

Vijay K.Varadan
〔美〕 K.J.Vinoy 著
K.A.Jose
赵海松 邹江波 译

RF MEMS 应用指南

RF MEMS and Their Applications



WILEY



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

RF MEMS 应用指南

RF MEMS and Their Applications

Vijay K. Varadan

[美]

K. J. Vinoy

著

K. A. Jose

赵海松 邹江波 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要包括：微机电系统和射频、MEMS 材料和制造工艺、RF 开关与微型继电器、MEMS 电感和电容、微电机 RF 滤波器、微机械移相器、微机械传输线及部件、微机械天线、RF MEMS 的集成与封装。

本书可供从事微制造技术的人员阅读，也可作为相关专业人员的参考用书。

All rights reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Ltd.

本书简体中文专有翻译出版版权由 John Wiley & Sons, Ltd. 授予电子工业出版社。未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字：01-2003-7873

图书在版编目 (CIP) 数据

RF MEMS 应用指南/ (美) 瓦达 (Varadan, V.K.), (美) 文尼 (Vinoy, K.J.), (美) 乔斯 (Jose, K.A.) 著; 赵海松, 邹江波译. —北京: 电子工业出版社, 2005.11

书名原文: RF MEMS and Their Applications

ISBN 7-121-01750-4

I. R… II. ①瓦… ②文… ③乔… ④赵… ⑤邹… III. 微电机—指南 IV. TM38-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 104670 号

责任编辑: 雷洪勤

印 刷: 北京市海淀区四季青印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 19.5 字数: 496 千字

印 次: 2005 年 11 月第 1 次印刷

印 数: 5 000 册 定价: 35.00 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

译者序

随着信息化时代的到来,信息传输量急剧增加,对信息精密度的要求也不断提高。为避免射频频段的拥挤,促使传输信道向毫米波、亚毫米波甚至光波频段发展,如通信领域中的局域多点分布网络(LMDSs)采用的频率为 28GHz,工业、科学及医学(ISM)网络和无线局域网络(WLANs)选用的频率更高达 60GHz。另外,为获取空间及地球的各种信息,各类技术先进的航天飞行器,包括不同用途的高、低轨道卫星,载人飞行器,深空探测器等应运而生,近年还出现了超小型的微纳卫星和编队飞行的微卫星。无论是地面无线通信网路还是空中的飞行载体,对通信、测控、导航及数据传输等设备的体积、重量和功耗都提出了更加苛刻要求。而实现这些要求的唯一可行途径就是发展 MEMS 和 RF MEMS 产业,提高系统的集成度。

近年来, MEMS 制造技术的惊人进展,推动了不同领域中新器件的出现,同样也使得微波及毫米波部件的研制和系统集成达到了一个新的水平。RF MEMS 不是指工作在 RF 频段的传统 MEMS 部件,而是对 RF 集成电路所进行的 MEMS 设计和制造。本书在系统讲述了 MEMS 的发展历史过程,主要设计方法和生产工艺之后,重点介绍了在微波、毫米波乃至亚毫米波频段,如何对 MEMS 中的三种基本结构形式—基础薄膜、基础桥和基础悬臂进行设计和制造;并分章节详细介绍了它们在射频开关、电感及可变电容、滤波器、移相器、微波传输线以及微机械天线中的应用。微波和毫米波频段的 MEMS 设计,除了体积小所带来的固有困难外,还必须要考虑器件结构和电路布局所带来的互耦、色散、多模及寄生辐射、欧姆损耗和反射损耗等因数带来的衰减;此外,还必须满足不同部件的特殊指标要求。本书在相关章节中,除了对器件的建模进行了理论分析外,还对器件的电特性进行了全面的微波分析和计算,给 RF MEMS 的设计和制造指明了方向。本书选用了近 10 年来发表的 600 余篇参考文献,全面反映了 MEMS, RF MEMS 在设计技术,制造技术和材料研制上的最新动态和成果。可以说,“RF MEMS AND THEIR APPLICATION”是一本内容新颖、全面,具有很高实用价值的参考书。

本书的主要作者 Vija K.Varadan 博士是美国宾西法尼亚州州立大学和阿肯色州州立大学的知名电子工程教授,长期从事 MEMS, NAMS 和生物芯片的研究。他取得了 12 项专利,编辑出版了 11 本专著并发表过大量学术文章。本书取材于他在宾州大学的 RF MEMS 高级教程,书中也包含了他本人的多项研究成果。

北京遥测技术研究所是一个具有 50 年所龄,专门从事遥测、遥控及各类电子产品开发的研究所; MEMS 是所里重点发展的主要技术之一。我们组织翻译这本书,目的在于为推动我国 MEMS 和 RF MEMS 的研究和产业化做点贡献。

本书由我所赵海松,邹江波共同翻译,由邹江波翻译第二章。由于书中内容涉及的知识面较广,错误之处在所难免,诚恳希望广大读者指正。

北京遥测技术研究所

所长

李兆华

序 言

过去 20 年中, 个人无线通信装置市场的惊人扩展, 改变了微波和毫米波领域的研究方向, 使它的研究重点从传统的国防产品研制转到了消费产品的应用开发。从而, 产品数量得到了成倍增加, 对产品的操作功能要求也大幅度减少。这样一来, 就给微机电系统 (MEMS) 创造了条件, 为它在众多现代和将来的射频 (RF)、微波和毫米波系统中的应用铺平了道路。这些被称为 RF MEMS 的部件, 虽然涵盖了几乎所有小型化装置, 但它们却都不外乎是要么按微机械方式运转, 要么用微机械技术制造, 要么二者兼备。十分幸运的是 MEMS 的处理技术在过去几年中已经取得了长足的进步, 使我们越来越偏重于它们在微波和毫米波乃至光波系统中的应用。MEMS 除了具有便于批量生产和产品小型化等优点之外, 还经常能够凭借这些优点构建出优于常规产品的高效系统来。

为克服现有部件中所出现的固有限制, RF 及微波应用中的微机械和 MEMS 基础系统应运而生。将 MEMS 为基础的制造技术融合到微波及毫米波系统中去的激励因素甚多, 但仍大致可以归结为以下三个方面。第一, 随着频率的增加, 微波器件的尺寸将变得更小; 毫米波系统中的大多数部件的体积就必然会降至亚毫米范围。这样一来, 就出现了发展高精密制造技术的需要, 而微机械则恰好能为此开辟出一条切实可行的道路。此外, 微机械技术还给系统集成带来了可能性。第二, 在较低频段 (波长为 $1\sim 2\text{cm}$), 微机械技术应用在微带天线衬底上, 向着为降低有效介电常数的方向发展。将微机械技术应用于衬底, 不仅改善了天线的辐射效率, 而且还增加了带宽。许多 MEMS 微波部件都旨在降低插入损耗和增加带宽。第三个因素来源于采用表面微机械的部件, 如 RF 开关, 可调电容器和微电感等。普通 RF 开关系统, 如 PIN 二极管开关, 是无法在较高频率上应用的。最近, 已有报道介绍了只需极低致动电压的 MEMS RF 开关。在微波频段, 微机械集总元件能够替代分布单元; 这样, 既便于集成又能改善带宽。与此相似, 微机械或 MEMS 移相器也能够替代在高 GHz 频段插损很高的现有结构。还可以看到, 微制造技术能帮助实现 10MHz 以上的高 Q 微机械滤波器, 而微机械声表面波 (SAW) 滤波器所填补的频率空白已高达 2GHz。上述部件的制造工艺及优点在本书中都会广泛地涉及。另外, 为了使内容更完整, 本书还简要介绍了部件的封装处理办法。

我们极力推荐书中这些题目, 目的是为了激起毕业生们对微制造技术及其应用的兴趣, 并投入到相关的研究中来。因此, 我们期待本书的有关章节能够成为电子和机械工程系、应用物理或材料科学系的课程内容。本书也适用于本领域的研究工作者, 作为他们开拓视野的一本参考书。

本书取材于宾西法尼亚州州立大学新近在 RF MEMS 方面创办的高级教程, 以及它在世界各地所开办的众多短期培训班课程。课程合作者们为充实本书的内容提出过许多有价值的建议, 为此再次向他们表示衷心的感谢。

我们还要特别感谢我们的同事和学生 Taeksoo Ji, Yanan Sha, Roopa Tellakula, Hargsoon Yoon 和 Bei Zhu, 感谢他们在电子和声学材料及器件中心为本书手稿的筹备所做的贡献。

我们衷心感谢 Vasundana V. Varadan 和 Richard McNitt 教授, 感谢他们的支持和鼓励。同时, 也感谢我们的家属, 特别是 Nisy John, 感谢她在手稿准备过程中所表现出来的大度

和耐心。我们还要感谢为本书的引证工作做出贡献的众多研究人员。

需要感谢的还有出版界朋友们，感谢他们在本书的策划过程中所给予的支持、鼓励和援助。

Vijay K. Varadan

K.J. Vinoy

K.A. Jose

目 录

第 1 章 微机电系统 (MEMS) 和射频 MEMS	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 MEMS	(2)
1.3 MEMS 的微制造	(4)
1.3.1 硅的本体微机械	(4)
1.3.2 硅的表面微机械	(6)
1.3.3 MEMS 模片焊接	(7)
1.3.4 LIGA 工艺	(8)
1.3.5 聚合物 MEMS 部件的微机械	(10)
1.3.6 三维结构的微制造	(11)
1.4 机电换能器	(12)
1.4.1 压电换能器	(14)
1.4.2 电致伸缩换能器	(16)
1.4.3 磁致伸缩换能器	(17)
1.4.4 静电执行器	(18)
1.4.5 电磁换能器	(21)
1.4.6 电动换能器	(22)
1.4.7 电热执行器	(24)
1.4.8 各种电子机械致动方案比较	(25)
1.5 MEMS 中的微型传感	(27)
1.5.1 压阻传感	(27)
1.5.2 容性传感	(27)
1.5.3 压电传感	(28)
1.5.4 谐振传感	(29)
1.5.5 声表面波传感器	(29)
1.6 MEMS 中的材料	(31)
1.6.1 MEMS 用的金属及金属氧化物	(32)
1.6.2 MEMS 用的聚合物	(32)
1.6.3 MEMS 用的其他材料	(32)
1.7 本书的涉及范围	(33)
参考文献	(34)
第 2 章 MEMS 材料和制造工艺	(40)
2.1 金属	(40)
2.1.1 蒸发	(40)
2.1.2 溅射	(41)

2.2	半导体	(42)
2.2.1	电性能和化学性能	(42)
2.2.2	生长和淀积	(44)
2.3	MEMS 薄膜以及淀积方法	(46)
2.3.1	热氧化形成的氧化物膜	(47)
2.3.2	二氧化硅和氮化硅的淀积	(47)
2.3.3	多晶硅薄膜淀积	(49)
2.3.4	铁电薄膜	(49)
2.4	MEMS 系统中的聚合物材料	(50)
2.4.1	聚合物的分类	(51)
2.4.2	紫外线辐射固化	(56)
2.4.3	MEMS 中的 SU-8 聚合物	(60)
2.5	硅基 MEMS 的体微机械加工	(63)
2.5.1	各向同性和方向相关的湿法刻蚀	(63)
2.5.2	干法刻蚀	(66)
2.5.3	掩埋氧化物工艺	(66)
2.5.4	硅熔融键合	(66)
2.5.5	阳极键合	(68)
2.6	硅表面微机械加工	(68)
2.6.1	牺牲层工艺	(68)
2.6.2	牺牲层工艺中的材料系统	(69)
2.6.3	离子刻蚀的表面微机械加工工艺	(70)
2.6.4	与集成电路技术结合和各向异性湿法刻蚀	(70)
2.7	聚合物 MEMS 的微立体平版印刷术	(70)
2.7.1	扫描微立体平版印刷技术	(71)
2.7.2	双光子微立体平版印刷术	(71)
2.7.3	聚合物 MEMS 的表面微机械加工	(73)
2.7.4	投影方法	(73)
2.7.5	聚合物与硅、金属、陶瓷综合架构的 MEMS	(76)
2.7.6	微立体平版印刷术与薄膜平版印刷术的整合	(78)
2.8	结论	(78)
	参考文献	(78)

第 3 章 RF 开关与微型继电器 (83)

3.1	引言	(83)
3.2	开关的参数	(84)
3.3	开关基础知识	(87)
3.3.1	机械开关	(87)
3.3.2	电子开关	(88)
3.4	开关在 RF 和微波中的应用	(88)

3.4.1	机械 RF 开关	(89)
3.4.2	PIN 二极管 RF 开关	(90)
3.4.3	金属氧化物半导体场效应晶体管和单片微波集成电路	(93)
3.4.4	RF MEMNS 开关	(94)
3.4.5	RF 开关的集成和偏压馈电	(96)
3.5	MEMS 部件的致动机构	(96)
3.5.1	静电开关	(96)
3.5.2	低压致动开关的探讨	(106)
3.5.3	水银接触开关	(110)
3.5.4	磁开关	(111)
3.5.5	电磁开关	(111)
3.5.6	温控开关	(113)
3.6	双稳微继电器和微致动器	(114)
3.6.1	微继电器中的磁吸合	(114)
3.6.2	继电器的接触力与材料	(117)
3.7	开关工作的动态过程	(118)
3.7.1	开关时间和动态响应	(119)
3.7.2	门槛电压	(121)
3.8	MEMS 开关的设计、建模与评估	(122)
3.8.1	电子机械有限元分析	(123)
3.8.2	RF 设计	(123)
3.9	MEMS 开关的设计要点	(131)
3.10	结论	(132)
	参考文献	(134)
第 4 章	MEMS 电感和电容	(141)
4.1	引言	(141)
4.2	MEMS/微机械无源器件: 优点和缺点	(141)
4.3	MEMS 电感	(142)
4.3.1	自感和互感	(142)
4.3.2	微机械电感	(145)
4.3.3	电感布局的影响	(149)
4.3.4	减少平面杂散电容的措施	(152)
4.3.5	改进品质因子的方法	(154)
4.3.6	折合式电感器	(161)
4.3.7	平面电感的建模和设计中的问题	(162)
4.3.8	可变电感器	(164)
4.3.9	聚合物基础电感器	(164)
4.4	MEMS 电容	(165)
4.4.1	MEMS 间隙调整电容器	(166)

4.4.2	MEMS 面积调整电容器	(171)
4.4.3	介质可调电容器	(173)
4.5	结论	(174)
	参考文献	(178)
第 5 章	微机械 RF 滤波器	(185)
5.1	引言	(185)
5.2	机械滤波器的建模	(187)
5.2.1	谐振器的建模	(187)
5.2.2	机械滤波器的一般原理	(197)
5.3	微机械滤波器	(198)
5.3.1	静电梳状致动装置	(198)
5.3.2	梳状致动型微机械滤波器	(200)
5.3.3	静电耦合梁结构微机械滤波器	(203)
5.4	声表面波滤波器	(206)
5.4.1	声表面波滤波器的工作原理	(207)
5.4.2	压电材料衬底上的波传播	(208)
5.4.3	交指换能器的设计	(209)
5.4.4	单相位单向换能器	(210)
5.4.5	声表面波器件: 功能、限制和应用	(211)
5.5	体声滤波滤波器	(212)
5.6	毫米波微机械滤波器	(213)
5.7	结束语	(216)
	参考文献	(216)
第 6 章	微机械移相器	(219)
6.1	引言	(219)
6.2	各类移相器和使用限制	(219)
6.2.1	铁氧体移相器	(220)
6.2.2	半导体移相器	(220)
6.2.3	铁电体薄膜移相器	(221)
6.2.4	各类移相器的使用限制	(221)
6.3	MEMS 移相器	(222)
6.3.1	开关延迟线移相器	(222)
6.3.2	分布式 MEMS 移相器	(223)
6.3.3	聚合物基础移相器	(227)
6.4	铁电体移相器	(229)
6.4.1	分布式平行板电容器	(229)
6.4.2	双向交指移相器	(231)
6.4.3	交指电容移相器	(234)
6.5	应用	(234)

6.6 结论	(235)
参考文献	(235)
第7章 微机械传输线及部件	(239)
7.1 引言	(239)
7.2 微机械传输线	(239)
7.2.1 传输线的损耗	(241)
7.2.2 共面传输线	(242)
7.2.3 微屏蔽和薄膜支撑传输线	(244)
7.2.4 微屏蔽电路部件	(249)
7.2.5 微机械波导部件	(251)
7.2.6 微机械定向耦合器	(253)
7.2.7 微机械混频器	(253)
7.2.8 无源器件: 谐振器和滤波器	(256)
7.2.9 微机械天线	(256)
7.3 设计、制造和测量	(257)
7.3.1 设计	(258)
7.3.2 制造	(258)
7.3.3 鉴定	(259)
7.4 结论	(259)
参考文献	(260)
第8章 微机械天线	(265)
8.1 引言	(265)
8.2 微带天线综述	(265)
8.2.1 微带天线的基本特性	(266)
8.2.2 微带天线的设计参数	(268)
8.3 改进天线特性的微机械技术	(271)
8.4 小天线的微机械制造工艺	(275)
8.5 可重新组合的微机械天线	(278)
8.6 结束语	(280)
参考文献	(280)
第9章 RF MEMS 的集成与封装	(283)
9.1 引言	(283)
9.2 MEMS 封装的作用	(283)
9.2.1 机械支撑	(284)
9.2.2 电气界面	(284)
9.2.3 环境隔离措施	(284)
9.2.4 热考虑	(285)
9.3 MEMS 封装的类型	(285)
9.3.1 金属封装	(285)

9.3.2	陶瓷封装	(285)
9.3.3	塑料封装	(286)
9.3.4	多层膜封装	(286)
9.3.5	埋封式覆盖	(287)
9.3.6	圆片级封装	(287)
9.3.7	微屏蔽和自封装	(288)
9.4	倒装式组装	(289)
9.5	多芯片组件的封装	(291)
9.6	RF MEMS 封装: 可靠性问题	(294)
9.6.1	封装材料	(294)
9.6.2	MEMS 部件与微电子器件集成	(295)
9.6.3	布线与互连	(296)
9.6.4	可靠性和关键故障机理	(296)
9.7	散热问题	(297)
9.8	结论	(297)
	参考文献	(298)

第 1 章 微机电系统 (MEMS) 和射频 MEMS

1.1 引言

过去 10 年中,新开发出的几项制造技术推动了微机电系统 (MEMS) 的普及,造就了科学及工程不同领域中大批新颖部件。微波及毫米波系统就是这些领域中的一个。将 MEMS 技术应用于微波领域,可以解决无线通信高频技术环节中所遇到的种种亟待解决的问题。个人通信装置的飞速发展刺激着市场对小型化高效部件的需求,而适应这一形势的惟一出路就是发展射频 (RF) MEMS。

RF MEMS 一词来源于采用 MEMS 技术对 RF 集成电路进行设计和制造,我们不应该把它理解为工作在 RF 频段的传统 MEMS 装置。RF MEMS 中的 MEMS 部件可以用来对类似电容器、开关和滤波器等离散器件或部件进行致动和调整。传统的 MEMS 一般被分为两类: MEMS 执行器和 MEMS 传感器。第一类属于运动机械类,像微型马达一样,靠电信号进行激励。微型传感器现在已在众多领域中获得了应用;由于它容易制造,历史上,它是最早获得应用的微型系统。除了制造上的问题之外,执行器未能获得普及的另一个原因是,这种微小系统所产生的能量不够,不足以对与之相关联的系统起作用。但是,后来发现,就微波和毫米波而言,它们所产生的力度已足以去改变整个系统的特性。无源器件包括本体微机械传输线、滤波器和耦合器;有源器件包括开关、调谐器和可变电容器。虽然磁力、热力,甚至以气体为基础的微执行机构不断得到了发展,但时至今日,静电吸附依然是用于致动芯片表面这些结构中的最典型的电力。

按照 Brown (1998) 的经典回顾文章,RF MEMS 发展到今天,既可以按照 RF,也可以按照 MEMS 来分成下述几种类型。

(1) RF 外延型 (RF extrinsic)。该类中的 MEMS 结构定位于 RF 电路和 RF 电路中用于致动或控制的其他部件之外;其实例有:可调微带传输线和与之相关联的移相器和移相器阵。由于易于采用自动化技术进行生产,微带线已成了一种连接高速电路和各部件的一种用得最广泛的传输线。

(2) RF 本征型 (RF intrinsic)。该类中的 MEMS 结构定位在 RF 电路之中,具有致动电路和 RF 电路双重功能。静电微型开关和梳状电容器 (Brown, 1998) 中的经典的悬臂型和薄膜型 MEMS 结构可以看成该类中的典型范例。随着电激聚合物 (EAP)、多功能智能聚合物及微立体平版印刷术的出现,此类 RF MEMS 已能轻易地用聚合物衬底基础系统表现出来。这些系统是可塑、稳定和耐久的,并且还能与有机薄膜晶体管集成在一起。

(3) RF 反应型 (RF reactive)。该类中的 MEMS 结构定位在内部,具有通过耦合对 RF 进行衰减的功能。容性耦合可调滤波器和谐振器,为电路提供这种所需的 RF 电路功能。薄介质膜上的微波及毫米波平面滤波器显示低损耗特性,适合用做低价格、紧凑和高性能的毫米波单片集成电路。

最早报导体硅基 RF MEMS 技术的微波应用装置是微波开关中的表面微机械执行器。这些开关以静电吸附为基础,具有很高的线性率,所需的待用 dc 功率低而且插损小 (Larson,

1999)。工作中, 静电吸附力与梁的相应机械力相平衡, 把开关推到一个所需的合适位置上。该开关要设计成接通时能在宽频带范围内保持接近 50Ω 的阻抗, 断开时则接近全开路。这种优越的性能使它成了微波应用中的优选物。被报导的还有包括空气桥在内的其他几种新型开关结构。空气桥结构通过非常大的电容变化来获得开关功能, 需要的致动电压高是这种结构的最大缺陷。

MEMS 技术还可以应用到 RF 可变电容领域, 可以用它替代变容二极管来进行调谐。只要制造方法选择合适, 就可以使纵向或横向平行板电容器的电容量发生变化。这种平行板电容器方案的电容变化范围可达 3:1, 很适合用来对单片电压控制振荡器 (VCO) 进行宽频带调谐; 但这种调谐范围经常会受到结构的低频谐振的限制。

1.2 MEMS

所谓 MEMS, 指的是一批微传感器和执行器, 这些传感器和执行器能感知它周围的环境, 并且还能通过微电路控制去改变这种环境。它们除了拥有一般的微电子封装之外, 还包含着对天线结构和微型电子机械结构的集成。天线结构用来获取指令信号, 而微型电子机械结构则是为了使系统获得理想的感知能力和执行能力。该系统可能还需要配备微功率源、微型继电器和微信号处理单元。微型元件能使系统工作速度更快、更可靠和价格更便宜, 还能使系统具有更加复杂的功能。

20 世纪 90 年代初, 随着集成电路 (IC) 制造工艺的发展, MEMS 被逐步浮现出来。当时, 传感器、执行器以及控制功能单元已能制造在同一块硅片上。从那时开始, 在政府部门和工业界强有力的支持下, MEMS 在研究上获得了长足的进步。除了商业化的类似微加速度计、喷墨打印机头以及投影显微镜等小规模集成 MEMS 部件外, 人们还就众多领域中更为复杂的 MEMS 部件的应用提出了自己的看法, 并验证了它们的可行性。这些应用领域包括: 微射流技术、航天、生物医学、化学分析、无线通信、数据存储、显示技术及光学等。由于存在着巨大的潜在市场, 某些 MEMS 分支, 如微光电子机械系统 (MOEMS), 微型整体分析系统 (μ TAS) 等均吸引了众多部门的研究兴趣。20 世纪 90 年代末期, 大多数带有各种感知与执行机械的 MEMS 部件都采用硅本体微机械, 表面微机械和 LIGA 工艺进行制造。为适应某些特殊要求 (如生物医学部件) 及对 MEMS 微执行器高功率输出的需要, 在现代 MEMS 中, 已经采用了三维微制造工艺和更多相关的应用材料。

今天, 微机械工艺已经成了制造微电子机械部件及一些特殊小型化传感器和执行器的一项基本技术。硅片微机械工艺是其中最成熟的微机械技术之一, 它也可以用来制造亚毫米级的 MEMS 部件。借助显微成形的方法, 在硅片或非硅片衬底上制造机械部件, 能使结构具有三维特性, 给设计者带来一种全新的设计手段。设计者们设想着采用类似单晶硅、多晶硅和氮化硅等不同材料制造各种微机械微型结构, 其中包括梁、薄膜、槽、小孔、弹簧、齿轮、悬臂, 以及一大批其他复杂的机械结构。

有时, 许多微型装置也可以采用半导体工艺或立体平版印刷术, 在聚合物多功能结构体上进行制造。立体平版印刷, 简称 LIGA, 用于制造高纵横比 MEMS 部件, 所用衬底材料是可进行紫外固化处理的半导体聚合物。用普通掺杂技术合成聚合物结构材料后, 通过立体平版印刷, 就可以制造出具有高纵横比的三维微型结构。Ikuta and Hirowatari 说明了聚合物及金属三维微型结构, 可以采用称之为 IH (集成硬化聚合物立体平版印刷) 的工艺方法获得。它们使用紫外光源, XYZ 三维工作台、光阀门、透镜及微型计算机, 向人们表示

出, 类似弹簧、脉阀门及静电微执行器等微型装置都能够用该法制造出来。在采用聚合物材料进行制造遇到困难时, 部分部件可以在硅片上进行微机械制造, 而整体系统结构则可以采用光电成形工艺或混合工艺来获得。光电成形或光电制造是一种类似立体平版印刷、光掩膜分层工艺及 IH 工艺的光学方法, 其中包含用曝光的方法对光化学树脂进行固化的过程。Takagi 和 Nakajima (1993) 提出了一种称为“合成结构 (combined architecture)”和“胶合机理 (glue mechanism)”的新概念。它们采用光电工艺制造出综合各部件的复杂结构, 而这些部件都是用最佳工艺制造成形的。看起来, 采用这种方法对类似硅-聚合物这样的混合部件进行批处理似乎是可行的。

合成结构也可以由一些智能表面层构成, 该表面层上集成了许多微米至毫米级的传感器和执行器。对于某些应用 (如机翼蒙皮) 来说, 这种智能表层衬底的外形必须与应用体 (机翼) 的形状相一致, 与此同时, 它还必须与集成传感器和智能电子器件的 IC 工艺兼容。Carraway (1991) 一直建议选用聚矽亚胺。他认为这种材料具有良好的可塑性和与 IC 工艺的兼容性, 是一种很适合用做表层的优秀材料。在该系统中, 传感器与执行器之间的控制环采用了多种多功能材料, 它们通过相应的导电聚合物和电极, 在所选位置上体现各自的电功能特性。系统拥有多个本地天线, 它们与各自对应的控制电极相连, 用来与中心天线进行数据交换。至今为止, 该系统还存在许多相关难于处理的问题, 如一直基本处于无人研究状态的数据遥测方法问题; 在某些应用场合, 因结构处于受挤、拉状态时, 可能出现的铺设规范问题, 以及因周围环境的影响, 可能使系统的特性发生改变的问题等。发展超平天线技术及与之相关的 MEMS 传感器/执行器, 可能是解决这些问题的有效手段。采用微机械和微电子工艺, 可以在单芯片上集成出称之为智能传感器的产品。这种智能传感器能对小信号进行放大、调整并转换成标准格式。它可以包括微控制器、数字信号处理器、专用集成电路 (ASIC)、自测试电路、自标校电路及总线接口电路; 这种芯片简化了操作使用过程, 并且精度更高也更可靠。

标准 MEMS 所利用的结构形式有: 基础薄膜、基础微型桥及基础悬臂。微机械中, 一些熟知的特殊工艺步骤都需要首先将这些薄膜、悬臂梁和谐振结构制造出来。在下面的章节中, 我们将对它们逐一进行介绍。就具体应用而言, 可能会要求对一个或多个这类基本结构进行 MEMS 集成。这三种结构给传感器和执行器提供了一些可行的设计, 使它们能在大多数智能结构中实现最终所需要的功能。在完成这些结构的过程中, 遇到的主要问题是对制造材料的选择和对微机械技术的应用。为找出问题的关键, 我们注意到, 所有这三种结构都是打算应用外加电场来激励压电晶体以获得感知和致动的。这种通过激励所获得的感知和致动, 要么利用薄膜的延伸或微型桥结构中独立梁的延伸; 要么采用悬臂梁结构。在前两种情况中, 薄膜或独立梁延伸的结果变成了向上的弯曲, 因而就使得系统从未受致动时的平衡状态变成单纯向上的位移。对于悬臂梁来说, 电场形成后, 致动是靠悬臂末端向上的位移形成的。显然, 在微执行器中, 以上三种设计的运动部件 (薄膜、自由固定梁和悬臂梁) 的系统结构材料至少要含有一层压电层和在该层上生成电场的一对导电电极。上面提到的许多应用, 都是利用压电的力量来进行致动的。而薄膜、悬臂梁和各种谐振器等结构件, 都采用微机械加工进行制造。

微传感器和执行器都是采用微电子工业中所熟悉的微机械加工技术来完成的。聚合物结构上的三维微执行器结构可采用立体平版印刷术在可紫外固化的构架型聚合物上进行制造。在集成 MEMS 部件时, 我们可以按照 Takagi and Nakajima (1993) 所提出的办法, 采用照相成形工艺将传感器和执行器结构结合在一起。对于大的致动来说, 一种可行的办法是采用挠性应力换能器 (Chin, Varadan and Varadan, 1994), 它由桥接到空腔中去的压电薄膜构成。

过去 10 年中, 硅片的微机械加工一直是 MEMS 取得巨大进步的关键因素, 但这种进步也同时得益于在非硅片衬底以及新近出现的其他材料上所进行的显微部件精加工。采用这种加工办法可制造出许多有特色的部件, 如: 两端固定梁、薄膜、悬臂梁、槽、小孔、弹簧、齿轮、悬挂结构等。将这些部件进行组装, 就可以制造出各种各样的传感器。本体微机械加工是普遍采用的一种办法, 但它却正在被表面微机械加工所取代; 因为后者提供一种很有吸引力的可能性——采用微电子技术将机械部件集成在一起, 可以将它们的图形制造和组装都放在同一块芯片上完成。信号处理电路和电源电路也可以共享一块专用集成电路芯片。这种具有吸引力的处理方法在许多方面体现出了其效能, 如封装工序就可以采用现有的技术来完成。

1.3 MEMS 的微制造

硅微机械一直是 MEMS 取得巨大进步的关键因素。硅微机械涉及硅片衬底或非硅片衬底上的显微精加工机械部件。硅微机械由以下两项技术构成: 本体微机械技术和表面微机械技术。本体微机械技术将结构直接刻蚀在硅片衬底上; 表面微机械技术是一种多层微机械结构技术, 微机械层面由淀积在表面的多层膜构成。

本体微机械和表面微机械是硅片的两种主要微机械工艺。在硅片的微制造中, 通常都要进行硅晶片键合。LIGA 和三维 (3D) 微制造一直是 MEMS 高纵横比结构及 3D 结构的制造方法。

1.3.1 硅的本体微机械

本体微机械技术开发于 20 世纪 60 年代, 该技术可以从衬底上选择性地去除一定数量的硅, 以在芯片的一个面上形成一层薄膜和各种各样的沟槽、孔及其他结构形状 (见图 1.1)。本体微机械技术可以根据刻蚀剂的形态分成硅湿刻和硅干刻两种。液态刻蚀剂几乎都含有独特的液态化学成分, 采用它进行的刻蚀称为湿刻; 而采用气体或等离子体所进行的刻蚀则称为干刻。

本体微机械是两种微机械技术中最成熟的一种。它出现在 20 世纪 60 年代早期, 从那时起, 就一直被用来进行各种微结构的制造。商品部件中的大多数都是采用这种技术制造的, 它包含了几乎所有的压力传感器、阀门和 90% 的加速度计。本体微机械这一名称来自于下述事实: 这类微机械技术只用于对硅片材料进行选择性地去除 (刻蚀) 后所形成的单晶硅片本体上的微机械结构加工。采用本体微机械技术所制造的微型结构的厚度, 可覆盖从亚毫米到整个芯片厚度 (200~500 μm) 的范围, 横向尺寸可覆盖从亚毫米到整个芯片横向尺寸的范围。

对于硅片这种厚度的衬底通常采用下述刻蚀剂来进行各向异性刻蚀: 氢氧化钾 (KOH), 乙二胺-焦儿茶酚 (EDP), 四钾基氢氧化铵 (TMAH) 和联氨水。

这些刻蚀剂对硅片不同的晶体方向具有不同的刻蚀率。在大多数情况下, 晶片的正面采用的是等离子干刻而反面采用的则是湿刻。近几年来, 一种称之为 SCREAM (单晶硅活性刻蚀及金属化) 的本体微机械技术, 能将各向同性和各向异性结合起来, 用来蚀造垂直墙面。刻蚀工艺可以通过掺杂的办法来使它具有选择性 (重掺杂区的刻蚀速度慢), 或者阻止电化学的继续进行 (举例来说, 如遇上加偏压的 p-n 结上的不同极化区时, 刻蚀动作就会停止)。使湿刻速度趋于变慢或者作用变弱的区域称为 “刻蚀-停止” 区。有几种办法可以用来建立刻蚀停止区, 如掺杂-选择刻蚀 (DSE) 和依靠偏压的 DSE 等。

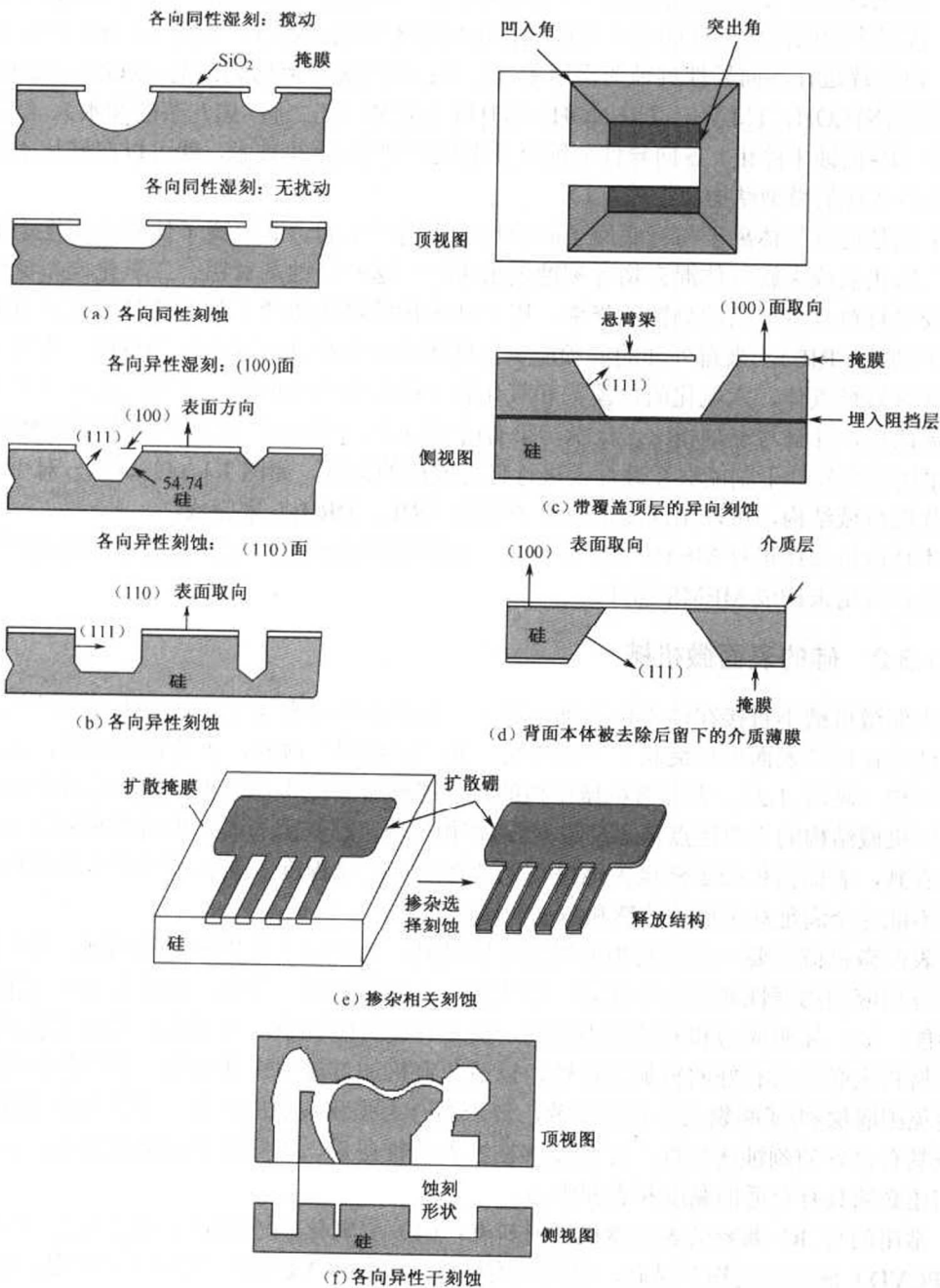


图 1.1 本体微机械

湿刻是将衬底浸入刻蚀槽中浸泡或者用刻蚀剂向衬底喷雾，所用刻蚀剂可以是酸性的也可以是碱性的。视材料结构和刻蚀剂的不同，既可以进行各向同性刻蚀也可以进行各向异性刻蚀。如果材料是非晶体或多晶体，湿刻通常是各向同性的，如图 1.1 (a) 所示。进行各向同性刻蚀（刻蚀剂微酸性溶液）时，抗蚀通常存在于下切过程中，这意味着对 MEMS 而言，深切是不太实际的。对单晶硅可以进行各向异性刻蚀，其刻蚀特性取决于它的刻蚀