

硅微机械传感器

**Mechanical
Microsensors**

M. Elwenspoek
R. Wiegerink

著

陶家渠 李应选 万达
刘佑宝 沈文正 白丁

译

刘佑宝 审校

硅 微 机 械 传 感 器

M. Elwenspoek 著
R. Wiegerink

陶家渠 李应选 万达 译
刘佑宝 沈文正 白丁
 刘佑宝 审校

中国宇航出版社

Translation from the English language edition:

Mechanical Microsensors by M. Elwenspoek and R. Wiegerink

Copyright (C) Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001

Springer-Verlag is a company in the BertelsmannSpringer publishing group

All Rights Reserved

本书中文简体字版由著作权人授权中国宇航出版社独家出版发行,未经出版者书面许可,不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

版权所有,侵权必究

本书版权登记号:图字:01-2002-5505

图书在版编目(CIP)数据

硅微机械传感器/(荷)埃尔文斯波克,(荷)威杰林克著;陶家渠,李应选等译.——北京:中国宇航出版社,2003.9

ISBN 7-80144-606-2

I. ①硅... II. ①埃...②威...③陶...④李... III. ①传感器,微型 IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第047528号

出版 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路8号 邮编 100830

网址 www.caphbook.com / www.caphbook.com.cn

经销 新华书店

发行部 (010)68373103 (010)68373185 (传真)

承印 北京飞达印刷有限公司

版次 2003年9月第1版 2003年9月第1次印刷

规格 880×1230 开本 1/32

印张 10 字数 311千字

书号 ISBN 7-80144-606-2/TP·239

定价 35.00元

本书如有印装质量可与发行部调换

·版权所有 翻印必究·

中译本序

微机电系统(MEMS)是一个新兴的、多学科交叉的高科技领域,它所研究的内容和手段涉及微电子、微机械、材料、制造、信息与控制、物理、化学和生物等多种学科,其研究成果在国民经济中有广泛的应用前景。在国防方面,鉴于现代战争对武器装备的微型化、智能化和信息化的要求越来越高,更激发和促进了 MEMS 技术的发展。

目前 MEMS 产品中研制最多、应用最广的是硅微机械传感器。为了促进我国在这一领域的研究,中国航天电子基础技术研究院组织部分科技人员翻译了这本由荷兰 Twente 大学的 Miko Elwenspoek 和 Remco Wiegerink 合著的《Mechanical Microsensors》。该书篇幅不是太长,叙述由浅入深、结合实际,内容比较全面,包括了 MEMS 介绍、微机械加工工艺、膜和梁的力学、机械变形换能、力和压力传感器、加速度和角速度传感器、流体传感器、谐振传感器、接口电路,以及 MEMS 封装,非常适合高等院校相关专业的师生和从事硅微机械传感器研究的工程技术人员参考。

全书共分 11 章,其中序言、第 1~3 章由李应选翻译、第 4 章由陶家渠翻译,第 5、11 章由白丁翻译,第 6、10 章由万达翻译,第 7、9 章由刘佑宝翻译,第 8 章由沈文正翻译。刘佑宝主审校,所有翻译者参与审校讨论,李应选终审统稿。由于译者水平有限,书中如果存在错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

江 帆

2002 年 12 月

原 序

这本关于硅微机械传感器的书是在作者给一个短训班讲课的讲义基础上写成的。这个短训班是由位于瑞士 Neuchâtel 市的瑞士微技术研究基金会(FSRM)组织的,在此对 FSRM 的支持表示衷心的感谢。

本书有两个目的。首先,它对硅微机械传感器(用硅微机械加工工艺实现的压力传感器、力学传感器、加速度传感器、角速度传感器和流体传感器)作了一个概述。第二,作为一本教科书,本书就这些传感器的基本的设计技术向工程师们作了一个全面的介绍。从事传感器设计的工程师们通常接受的是电气工程或机械工程方面的教育。这些传统的教学计划已不足以使他们能应对设计传感器这样的任务的挑战,因为传感器是一种连通多种学科的仪器设备,因此需要工程师们对机械学和电子学都有深入的了解。本书包含与微机械传感器相关的基本工程科学的讨论,在某种意义上希望被不同背景的工程师们所接受。大学三年级或四年级的工科学生应该具备足够的知识来读懂这本书中的论点。从这个意义上讲,本书应该能用作大学生微机械传感器课程的教科书。目前,本书正在用作 Twente 大学的教科书。

衷心感谢对本书的编写给予不同形式支持和帮助的同事们。这就是处于领先地位的 Twente 大学微机械研究小组的所有成员: Han gardeniers, Theo Iammerink, Gijs Krijnen, Erwin Berenschot, Meint de Boer, Dick Ekkelkamp, Hans Hassink, Cees van Rijn, Wietse Nijdam, Remco Sanders, Henk van Wolferen, Gui Chengun, Peter Leussink, Johannes Burger, Niels Tas, Edwin Oosterbroek, Willem Tjerkstra, Stein Kuijper, Robert Zwijze, Theo Veenstra, Erik van Veenendaal, Jasper Nijdam, Henk Wensink, John van Baar, Joost van Hon-schoten, Marko Blom, Han van Egmond, Albert van den Berg, Jaap van Suchtelen,

2 硅微机械传感器

Henri Jansen, Hans-Elias de Bree, Cristina Neagu, Frans Blom, Frans van de Pol, Siebe Bouwstra, Wim Hendriks, Harrie Tilmans, Albert Prak, Cees van Mullem, Vincent Spiering, Gert-Jan Burger, Rob Legtengerg, Joost van Kuijk, Jan van Vlerken, Edwin Smulders, Bob Haverkort, Thijs van Thor, Jan-Cees te Riet-Scholten, Hans Ijntema, Michiel Hamberg, Job Elders。他们中的许多人参与了审读。然而,如果书中还有什么错误的话,则一律由作者负责。我们还要特别地感谢微机械研究小组的前任教授和 MESA + 研究所的前任所长 Jan Fluitman。

Miko Elwenspoek

Remco Wiegink

2000 年 7 月于 Enschede

目 录

第 1 章 引言	(1)
第 2 章 MEMS	(5)
2.1 微型化和系统	(5)
2.2 MEMS 的例子	(6)
2.2.1 气泡喷嘴	(7)
2.2.2 激励器	(9)
2.2.3 微型泵	(10)
2.3 小和大:按比例缩小	(13)
2.3.1 电磁力	(14)
2.3.2 库仑摩擦	(16)
2.3.3 机械强度	(16)
2.3.4 动态特性	(18)
2.4 已有的制造技术	(21)
2.4.1 基于光刻的技术	(21)
2.4.2 传统技术的小型化	(23)
第 3 章 硅微机械加工工艺	(25)
3.1 光刻	(25)
3.2 薄膜淀积和掺杂	(26)
3.2.1 二氧化硅	(27)
3.2.2 化学汽相淀积	(28)
3.2.3 蒸发	(30)
3.2.4 溅射淀积	(32)
3.2.5 掺杂	(32)
3.3 湿法化学腐蚀	(33)
3.3.1 各向同性腐蚀	(34)
3.3.2 各向异性腐蚀	(35)
3.3.3 腐蚀停止	(38)

3.4 圆片键合	(42)
3.4.1 阳极键合	(42)
3.4.2 硅熔合键合	(44)
3.5 等离子体刻蚀	(46)
3.5.1 等离子态	(46)
3.5.2 各向异性等离子刻蚀模式	(49)
3.5.3 刻蚀装置	(50)
3.5.4 黑硅方法	(54)
3.6 面微机械加工工艺	(55)
3.6.1 薄膜应力	(56)
3.6.2 粘接	(57)
第 4 章 梁和膜的力学	(60)
4.1 质量块 - 弹簧系统的动力学	(60)
4.2 弦	(64)
4.3 梁	(66)
4.3.1 应力和应变	(66)
4.3.2 弯曲的能量	(67)
4.3.3 曲率半径	(69)
4.3.4 一根有弹性的梁的拉格朗日函数	(70)
4.3.5 梁的微分方程	(71)
4.3.6 梁的边界条件	(73)
4.3.7 例子	(74)
4.3.8 力学稳定性	(76)
4.3.9 梁的横向振动	(78)
4.4 膜片和薄膜	(81)
4.4.1 圆形膜片与薄膜	(82)
4.4.2 正方形薄膜	(84)
附录 4.1 桥的弯曲	(85)
第 5 章 机械量的测量原理:形变的转换	(86)
5.1 金属应变片	(86)
5.2 半导体应变片	(87)

5.2.1 在单晶硅中的压阻效应	(88)
5.2.2 多晶硅薄膜的压阻效应	(88)
5.2.3 从形变到阻值的转换	(90)
5.3 电容式传感器	(91)
5.3.1 机电学	(91)
5.3.2 膜片压力传感器	(94)
第 6 章 力和压力传感器	(97)
6.1 力传感器	(98)
6.1.1 负荷元	(101)
6.2 压力传感器	(106)
6.2.1 压阻式压力传感器	(107)
6.2.2 电容式压力传感器	(111)
6.2.3 力补偿压力传感器	(118)
6.2.4 谐振式压力传感器	(120)
6.2.5 小型微音器	(125)
6.2.6 触觉成像阵列	(128)
第 7 章 加速度和角速度传感器	(131)
7.1 加速度传感器	(131)
7.1.1 引言	(131)
7.1.2 体微机械加工工艺制作的加速度计	(133)
7.1.3 面微机械加速度计	(135)
7.1.4 力反馈	(141)
7.2 角速度传感器	(144)
第 8 章 流体传感器	(151)
8.1 层状流边界层	(151)
8.1.1 Navier-Stokes 方程	(151)
8.1.2 热传输	(155)
8.1.3 流体动力学边界层	(156)
8.1.4 热边界层	(160)
8.1.5 表面摩擦与热传输	(163)
8.2 限于很小雷诺数情况下的热传输	(166)

8.3 热流体传感器	(170)
8.3.1 风速计型流体传感器	(171)
8.3.2 双热丝风速计	(179)
8.3.3 测热型流体传感器	(180)
8.3.4 声强传感器——微流计	(186)
8.3.5 热脉冲传输时间流体传感器	(192)
8.4 表层摩擦力传感器	(193)
8.5 “干流体”传感器	(198)
8.6 “湿流体”传感器	(204)
第 9 章 谐振传感器	(207)
9.1 基本原理及物理机理	(207)
9.1.1 引言	(207)
9.1.2 棱形微桥的微分方程	(209)
9.1.3 利用拉普拉斯变换求解齐次、无阻尼问题	(210)
9.1.4 利用模态分析求解非均匀问题	(212)
9.1.5 对轴向负载的响应	(215)
9.1.6 品质因数	(217)
9.1.7 非线性大幅度效应	(218)
9.2 激励和检测机制	(220)
9.2.1 静电激励与电容检测	(221)
9.2.2 磁激励与检测	(221)
9.2.3 压电激励与检测	(221)
9.2.4 电热激励与压阻检测	(222)
9.2.5 光热激励与光检测	(222)
9.2.6 介质激励与检测	(222)
9.3 例子和应用	(223)
第 10 章 电子电路接口	(226)
10.1 压阻传感器	(227)
10.1.1 惠斯顿电桥结构	(227)
10.1.2 电桥输出电压的放大	(229)
10.1.3 噪声和失调	(231)

10.1.4 反馈控制环	(232)
10.1.5 与数字系统的接口	(233)
10.2 电容传感器	(237)
10.2.1 阻抗电桥	(237)
10.2.2 电容控制振荡器	(241)
10.3 谐振式传感器	(244)
10.3.1 谐振式传感器的频率依赖特性	(244)
10.3.2 振荡器实现	(244)
10.3.3 单端口与双端口谐振器比较	(246)
10.3.4 基于单端口电静态驱动梁谐振器的振荡器	(247)
10.3.5 基于双端口电动态驱动 H 型谐振器的振荡器	(252)
第 11 章 封装	(254)
11.1 封装技术	(255)
11.1.1 标准封装	(255)
11.1.2 芯片安装方法	(257)
11.1.3 圆片级封装	(258)
11.1.4 互连技术	(260)
11.1.5 多芯片模块	(261)
11.1.6 密封工艺	(262)
11.2 应力减小	(263)
11.3 压力传感器	(264)
11.4 惯性传感器	(265)
11.5 热流体传感器	(266)
附录 英汉名词对照	(268)
参考文献	(278)

第 1 章 引 言

硅微传感器在压力、加速度、角速度和流体等领域的应用正在高速增长,因为微机械加工工艺已经成为一项比较成熟的技术。这些传感器被大量地用在汽车、工艺控制、医学和科学仪器等领域。过去几年(20 世纪 90 年代中期)的市场研究已经预测到,对这些传感器的需求将会有一个巨大的增加。最近对于微组件在市场上的前景预测表明(除了机械传感器喷墨打印机头和硬盘头之外)仅在欧洲每年就有 1 000 亿美元的市场。

压力传感器的生产成本已经降到每只 1 美元以下。可以期望类似的情况还会在加速度传感器和角速度传感器上发生。这个巨大的发展首先归因于微型传感器的制造方式。这种制造技术是从集成电路的制造技术发展而来的,每一个单件的成本大致上与所生产的产品的总数成反比。这种生产方式被称为“批处理”,即在同一时间制造大量的组件。基本上是采用刻蚀技术、薄膜淀积和圆片键合技术对硅片进行加工。这个制造方法现在被称为“硅微机械加工工艺”。硅微机械加工工艺已经变得可靠,这也是微型传感器商业成功的第二个重要原因。

机械传感器(不包括某些种类的流体传感器)的工作原理依赖于结构的机械形变(薄膜的挠曲或梁悬挂的质量),这个形变被转换为电信号。

硅之所以被选作机械传感器的最优材料是由于它超乎寻常的机械性能。对于传感器来说,人们需要一个可重复产生的信号,这意味着对于机械传感器而言,它的结构在受到同样的负载时必须以同样的方式形变。

因此人们需要一种没有机械回滞和蠕变的材料。回滞是由于材料的屈服,换句话说是由塑性形变引起的。硅在弹性形变前就会失效,至少在室温下是这样。事实上,使硅失效的应力大大超过了不锈钢的屈服应力。从这一点来说,硅比所有的金属都强得多。然而要注意,这并不意味着在所有类型的结构中硅比钢强。如果钢在结构的某一点上受到超过屈服强度的应力,它就形变,直到没有什么地方受到的应力超过屈服强度。在这种情况下整个结构不会失效。硅结构与此完全不同:如果硅中某一点的应力超过屈服点,硅就失效,并且结构断裂。硅的这种特性(脆性)对于传感

器来说是有优势的:如果传感器过载,它就断裂,根本无法工作,而不是给出一个错误的信号。

感知可重复产生的机械形变的另一个重要特性是蠕变。这是一种现象,见于所有的材料,表现为一个结构在恒定的外负载作用下持续形变。例如,一个加在弹性形变的弹簧上的负载被去掉后,弹簧并不能立即恢复到它的初始长度,只是近似于初始长度,从这个长度它再慢慢“蠕变”回它的初始长度。这种现象即使在负载比较小,没有任何地方的应力超过屈服强度的情况下也会发生。这是一个过程,它会持续数分钟甚至数小时。就蠕变而言,单晶硅属于最好的材料之列,这个效应在每百万十个零件量级。蠕变的数量取决于样品的几何形状。Bethe 的研究揭示出,对于细薄的悬臂梁结构,硅和其他材料的蠕变变得非常严重(Bethe, 1989)。

可以用许多方法来测量由机械力导致的机械形变。这些方法包括利用压电特性、电阻器几何图形的变化或电阻器的应变导致的电阻的变化、电容的变化、结构中振荡元件谐振频率的变化,以及光学共振的变化。

硅不是压电材料,因此要将一个形变通过压电效应转换为电信号就需要其他材料,这些材料通常以薄膜的形式出现。截至目前尚没有可靠的用于这个目的的薄膜材料。另一方面,石英是压电材料,也确实有用石英材料做的微机械传感器。但本书主要讨论硅传感器。

在常规传感器中,应变片的使用非常普遍。导体的电阻由其几何形状决定,因此组装在形变体上的导体将提供有关形变的信息。半导体有一个附加的材料效应:电导率由材料中的应变决定。这个效应被称为压电电阻效应。对应于每一次应变,电阻的相对变化被称为应变灵敏度系数。对于常规的金属应变片来说,应变灵敏度系数在 1 的量级,而硅的压阻效应将硅的应变量的应变灵敏度系数增加到 100 量级。压阻效应的缺点是,它随温度的变化而变化。

传感器中的振动元件谐振应变片也扮演着应变片的角色。谐振传感器的优点源于以下几个吸引人的特点:1)输出信号是频率,一个频率变化为数字信号要容易得多,无须经过 AD 转换器即可将信号送入计算机;2)作为一个信号,频率与幅值(如电压)相比其抗干扰能力更强;3)振动微桥可以取代应变片,它们有比金属或压阻应变片更高的分辨率。我们知道在市场上有两种硅谐振传感器。一种是由 Druck 公司制造的,它基于 John

Greenwood 的一个设计(Greenwood, 1984)。另一种是由 K. Ikeda(1990)设计, Yokogawa Electric 公司销售的。硅谐振传感器的缺点是不易制造(这使得它们相当昂贵),工艺尚不成熟。高的成本也许可以用新的、更简单的机械结构和简单的电子元件来补偿。

测量一个物体机械形变的第三个重要的方式是测量导体上电荷分布的容量变化。电容取决于几何形状,因此对组装到形变物体上的导体的电容的任何测量将得到有关它的形状信息。相对于压阻传感器,电容传感器有几个优点:它们对温度的变化不太敏感,灵敏度更高,这是由它的机械结构决定的,这种机械结构我们将会在第5章中看到,然而电子线路会更复杂。

微传感器中有一类,尽管属于机械传感器,但并不总是依赖于机械形变,这就是流体传感器。这类传感器中有许多依赖于热效应,需要一个加热器,并测量温度,温度可以是加热器自身的,也可以是它周围介质的。流体流动会改变温度的分布。也有一些流体传感器,其形变是由流体在感知元件上产生力而导致的,这是因为液体流动会引起剪切力、阻力和压力梯度。

设计一个传感器是一项艰巨的任务。因为这涉及到从基本的器件物理、它与周围环境的相互作用、它的制造到电子接口、电子电路和封装等系统级的课题。这本书有双重的功能:它既是一个回顾,又是大学生微机械传感器课程的教科书。我们试图将所有与执行这一使命相关的部分都写进来。我们期望读者有基本的数学知识,特别是矢量和微积分方面的知识。这本书也可供所有具有基本工程经验(机械和电气工程,物理和化学)的工程师和科学家阅读。这意味着我们在推导基本模型的时候从相当基础的基本原理开始,然而我们又利用相当高级的数学知识,这些数学知识是一个工科大学生在完成第二年学业后应该掌握的。

我们试图对目前的所有微机械传感器作一个全面的综述,主要强调基本的思路。我们从定性和定量两个层次来描述传感器的功能。

我们从对 MEMS 的描述展开讨论。MEMS 是英文微机电系统(micro-electromechanical systems)的缩略语,传感器是这个领域的一个分支。更重要的是传感器常常是 MEMS 的一部分。这一章也包含对按比例缩小的一个总结,让读者感受一下当尺寸缩小时我们所处的世界的变化。紧接着是对硅微机械加工工艺的一个回顾。这一章是本书的作者之一与 Henri

4 硅微机械传感器

Jansen 合著的《硅微机械加工工艺》(Elwenspoek and Jansen, 1998)一书的浓缩。制造技术自然是微传感器设计的基础之一。后面两章主要讨论机械形变的理论和微机械传感器两种最重要的能量转换机理,即常说的压阻式和电容式。紧接着的章节描述传感器自身:压力传感器,力学传感器,加速度传感器,角速度传感器和流体传感器。这些章节的最后一章包括一些流体和热传导的基本理论。接下来一章描述从技术的角度来说最先进、从系统设计的角度来说最复杂的谐振传感器。最后两章描述传感器的接口电路和封装技术。

第 2 章 MEMS

在技术领域有一股很强的小型化的趋势。这个趋势一方面来自于小的组件和系统工作方式不同这样一个事实：小系统可以做大系统不能做的事情(例如极小的导入手术)。在许多情况下,小型化可以使系统更方便(例如 GSM 手机)。另一方面,来自 IC(集成电路)制造工艺的技术发展使得低成本、大批量地生产小型组件(例如汽车和喷墨打印机上的压力传感器)成为可能。

小型化技术是从大量的制造方法发展而来的,比如我们提到过的 IC 制造方法。但在大学和公司的许多小组正研究如何采用更加传统的机械加工方法,如切割、钻孔、喷砂、火花电蚀、模压、铸造、注模等派生而来的技术来制造小系统。在这本书中,我们只关注硅微机械加工工艺和可以由这种工艺制造的微机械传感器。

2.1 微型化和系统

用来表述微机械组件和系统科学的基本概念有两种:微系统技术(MST,这个概念最初起源于德国)和微机电系统(MEMS,发明于美国)。与 MEMS 更专注于机械组件不同,MST 还包括微光系统、化学传感器、分析系统等。然而在所有的微系统中,必须实现机械和机电功能。因此实际上,两种概念的大部分互相重叠。在这两种概念中重要的字眼是系统,在这里系统是相对组件而言。微型系统毕竟也是系统,因为它具有系统的每个小细节。人们不可能用货架上的东西组装一个微系统。例如一个工厂要制造一辆轿车,轿车是一个相当复杂的系统,原则上整个车的设计是能采用现成的组件(发动机、传动装置、门、窗、车轮等)来实现。这些组件都可以买到或按照设计者的要求制造,然后进行组装。对于微型系统这个过程是不可能实现的。首先,组件太小不能以合适的成本将它们组装到一起,况且,没有可以装配到一起的组件。在设计一个微系统时,必须在设计整个

系统时设计组件。你无法将系统设计阶段与组件设计阶段分开:微系统的设计是一个集成的过程。而且,微系统的制造也是一个集成过程。这个过程由硅微机械加工工艺提供,我们将在后面多次举例说明这个设计和制造过程。

经过一个痛苦的历程,我们已经知道,就微传感器而言,敏感元件、电子接口电路和封装(如果你愿意,还有机械接口)必须作为一个整体来进行设计,这是系统的第一个层面。在大多数情况下,在设计完系统中的—个组件后再设计另一个会导致传感器不能封装,或封装费用太高。

第二个系统层面是扮演了一个主要角色的制造工艺。微机械加工工艺是非常复杂的,而且还没有研究出—种标准的工艺,工艺空间有很大—部分领域尚待探索。在设计—个微系统时,也必须设计该系统的制造工艺。因此,系统设计和工艺设计被集成为—个—统—的设计过程。所以微系统的设计师必须有大量的技巧和多方面的经验。这与 IC 的设计和工艺制作有很大的不同。对于 IC 工艺来讲,有严格和清楚的设计规则来指导设计者,他不需要关心电路到底是怎样制造成的。微系统的设计师必须两者都能设计:系统和制造工艺。

第三个系统层面是微系统通常有复杂的功能。这些功能源于不同的物理域。对于传感器来说,这一点是清楚的:传感器必须从—个特定的专业领域(化学、机械、热)传递信号到电学领域。当然—个传感器的设计者必须了解与传感器端口有关的那些领域。举—个例子:在—个压力传感器中,膜发生变形,而变形的程度是对压力的测量,这个传感器的设计师必须要知道膜的机械特性;膜的挠度可以用光干涉仪来测量,在这种情况下,设计师还必须知道光学;另外,设计师必须知道如何处理它的小的电信号,如何放大它,如何实现它与计算机的接口,为此他还必须具有电子学的知识。因此传感器的设计师是万事通。实际上,他们必须与不同专业领域的工程师—起工作,充分理解其他的学科以便能进行交流。

2.2 MEMS 的例子

由于这本书专门讨论微传感器,我们就不扩大范围讨论其他的微系统,像激励器、微结构、微型机器人等。在这里我们给出—些例子。我们发