、考虑边缘效

应和包角效应等微尺度效应的静电力、范德瓦耳斯力、MEMS 阻尼和 Casimir 力等。

全书第 1、4、5、6、7 章由田文超教授撰写，第 2、3 章由娄利飞副教授撰写，田文超教授负责全书的审阅。

本书在编写过程中，得到了贾建援教授和杨银堂教授的指导和帮助，在此对两位教授在百忙之中给予的支持和帮助表示衷心的感谢，感谢 FREIBURG 大学 IMTEK 研究所的 U. Wallrabe 教授，感谢在本书图片处理、校对等工作中给予帮助的林科禄硕士，感谢西安电子科技大学出版社。

由于作者水平有限，加上 MEMS 技术的不断发展，MEMS 在理论上和工艺上等仍欠成熟，并且新的应用领域不断涌现，因此书中不足之处在所难免，恳请广大读者不吝指正。

编 者

2014 年 3 月

目 录

第 1 章 MEMS 概述	1
1.1 MEMS 的概念	1
1.2 MEMS 研究现状	6
1.3 MEMS 的特点和存在的问题	14
参考文献	25
第 2 章 MEMS 材料	30
2.1 硅及其化合物	30
2.1.1 硅	30
2.1.2 硅化合物	38
2.2 陶瓷	39
2.3 聚合物	41
2.4 金属	45
2.4.1 磁致伸缩金属	45
2.4.2 形状记忆合金	46
2.5 凝胶	47
2.6 电流变体	48
2.6.1 电流变体定义	48
2.6.2 电流变体组成	48
2.6.3 电流变体应用	49
2.7 新兴材料	50
2.7.1 石墨烯	50
2.7.2 碳纳米管	59
2.7.3 金刚石	70
2.7.4 硅烯	78
参考文献	79
第 3 章 MEMS 工艺	82
3.1 传统超精密和特种微细加工技术	82
3.1.1 传统超精密微加工技术	82
3.1.2 特种微细加工技术	85

3.2 硅微机械加工技术	107
3.2.1 MEMS 常用 IC 工艺	107
3.2.2 表面微加工技术	120
3.2.3 体微加工技术	123
3.3 键合技术	133
3.4 LIGA 技术	145
3.4.1 标准 LIGA 技术	146
3.4.2 准 LIGA 技术	148
3.4.3 其他相关 LIGA 技术	157
参考文献	163
第 4 章 MEMS 典型器件	165
4.1 微传感器与微执行器	165
4.1.1 MEMS 微传感器	167
4.1.2 微执行器	177
4.2 微加速度计	184
4.2.1 线微加速度计	186
4.2.2 差动电容微加速度计	186
4.2.3 跷跷板式微加速度计	188
4.2.4 三明治式微加速度计	190
4.2.5 梳齿式微加速度计	192
4.2.6 MEMS 微加速度计研究方向	195
4.3 微陀螺仪	197
4.3.1 陀螺仪原理	198
4.3.2 MEMS 陀螺仪	201
4.3.3 进一步提高 MEMS 陀螺仪的性能	219
4.4 微谐振器	220
4.4.1 梳状谐振器	221
4.4.2 梁式谐振器	221
4.4.3 盘式谐振器	222
4.4.4 薄膜体声波谐振器	224
4.4.5 腔结构微机械谐振器	226
4.4.6 声表面波谐振器	226
4.4.7 谐振器性能比较	228
4.5 数字微镜	229
4.5.1 DMD 原理	229
4.5.2 数字微镜的应用	233
参考文献	236

第 5 章 MEMS 应用	239
5.1 MEMS 技术在汽车工业中的应用	240
5.1.1 汽车安全系统	241
5.1.2 监测轮胎气压系统	243
5.2 MEMS 技术在军事领域的应用	248
5.2.1 微飞行器	249
5.2.2 微惯性导航系统	251
5.2.3 纳米武器	254
5.3 MEMS 技术在医学中的应用	255
5.3.1 微创内窥镜系统	256
5.3.2 特定部位药物释放药丸	260
5.3.3 消化道采样及参数监测系统	261
5.3.4 精微外科和软组织外科手术	262
5.4 MEMS 在光通信中的应用	264
5.4.1 全光通信	264
5.4.2 光开关	266
5.5 MEMS 技术在航空航天中的应用	277
5.5.1 微纳卫星	277
5.5.2 太空望远镜调整系统	279
5.6 MEMS 技术在手机中的应用	281
5.6.1 手机加速度计	282
5.6.2 MEMS 麦克风	283
5.6.3 远程信息处理	284
5.6.4 多频段手机	284
5.6.5 微型投影技术	287
5.6.6 手机陀螺仪	289
5.6.7 MEMS 在手机中的前景	290
5.7 MEMS 技术在家用电器中的应用	291
5.8 生物芯片	296
5.8.1 微阵列生物芯片	297
5.8.2 微流体生物芯片	297
5.8.3 流体技术	300
5.8.4 检测技术及装置	300
5.8.5 DNA 测序与药品研制	302
5.9 MEMS 技术在物联网中的应用	302
参考文献	305

第 6 章 RF MEMS 及重构天线	308
6.1 RF MEMS	309
6.2 RF MEMS 的应用	310
6.2.1 MEMS 移相器	310
6.2.2 MEMS 滤波器	315
6.2.3 其他 RF MEMS 应用	318
6.3 RF 开关	320
6.3.1 RF MEMS 开关分类	322
6.3.2 悬臂梁结构电阻接触式 RF 开关	323
6.3.3 电容耦合式 RF 开关	326
6.4 重构天线的概念	328
6.5 重构天线研究现状	330
6.6 重构天线分类	334
6.6.1 改变天线单元结构	334
6.6.2 控制馈电网络	338
6.7 频率重构	339
6.8 方向图重构	345
6.9 频率和方向图同时重构	349
6.10 极化可重构微带天线	351
参考文献	361
第 7 章 MEMS 力学问题	366
7.1 梁的力学问题	366
7.1.1 应变和应力	366
7.1.2 梁的弯曲变形	367
7.2 膜的力学问题	370
7.2.1 薄膜弯曲	370
7.2.2 周边固支圆形薄膜弯曲	371
7.2.3 周边固支矩形薄膜弯曲	372
7.3 静电力	373
7.3.1 分离变量法级数解	373
7.3.2 保角变换近似解	374
7.3.3 考虑极板厚度时的边缘效应	374
7.3.4 非平行极板电容静电力	375
7.4 范德瓦耳斯力	377
7.4.1 偶极子电场	378
7.4.2 离子与偶极间作用力	379
7.4.3 偶极相互作用	380

7.4.4	角平均的偶极相互作用	381
7.4.5	偶极-诱导作用	381
7.4.6	伦敦(London)-范德瓦耳斯力	382
7.4.7	范德瓦耳斯力	385
7.4.8	物体间的范德瓦耳斯力	386
7.5	MEMS 阻尼	387
7.5.1	气体阻尼	387
7.5.2	稀薄气体阻尼	400
7.6	Casimir 力	402
7.6.1	Casimir 力的背景	403
7.6.2	Casimir 力	404
7.6.3	金属板间 Casimir 力	405
7.6.4	Casimir 力对 MEMS 的影响	407
	参考文献	410

第 1 章 MEMS 概述

随着微/纳米科学与技术(Micro/Nano Science and Technology)的发展,以形状尺寸微小或操作尺寸极小为特征的微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS),已成为人们在微观领域认识和改造客观世界的融有高新微机电系统技术的微型器件或系统,是当前一个十分活跃的研究领域。

MEMS 技术是建立在微米/纳米技术(Micro/Nano Technology)基础上的 21 世纪前沿技术,是指对微米/纳米材料进行设计、加工、制造、测量和控制的技术。该技术可将机械构件、光学系统、驱动部件、电控系统集成成为一个整体单元,不仅能够采集、处理与发送信息或指令,还能够按照所获取的信息自主地或根据外部的指令完成驱动功能。利用微电子技术和微加工技术(包括硅体微加工、硅表面微加工、LIGA 和晶片键合等技术)相结合的制造工艺, MEMS 技术制造出各种性能优异、价格低廉、微型化的传感器、执行器、驱动器和微系统。MEMS 技术是近年来发展起来的一种新型多学科交叉的技术,涉及材料、机械、电子、微电子、化学、物理学(特别是力学和光学)、生物学、医学、信息等多种学科。

MEMS 技术的发展开辟了一个全新的技术领域和产业,采用 MEMS 技术制作的微传感器、微执行器、微型构件、微机械光学器件、真空微电子器件、电力电子器件等,在航空、航天、汽车、生物医学、环境监控、军事以及几乎人们所接触到的所有领域中都有着十分广阔的应用前景,目前 MEMS 市场的主导产品为压力传感器、加速度计、微陀螺仪、喷墨打印头和硬盘驱动头等。MEMS 技术正发展成为一个巨大的产业,如同微电子产业和计算机产业给人类带来的巨大变化一样, MEMS 技术也正在孕育一场深刻的技术变革,将对人类社会产生新一轮的影响。MEMS 已成为广大科技工作者研究的热点,并被列为 21 世纪关键技术之首。

本章将介绍 MEMS 的基本概念、特点、研究现状和面临的挑战。

1.1 MEMS 的概念

MEMS 是美国人的惯用词,在欧洲称为微系统(Micro System Technology, MST),在

日本称为微机器(Micro-Machine),另外还有微机电系统技术(Micro-Electro Mechanical System Technologies)、微科学工程(Micro-Science and Engineering)等称谓。由于美国的MEMS总体研究水平处于领先地位,因此本书沿用MEMS叫法。

随着MEMS技术的发展,产生了MEMS的分支。其中,与生物或生物医学技术相结合,产生了生物MEMS(Bio-MEMS);与无线通信技术相结合,产生了射频MEMS(Radio Frequency MEMS, RF MEMS);与光学技术相结合,产生了微光机电MEMS(Micro-Optical-Electronic Mechanical Systems, MOEMS)。

MEMS是以微细加工技术为基础,关键特征尺寸在亚微米至亚毫米之间,将微传感器、微执行器、信号处理和控制、通讯和接口电路、微能源等组成在一起,独立完成机/电/光等功能的微机电器件、装置或系统。它既可以根据电路信号的指令控制执行元件,实现机械驱动,也可以利用传感器探测或接收外部信号。传感器将转换后的信号经电路处理后,再由执行器变为机械信号,完成执行命令。MEMS是一种获取、处理和执行操作的集成系统,通常需要多学科领域技术的综合应用,例如机、电、光、生物等多种领域。

日本国家MEMS中心认为Microsystem/Micromachine含义为: A micro machine is an extremely small machine comprising very small(several millimeters or less) yet highly sophisticated functional elements that allows it to perform minute and complicated tasks。

MEMS将微电子技术和微细加工技术相结合,实现微电子与机械的融合。完整的MEMS是由微传感器、微执行器、信号处理和控制电路、接口电路和微能源组成的一体化微型器件或系统,完成传统大尺寸系统所不能完成的任务。也可以将独立微器件,如微传感器或执行器等嵌入到大尺寸的系统中,以达到提高系统可靠性,降低成本,实现系统的智能化和自动化的目的。

如图1-1所示,MEMS可分成几个独立的功能单元,包括微结构元器件、微传感器、微执行器和微系统等。其工作原理是在外部环境物理、化学和生物等信号输入后,通过微传感器转换成电信号,经过信号处理(模拟信号或数字信号)后,由微执行器执行动作,实现与外部环境“互动”的功能。MEMS是一种获取、处理信息和执行机械操作的集成器件。它是涉及微机械学、微电子学、自动控制、物理学、化学、生物学以及材料等多学科、高新技术的边缘学科和交叉学科。

MEMS是一种全新的必须同时考虑多种物理场耦合作用的系统。相对于传统机械系统,MEMS尺寸更小,其外形最大的不超过一个厘米,甚至仅仅为几个微米;主要材料为硅,硅材料电气性能优良,强度、硬度和杨氏模量与铁的相当,密度与铝的类似,热传导率接近钼和钨的。MEMS采用与集成电路(IC)类似的生成技术,可大量利用IC生产中的成熟技术、工艺进行大批量、低成本生产,使性价比相对于传统“机械”制造技术有大幅度提高。

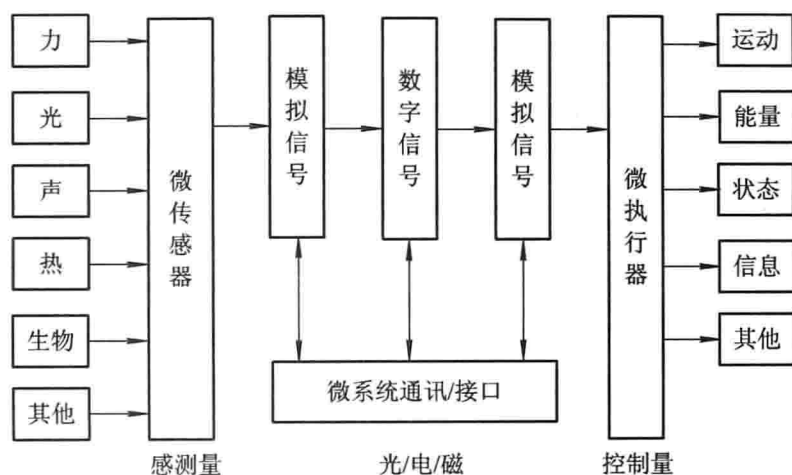


图 1-1 MEMS 系统组成图

关于 MEMS 的概念，习惯上依据机械结构的尺寸，将特征尺寸在 $1\text{ mm} \sim 10\text{ mm}$ 范围内的机械称为小型(Mini)机械；特征尺寸在 $1\text{ }\mu\text{m} \sim 1\text{ mm}$ 范围内的机械称为微型(Micro)机械；特征尺寸在 $1\text{ nm} \sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 的机械称为纳米(Nano)机械。当然，上述这些划分也未必严密，有时候微机械加上外围结构尺寸也会大于 1 mm ，但仍然归于微机械。对照以上划分，由这些机械构成的机电系统分别称为小型机电系统、微机电系统(MEMS)和纳机电系统。

随着 MEMS 构件尺寸的减小，许多物理特性发生了变化，主要有两类情况：

- (1) 变化有时可以由宏观世界的变化推断出来；
- (2) 随着微观效应的增强，这种推断变得不可能。

对于后者，不仅要建立新的理论和经验公式来解释微观世界的现象，而且需要研究新的工程分析和归纳方法。由此导致微材料学、微流体力学、微热力学、微摩擦学、微观力学等微观科学的产生。

MEMS 并非单纯是宏观机械的微小化，它的研究目标在于通过微型化、集成化来探索新原理、新功能的元件和系统，开辟一个新的科学技术领域和产业。微电子学、微机械学、微光学、微动力学、微流体力学、微热力学、微摩擦学、微结构学和微生物学等共同构成 MEMS 理论基础。

目前，MEMS 常用制作技术主要有：

- (1) 以日本为代表的利用传统机械加工手段，即利用大机器制造小机器，再利用小机器制造微机器的方法。
- (2) 以美国为代表的利用化学腐蚀或集成电路工艺技术对硅材料进行加工，形成硅基 MEMS 器件的方法。

(3) 以德国为代表的 LIGA(即光刻、电铸和塑铸)技术,它是利用 X 射线光刻技术,通过电铸成型和塑铸形成深层微结构的方法。

上述第二种方法与传统 IC 工艺兼容,可以实现微机械和微电子系统的集成,而且适合批量生产,已经成为目前 MEMS 的主流技术。LIGA 技术可用来加工金属、塑料和陶瓷等各种材料,并可用来制作深宽比大的精细结构(加工深度可以达到几百微米),因此也是一种比较重要的 MEMS 加工技术。LIGA 技术自 20 世纪 80 年代中期由德国开发出来以后得到了迅速发展,人们已利用该技术开发和制造出了微齿轮、微马达、微加速度计、微射流计等器件。第一种加工方法可以用于加工一些在特殊场合应用的微机械装置,如微型机器人、微型手术台等。

MEMS 器件的两个基本特征是机械特性和电子特性。机械特性在功能和性能上为电子芯片赋予了超出最初想象力的推动力。不仅如此,它还可以将光或其他电磁能量添加到其中,从而产生一个让人无法置信的交叉科学和技术。

MEMS 器件最基本的工作原理是通过微操作器将其他能量转换成机械能。根据其设计结构一般可分成四类:无可动部件有形变、有可动部件无形变、有可动部件有碰撞表面、有可动结构有形变。根据机械驱动能量提供的方式不同,MEMS 器件分为静电型、电磁型、压电型及热膨胀型等几种类型。由于在当今射频电路的设计过程中,通常要求激励驱动快速,因此一般都是采用静电型微操作器。

静电驱动,是采用在两块分开一定距离的极板上施加电压,通过极板在电场力的作用下发生变形来实现开关的闭合的。尽管这种力非常微弱,但它是客观存在的。当在两个平行极板上施加电压后,极板相当于一个电容器。将这个电容器的尺寸减小,使得面积和体积比增加,可以显著地增强静电力效应。静电力与电容面积、极板间距及电量成比例。最常见的增大静电力的方法是增大电容面积,以增加极板数量为代表。

电磁驱动是利用带电导线在磁场中受到磁场的影响,受电磁力作用产生运动来实现的。磁铁产生磁场,当电流为 i 的线圈置于这个磁场中就会在电磁力 F 的作用下运动。这种磁铁一般采用永磁体与电磁结合,但是磁性材料必须在制造或沉积过程中使用。电磁驱动方式比静电驱动结构更加紧凑、功率更大,但其工艺复杂,制作成本高,因而电磁式驱动在 MEMS 开关领域并未广泛采用。

压电型驱动是通过电流流过某些晶体时而使晶体产生的形变来运动的。

除了以上这些驱动方式,还有气动型、液压型、生物型以及其他光效应型。随着微涡轮和火箭的进一步发展,化学型驱动将变得越来越重要。

图 1-2 所示为一只蚂蚁同微齿轮;图 1-3 所示为微镜驱动机构和一只蜘蛛的脚。

图 1-4 所示为微驱动机构和一只寄生虫;图 1-5 所示为微驱动机构、微齿轮组和一只寄生虫。图 1-6 所示为微齿轮组和一只蜘蛛;图 1-7 所示为一只蜘蛛和微镜装配示意图。



图 1-2 一只蚂蚁同微齿轮
(Scientific American)

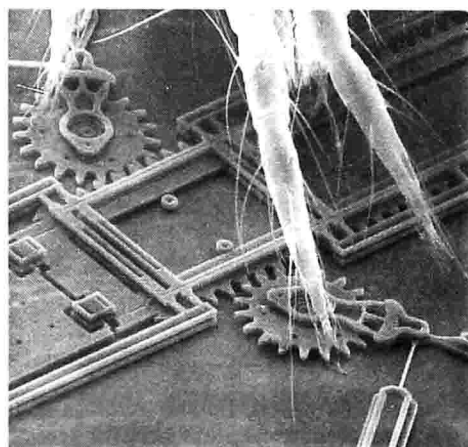


图 1-3 微镜驱动机构和一只蜘蛛的脚
(Sandia 国家实验室)

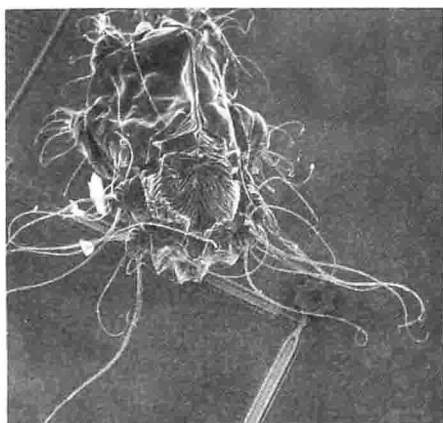


图 1-4 微驱动机构和一只寄生虫
(Sandia 国家实验室)

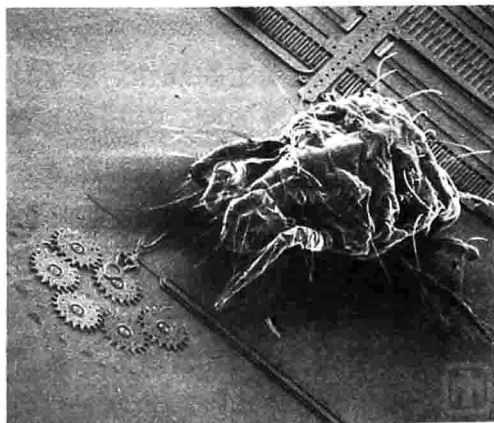


图 1-5 微驱动机构、微齿轮组和一只寄生虫
(Sandia 国家实验室)

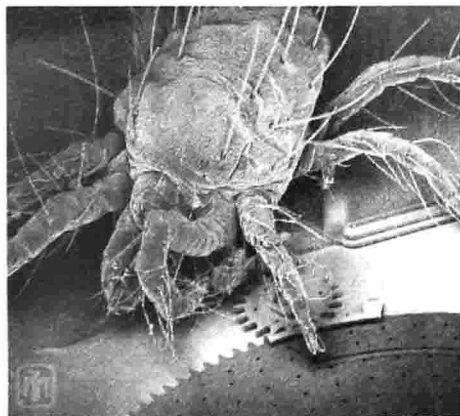


图 1-6 微齿轮组和一只蜘蛛
(Sandia 国家实验室)

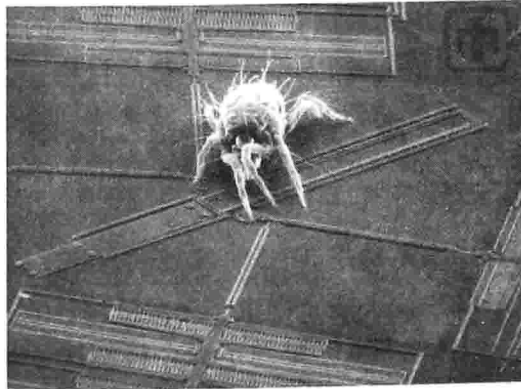


图 1-7 一只蜘蛛和微镜装配示意图
(Sandia 国家实验室)

1.2 MEMS 研究现状

MEMS 的发展,可以追溯到 1959 年的美国物理年会上。诺贝尔物理奖获得者 Richard P. Feynman(1965 年诺贝尔物理奖,主要贡献在对量子电动力学的理解,1988 年死于肾衰竭,终年 69 岁)(参见图 1-8)在该次年会上作了题目为《There is plenty of room at the bottom(实际上大有余地)》的报告。他描述可用大机械来加工比自己小许多的小机械,而该小机械又可以制造更小的微小机械,即是一条 Top-Down 的路径。同时,他还描述了人们可按照自己的方式排列原子、分子,按照人们的意愿构造各种物质,即 Bottom-Up 路径。他还预言了原子信息存储、微观生物操作、量子计算机以及由此造成的微观摩擦润滑问题。Feynman 教授的报告在当时还不被许多人理解,然而现在看来,Feynman 教授的预言大多已经得到 MEMS 研究人员的证实。

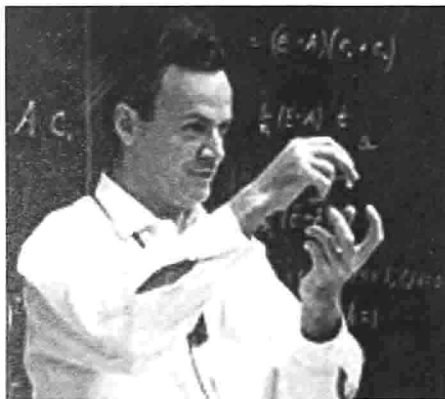


图 1-8 Richard P. Feynman

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。

1. 需求牵引是 MEME 发展的源泉

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迫切需求。信息系统的微型化不仅使系统体积大大减小、功能大大提高,同时也使其性能、可靠性大幅度上升,功耗和价格却大幅度降低。目前,信息系统的微型化不单是电子系统的微型化,如果相关的非电子系统体积小不下来,那么整个系统将难以达到微型化的目标。

电子系统可以采用微电子技术达到系统微型化的目标,而对于非电子系统来说,尽管人们已做了很大努力,其微型化程度却远远落后于电子系统,这已成为整个系统微型化发展的瓶颈。

2. 技术推动是 MEMS 实现的保证

MEMS 技术涉及微电子、微机械、微光学、新型材料、信息与控制,以及物理、化学、生物等多种学科,并集约了当今科学技术的许多高新技术成果。

在一个衬底上将传感器、信号处理电路、执行器集成起来构成微电子机械系统,是人们很早以来的愿望。这个技术设想在 1987 年被正式提出,并在近 10 年来取得了迅速发展,主要原因有以下三点: