



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

微机电系统工程基础

WEIJIDIAN XITONG GONGCHENG JICHU

王琪民 刘明侯 秦丰华 / 编著

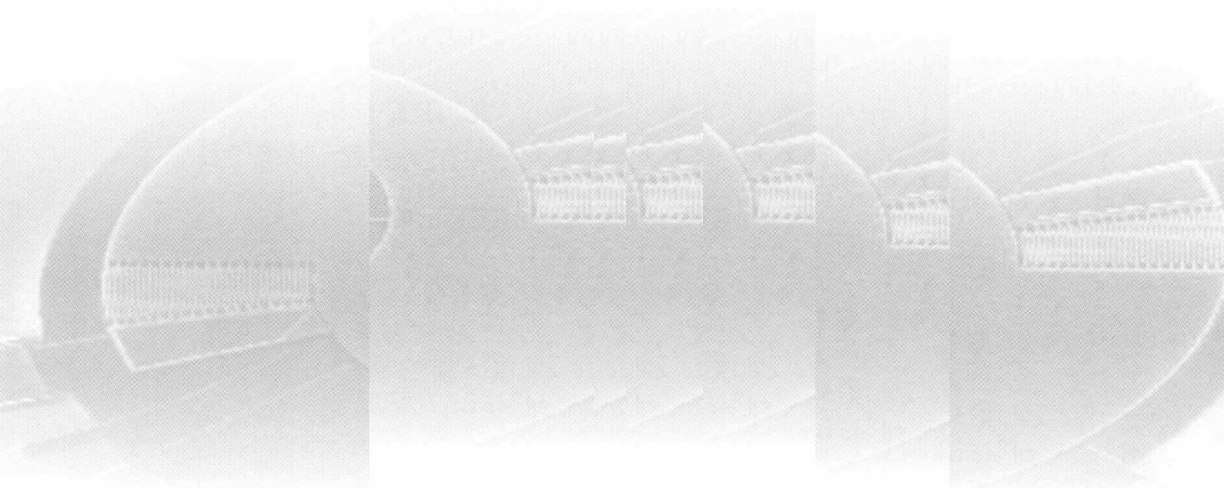
中国科学技术大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

微机电系统工程基础

王琪民 刘明侯 秦丰华 / 编著



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

微机电系统是 20 世纪末兴起,并在 21 世纪初开始快速发展的高科技前沿领域。其所涉及领域不断扩大,相关研究也日趋深入。本书主要介绍相关的工程基础知识。本书共 11 章,较为详细地介绍了半导体制作工艺、执行器、微系统的工作机理及制作方法和应用范围、各种新发展的微检测技术、微系统设计、建模方法和应注意的事项等,还重点介绍了微机电系统的固体力学、微流体力学和微尺度传热的基础知识,分析了微系统中的工程特点,与传统工程科学的区别,传统理论在微机电系统应用中所受到的限制及其修正,微机电系统中常见的失效方式及其应对原则等。

本书可供高等学校相关专业高年级选做本科教育教材,也可以供感兴趣的研究生、科研人员参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

微机电系统工程基础/王琪民,刘明侯,秦丰华编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2010.1

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-312-02468-9

I. 微… II. ①王… ②刘… ③秦… III. 微电机—系统工程—高等学校—教材 IV. TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 043835 号

责任编辑:张善金 吴月红

出版者:中国科学技术大学出版社

地址:合肥市金寨路 96 号 邮编:230026

网址:<http://www.press.ustc.edu.cn>

电话:发行部 0551-3602905 邮购部 0551-3602906

印刷者:中国科学技术大学印刷厂

发行者:中国科学技术大学出版社

经销者:全国新华书店

开本:710 mm×960 mm 1/16 印张:23.75 彩插:4 字数:450 千

版次:2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

印数:1—3000 册

定价:38.00 元

前言

微机电系统(micro electromechanical system),是20世纪末兴起、21世纪初开始快速发展的高科技前沿领域。近年来涉及领域不断扩大:在航天、汽车、生物技术、通讯、国防、环保等诸多领域广泛应用;有关研究日趋深入,其研究内容涵盖:基础研究、设计、工艺、材料、应用器件等诸多方面。它的现实和潜在的应用,会给国民经济和国家安全带来巨大的好处。微机电系统已受到世界各国的广泛重视。

2003年,作者编写了微机电系统的概念性教科书——《微型机械导论》。这本书的出版受到了欢迎:有些高校将此书作为教科书或教学参考书,不少读者来函索要此书,也有读者看到书后,想前来中国科学技术大学攻读相关专业研究生。

5年多过去了,微机电系统的研究和开发日新月异,如:微细加工工艺不断更新、微型器件的尺度进一步变小、崭新机理的微器件层出不穷、实用以至商品化的产品显著增加。

微机电系统涉及的工程基础知识十分广泛,随着科学研究的深入、学科建设发展的需要,学界希望有一本更为全面、系统地介绍相关工程基础知识,了解传统工程学科在微系统应用中的区别、传统理论在应用中需要做哪些限制和修正、微机电系统中常见的失效方式及其应对原则等内容的新书问世,为此我们编写了这本《微机电系统工程基础》。

本书保持了《微型机械导论》的风格:基本思路清晰,基本概念清楚;通俗易懂,深浅适宜;文字通畅,图文并茂;信息量大,覆盖面广;基本定律和分析计算均有定量(公式)描述。

本书第1章为概论,第2章~3章为微机电系统的制作工艺,第4章~6章为常见微型器件,第7章为微检测技术,第9章为微机电系统

的设计与建模。这8章基本保持了《微型机械导论》框架,但对其中内容作了大量的充实和修正,加入了最近几年出现的新概念、新思路和新方法,以便读者对微机电系统的工艺、对微机电系统的各种器件及其应用范围、微检测方法、微器件的设计等有进一步的理解。第8章是微机电系统的固体力学相关基础知识,第10章、第11章,特约流体力学专家秦丰华博士和热科学专家刘明侯博士,分别编写了微流体力学的相关基础知识和微尺度传热的基础知识。在这3章中,我们首先简单介绍了固体力学、流体力学、传热学的基本概念,然后,着重分析微系统中的工程特点及其与传统工程科学的区别。撰写这几章的目的是对学过相关专业知识的读者达到复习、整理的目的,不仅温故知新,而且了解其在微系统中的不同;对于非相关专业的读者,则达到了了解、扩大知识面的目的,并能举一反三——开阔微机电系统的设计思路,寻找解决有关工程问题的途径。

本书被列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材,受到中国科学技术大学工程科学学院和精密机械与精密仪器系领导的热情支持和关心,得到近代力学系流体力学专业的秦丰华博士、热科学和能源工程系刘明侯博士的大力支持与合作。在此笔者一并向他们表示深切的感谢!

我要特别感谢我的先生张培强教授给我的鼓励和支持,他仔细地阅读了本书的第一稿和第二稿,提了不少意见和建议,并参与了修改和全文审校。

本书既可以做高等学校相关专业高年级本科生教材,也可以供感兴趣的研究生、科研人员做参考资料之用。

由于本书涉及内容广泛,多学科知识交叉,而作者水平又有限,再加上微机电系统技术发展十分迅速,书中难免有疏漏和不当之处,欢迎读者指正,作者将不胜感激。

王琪民

2009年8月于合肥

目 录

前言	(i)
第 1 章 微机电系统概述	(1)
1.1 引言	(1)
1.1.1 多年来的期盼	(1)
1.1.2 发生在 20 世纪 90 年代的故事	(2)
1.2 小机械,大机会	(3)
1.2.1 三十年的积累	(3)
1.2.2 第一个丰收的季节	(5)
1.2.3 微型科技发展的动力	(7)
1.2.4 小机械包含着大课题	(10)
1.3 什么是微机电系统	(12)
1.3.1 微机电系统的定义	(12)
1.3.2 微机电系统的尺寸	(13)
1.3.3 微型机械与微电子和普通机械的差异	(14)
1.4 本书内容	(16)
1.5 有关的刊物、会议和网站	(17)
参考文献	(20)
第 2 章 微机电系统的制作(上)	(21)
2.1 引言	(21)
2.1.1 微细机械加工的特点	(21)
2.1.2 关于加工单位的概念	(22)
2.1.3 常用的微细加工方法的分类	(22)
2.2 微型机械中使用的 IC 工艺	(23)
2.2.1 IC 工艺的概况	(23)

2.2.2 IC 工艺的主要步骤	(24)
2.3 硅微结构制作工艺	(38)
2.3.1 体微机械加工技术(Bulk Micromaching)	(38)
2.3.2 键合技术(Bonding)	(52)
2.3.3 表面微机械加工技术(Surface Micromaching)	(55)
2.3.4 封装	(61)
参考文献	(63)
第3章 微机电系统的制作(下)	(64)
3.1 传统的超精密加工方法的概述	(64)
3.1.1 微细磨削加工	(64)
3.1.2 微细磨料加工	(65)
3.1.3 微细放电加工(MEDM)	(66)
3.1.4 金属丝放电磨削加工(WEDG)	(66)
3.2 特种加工工艺	(69)
3.2.1 激光束微细加工技术	(69)
3.2.2 电子束微细加工技术	(70)
3.2.3 聚焦离子束(FIB)微细加工技术	(72)
3.3 LIGA 工艺	(74)
3.3.1 概述	(74)
3.3.2 同步辐射 X 射线光刻	(74)
3.3.3 LIGA 工艺流程	(75)
3.4 快速成型技术	(77)
3.5 用隧道显微镜进行微细加工	(82)
3.5.1 隧道效应与 STM	(82)
3.5.2 其他类型的隧道显微镜	(84)
3.5.3 用隧道显微镜进行微细表面加工	(85)
3.6 最近发展的微纳米工艺	(88)
3.6.1 多光子吸收聚合技术(MAP)	(88)
3.6.2 质子束刻写	(91)
参考文献	(93)

第4章 常见的微型器件(上)——几种典型的微传感器及其工作原理	(95)
4.1 概述	(95)
4.1.1 定义	(95)
4.1.2 传感器工作原理及应遵循的法则和定律	(97)
4.2 传感器分类和性能指标	(97)
4.2.1 传感器的分类	(97)
4.2.2 传感器性能的指标	(97)
4.3 微型力学传感器及其工作原理	(99)
4.3.1 微型力(力矩)传感器(Micro Force(Moments) Sensors)	(99)
4.3.2 微型压力传感器(Micro Pressure Sensors)	(103)
4.3.3 微型加速度计(Micro Accelerometer)	(106)
4.3.4 微型陀螺(Micro Gyroscope)	(111)
4.3.5 微型触觉传感器(Micro Tactile Sensors)	(116)
4.4 微型生物医学传感器(Micro Biological Sensors)	(118)
4.4.1 悬臂梁式生物传感器	(119)
4.4.2 石英晶体微天平传感器(QCM or MQCM)	(124)
4.4.3 光学生物传感器	(128)
4.5 微型图像传感器(Micro Image Sensors)	(129)
4.5.1 CCD 图像传感器	(129)
4.5.2 具有三维结构的固体图像传感器	(129)
4.6 化学传感器	(130)
4.6.1 气敏传感器	(130)
4.6.2 电子鼻	(132)
4.6.3 气相色谱仪	(134)
4.7 微型传感器的特点	(135)
参考文献	(137)
第5章 常见的微型器件(中)——几种典型的微执行器及其工作原理 ...	(138)
5.1 常用微型执行器的致动机理	(138)
5.1.1 静电致动的机理	(138)
5.1.2 压电致动的机理	(140)
5.1.3 热致动的机理	(143)

5.1.4 形状记忆合金致动的机理	(145)
5.1.5 电磁致动的机理	(149)
5.2 几种典型的微型执行器	(149)
5.2.1 微马达(Micro Motors)	(149)
5.2.2 微型阀(Micro Valves)	(153)
5.2.3 微型泵(Micropump)	(157)
5.2.4 其他微致动机构	(161)
5.3 微型执行器的特点和比较	(164)
参考文献	(166)
第6章 常见微型器件(下)——几种典型的微结构和微系统	(167)
6.1 微结构	(167)
6.1.1 微型铰链、微型轴承	(167)
6.1.2 微型弹簧	(168)
6.1.3 微型继电器、微型保险丝	(169)
6.1.4 微探针	(169)
6.1.5 微型人工细胞融合系统	(170)
6.1.6 仿壁虎粘附阵列	(171)
6.2 微型机构	(173)
6.2.1 微型连杆传动机构	(173)
6.2.2 微型齿轮传动机构	(173)
6.2.3 微型链传动机构	(174)
6.2.4 微型平行四边形机构	(174)
6.2.5 微型梳状机构	(175)
6.2.6 柔性机构(微型机器人的手和脚)	(176)
6.3 微系统	(176)
6.3.1 微型数字显示器	(176)
6.3.2 微光纤开关系统	(178)
6.3.3 生物芯片实验室	(179)
6.3.4 纳卫星	(180)
6.3.5 微型飞行器	(181)
5.3.6 微型化学反应系统	(184)

6.3.7 微细作业与装配系统	(185)
6.3.8 微型机器人	(189)
6.4 含有微器件的系统	(191)
6.4.1 汽车安全气囊系统	(191)
6.4.2 数码相机	(192)
参考文献	(193)
第7章 微检测技术	(195)
7.1 微细材料力学特性的检测	(195)
7.1.1 常用材料的力学参数	(195)
7.1.2 细微材料基本力学量的检测	(197)
7.1.3 微摩擦力的检测	(201)
7.1.4 用于 MEMS 的材料实验机	(202)
7.2 微结构应力应变的测量	(209)
7.2.1 位移法测应力应变	(209)
7.2.2 屈服法测应力应变	(209)
7.2.3 偏转法测应力应变	(211)
7.3 微执行器运动速度的检测	(211)
7.3.1 频闪法测转速	(211)
7.3.2 用光纤传感器测转速	(211)
7.3.3 内藏光伏器件测转速	(212)
7.3.4 运动参数测试仪	(212)
7.4 微结构动态参数的识别	(212)
7.4.1 独特的激励技术	(212)
7.4.2 各种检测方法	(215)
7.5 微小几何尺寸测量	(223)
参考文献	(225)
第8章 微机电系统相关的固体力学基础知识	(227)
8.1 固体力学知识简介	(227)
8.1.1 什么是固体力学	(227)
8.1.2 固体力学的研究内容	(227)
8.1.3 固体力学的学科分支	(228)

8.1.4	固体力学在工程中的应用	(228)
8.1.5	固体力学的基本假设	(228)
8.1.6	固体力学的本构方程	(229)
8.1.7	固体力学的研究方法	(230)
8.2	微机电系统中应用的固体力学知识	(231)
8.2.1	梁与板的静力变形分析	(231)
8.2.2	膜片的静载弯曲	(237)
8.3	振动力学知识	(238)
8.3.1	振动的力学模型	(238)
8.3.2	微机电系统中常见的振动分析	(242)
8.4	断裂失效与材料的断裂韧性、疲劳极限	(248)
8.4.1	脆性断裂及断裂韧性	(248)
8.4.2	疲劳断裂	(250)
8.5	表面力与粘附失效	(251)
8.5.1	微结构中表面力的影响	(251)
8.5.2	粘附失效	(252)
8.5.3	微摩擦及其对微结构的影响	(253)
8.5.4	薄膜的残余应力	(254)
8.6	封装及热失效	(255)
8.6.1	封装及其分级	(255)
8.6.2	封装失效	(256)
	参考文献	(257)
第9章	微机电系统的设计和建模	(258)
9.1	微机电系统的设计	(258)
9.1.1	按设计的目的分类	(258)
9.1.2	设计时需要考虑的几个因素	(259)
9.2	关于建模	(259)
9.2.1	建模的概念	(259)
9.2.2	微机电系统建模的级别	(260)
9.2.3	微型机械分级别建模举例	(263)
9.3	微结构建模时应考虑的因素	(274)

9.3.1 非线性	(274)
9.3.2 复合结构	(275)
9.2.3 残余应力	(275)
9.3.4 尺度效应	(276)
9.3.5 耦合效应	(282)
9.4 微机电系统设计实例	(282)
9.5 微机电系统数值分析方法	(293)
9.5.1 有限元方法简介	(293)
9.5.2 常用 MEMS 的设计软件	(295)
参考文献	(296)
第 10 章 微尺度流体力学的相关基础知识	(298)
10.1 引言	(298)
10.2 宏观流体力学基础回顾	(299)
10.3 微尺度流动的基本特征	(300)
10.4 微尺度液体流动	(305)
10.4.1 低渗多孔介质中的微流动	(305)
10.4.2 动电效应与电渗泵	(307)
10.5 微尺度气体流动	(309)
10.5.1 滑移边界条件	(309)
10.5.2 剪切流动	(313)
10.5.3 压力驱动微管道流动	(316)
10.5.4 直接模拟 Monte Carlo 方法	(327)
参考文献	(329)
第 11 章 微尺度传热基础知识	(331)
11.1 引言	(331)
11.2 传热学基本概念	(332)
11.2.1 热传导	(332)
11.2.2 热对流	(338)
11.2.3 热辐射	(339)
11.3 微米介质中的热传导	(341)
11.3.1 传热学尺度效应	(341)

11.3.2	Fourier 定律适用性及各向异性传热	(342)
11.3.3	热传导边界散射效应	(345)
11.3.4	薄膜的 Casimir 极限	(345)
11.3.5	热导率的尺度效应	(346)
11.3.6	薄膜比热容的尺度效应	(348)
11.3.7	接触热阻(薄膜—基底)	(348)
11.4	微尺度对流换热	(349)
11.4.1	连续性假设	(349)
11.4.2	尺寸效应	(351)
11.4.3	非连续性机理	(352)
11.5	微尺度辐射换热	(360)
11.5.1	概述	(360)
11.5.2	辐射类型	(361)
11.5.3	空间微尺度辐射区域划分	(362)
11.5.4	时间微尺度下的辐射现象	(363)
11.5.5	结构微尺度下的辐射现象	(364)
11.5.6	薄膜辐射性质的厚度依赖特性	(364)
11.6	微尺度技术强化传热	(365)
11.6.1	现代电子器件冷却方法	(365)
11.6.2	微尺度通道	(366)
11.6.3	微热管	(367)
参考文献		(369)

第1章 微机电系统概述

一尺之锤，日取其半，万世不绝。

——老子：天下篇

(公元前 571 年至公元前 471 年之间)

1.1 引言

1.1.1 多年来的期盼

两千四百多年以前，老子就指出：一尺长的棍子，可以不断地取其半，虽然所得的长度越来越短，趋近于零但永远不等于零。老子的话说明我们的祖先早就知道微小尺度物体的存在。

自古以来，由于人们对微小世界充满兴趣，就幻想出各种各样的小人儿，通过这些小人儿的故事，来描述人们想象中神奇的微小世界，并希望这些小人儿可以帮助人类去做那些看起来根本做不到的事情。

五百多年前，在我国明代中期的著名小说《西游记》中，孙悟空为保唐僧西天取经，途经火焰山受阻，变成一只小昆虫，钻进铁扇公主的肚子里造反，逼她交出芭蕉扇，就是一例——这可以说家喻户晓，妇孺皆知的故事(图 1.1)。世界各国关于小人国的故事，也是多如繁星。故事中所描述的“小人儿”个个善良、勇敢。这表明它们寄托着人们对真、善、美的追求，也表达了人们渴求借助这些“小人儿”了解微小世界，完成人们难以完成之任务的愿望。

随着社会的发展、科技的进步，人们所幻想的小人儿越来越带有科技的色彩。有名的美国科幻电影《奇异的旅行》就是一个典型的例子。影片描写一个微型潜水艇，在人的血管中逆流而上，一路艰辛奋斗，终于除去了致人性命的血栓，恢复了患者健康的故事。故事中的潜艇就是一个有动力源、有传动机构、有执行机构的、被小机器人控制的微型机电系统(图 1.2)。

一般的科幻故事只是一种幻想，但故事中往往闪烁着智慧的火花，它能打破

人们的思维定式,异想天开地独辟蹊径,给人们以启迪,促使人们去尝试。科幻故事中的微机电系统,确实代表了人们征服困难、探索微小世界奥秘的一种思路,也自然向科技工作者提出了挑战,期待着他们去实现这些幻想,从而推进科技发展,为人类带来福音。



图 1.1 孙悟空变成小虫,钻进铁扇公主的肚子里
(摘自赵仁年,等.《西游记》绘画本, 1999.)

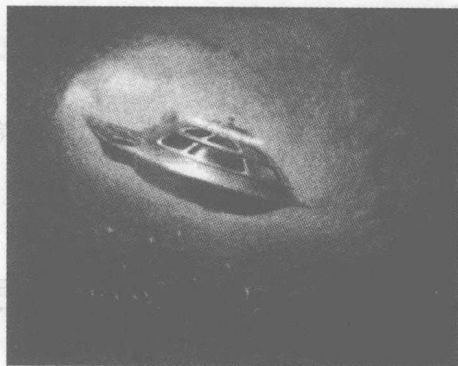


图 1.2 在人血管中前进的微型舰艇
(摘自科幻小说 *Fantasic Voyage* (《奇异的旅行》), 1966)

1.1.2 发生在 20 世纪 90 年代的故事

黄先生患胆结石,医生通知他住院手术,他请了一个月的假。可是星期一他去住院,星期五已看见他笑呵呵地出院了。原来,医生只在他腹部开了 4 个钥匙孔般大的小口,插入腹腔镜、手术工具、光源和 CCD 摄像头,医生边看着监视器,边遥控操纵手术,不足一小时,就取出了结石,贴上几片防止皮肤感染的“创可贴”就宣告手术成功地结束了。

陈师傅开小轿车时,不幸与对面卡车相撞,在这起事故中大难不死。原因是在两车相撞的一刹那,陈师傅轿车中一个小得几乎看不见的加速度计,感受到振动的信号而迅速启动了车上的气囊开关,打开的气囊,避免了强烈冲击对他造成的伤害。

国外有的专家把微型摄像系统固结在蟑螂身上,刺激蟑螂让它钻进地震后的废墟,通过观察微型摄像机传回来的图像信号,在砖头和倒塌的建筑物缝隙里发现受害人的踪迹,使营救人员可以及时地找到救护对象。

上述故事已经不再是科学幻想,而是 20 世纪 90 年代初微型科技的一批研究成果,这些成果好像是东方地平线上出现的一缕曙光。正如在晴朗的早晨,人们等待着在美丽的朝霞后有一轮喷薄欲出的太阳一样,我们确信,这缕科技曙光将预示着一场重大科技革命的到来。

1.2 小机械,大机会

《小机械,大机会》(*Small Machines, Large Opportunities*)是 1988 年美国出版的一本小册子的题目。这个诱人的标题提醒我们,微型机械可能会为科技发展带来很大机会。

简单回顾一下微型机械发展的历史,也许会加深我们对这种提法的理解和认同。

1.2.1 三十年的积累

微型科技的设想可追溯到四十多年前。早在 1959 年 12 月的美国物理学会议上,诺贝尔奖获得者、著名物理学家理查德·P·费依曼博士(Richard P. Feynman)曾作过一次极富远见且具有开拓性的重要报告。他报告的题目是“*There Is Plenty of Room at the Bottom*”,即《实际上大有余地》。报告中,他描述了微型机械制造技术,可用大型机器来制造比自己体积小的机器,而这较小的机器又可制造更小的机器,这是一条从 Top 到 Down 的由宏观到微观的发展途径。同时,他还论述了人们还可以按照希望的方式排列原子,即人们可以以原子、分子为模块来构筑各种物质,这是一条不同于 Top-Down 的发展途径,而是一条由小到大的,即 Bottom-Up 的新路。也许,当时就用他设想的方法制造微型机械并使之商品化,还有许多具体的困难,但这掩盖不了他报告中闪光的论断——他天才地预见了微型机械和纳米技术的出现。

微型机械的起源还与工业的发展和各学科的交叉有关,其中关系最密切的是半导体集成电路和固态传感器。

1947 年科学家率先发明了半导体晶体管。

20 世纪 50 年代末、60 年代初,开发了半导体集成电路工艺。这样,科技工作者们就可在微米尺

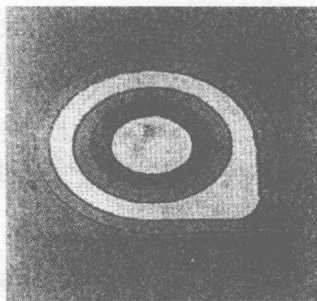


图 1.3 第一个平面晶体管
(Fairchild, 1958)

度上大规模制作出电子元器件及各种各样的电路来(见图 1.3)。

在此期间,1954 年史密斯发现了半导体的电阻率在应力作用下会发生变化,即压阻效应。1958 年,人们用单晶硅制作了半导体应变片,将其粘贴在弹性体上(一定部位)^①,通过测量其应变,就可计算出弹性体所受的外力,其灵敏度是金属应变片的数十倍。

1962 年第一个硅压力传感器问世,美国科技工作者研制了扩散硅压力传感器。他们利用半导体集成电路的平面工艺,在硅片上光刻、扩散敏感电阻,而在硅的背面用研磨工艺加工出凹坑,形成 C 型膜片,也称“硅杯”。被测压力作用在硅片上使硅膜变形,改变硅膜正面的敏感电阻的阻值,再由电参数可推算出压力的大小。这种传感器的特点是:单晶硅既作为微电子材料(敏感电阻),又作为弹性体的机械结构材料(可变形的硅膜);又由于敏感电阻和弹性体制作在同一硅片上,消除了粘贴应变片所带来的误差;另外,还可以在硅片上制作补偿电路,使传感器的精度大大提高。图 1.4 所示为早期小型硅膜片式压力传感器,其直径为 1.27 mm,可测压力 $5 \text{ lbf/in}^2 \sim 500 \text{ lbf/in}^2$ ^② 动态压力频率可达 200 kHz。

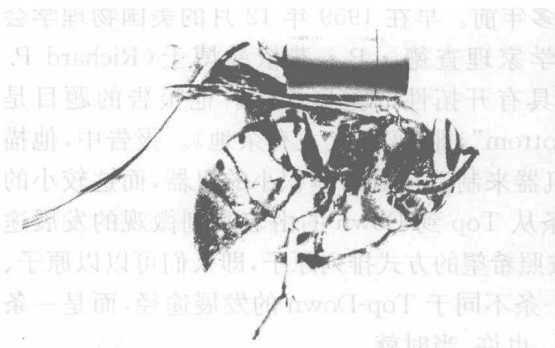


图 1.4 早期小型硅膜片式压力传感器
(摘自《英国安特公司产品说明》)

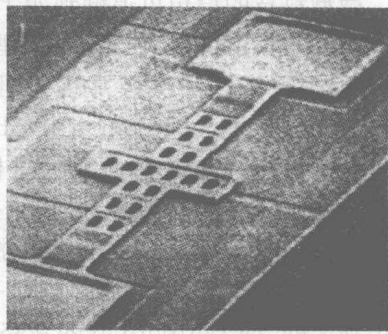


图 1.5 第一个硅梁
(Howe & Muller, 1982)

20 世纪 70 年代中期,美国 Kulite 公司率先在硅片的背面形成氧化硅或氮化硅掩膜,再利用各向异性腐蚀技术(代替机械研磨)制作传感器的硅膜,并用静电

① 此处本该用“黏”,《现代汉语词典》中注有“粘”同“黏”,一般力学类图书中,习惯于用“粘”。为遵从习惯,本书该用“黏”处一律用“粘”。

② lbf/in^2 ——磅力每平方英寸,为非法定计量单位, $1 \text{ lbf/in}^2 = 6894.757 \text{ Pa}$ 。由于是引用资料,故未作换算。后文类似之处,不再说明。