



硅微机械传感器

Mechanical Microsensors

郑志霞 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

硅微机械传感器

Mechanical Microsensors

郑志霞 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

内 容 提 要

本书围绕硅微机械传感器的基本原理、工艺技术、应用领域及接口电路等几个方面展开介绍和讨论。主要内容有:微机械系统的发展历史、现状、应用领域及前景;硅的物理、化学、机械特性;微机械传感器的主要工艺技术和特殊工艺的研究;常见微机械传感器结构;硅微机械压力传感器、加速度传感器、角速度传感器、热流体传感器的基本原理、结构设计、工艺过程及应用等;常见传感器的接口电路;微机械传感器的封装技术及几种常见微传感器的封装。

本书可供从事微机械传感器、光电子技术、通信技术、精密仪器与检测技术等教学、科研、工程技术人员以及高等院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

硅微机械传感器/郑志霞著. —杭州:浙江大学出版社, 2012. 12

ISBN 978-7-308-10879-9

I. ①硅… II. ①郑… III. ①传感器 IV. ①TP212. 12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 286748 号

硅微机械传感器

郑志霞 著

责任编辑 李玲如(11r8798@zju.edu.cn)

封面设计 王聪聪

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州教联文化发展有限公司

印 刷 富阳市育才印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 13

字 数 316 千

版 次 2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-10879-9

定 价 35.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

前 言

人类已进入信息化时代,信息通过传感技术获取,它是信息化时代的重要内容之一。传感技术的水平直接影响检测控制系统和信息系统的技术水平,是一个国家科技发展水平的重要标志。近年来国内外都将传感器技术列为尖端技术而倍加重视,并投入大量人力、物力进行开发和研究。伴随着电子技术的发展,传感器已从单一的物性型向多功能、高精度、高质量、集成化方向发展。其应用领域也在不断扩大,已广泛应用于航空航天、军事工程、汽车工业、工业自动化、海洋探测、环境监测、医疗卫生等。当今传感器技术的主要研究方向有两个:一是开展基础研究,重点研究构造传感器的新材料、新工艺;二是实现传感器的数字化、非接触化和智能化。

随着微机电系统(micro electro-mechanical systems, MEMS)技术的发展和成熟, MEMS传感器应运而生。MEMS传感器是采用微电子和微机械加工技术制造出来的新型传感器,与传统的传感器相比,它具有体积小、重量轻、功耗低、可靠性高等特点。通过IC等工艺可大批量和高精度生产,单件成本低、性能一致性好、谐振频率高、响应时间短,综合集成度高、附加值高,具有多种能量转化、传输等功能效应,包括力、热、声、磁及化学、生物能等。并且还可以将检测的物理量转换成电信号,经微型CPU处理完成人们设定的各种功能,因而具有极好的发展前景。同时,在微米量级的特征尺寸使得它可以完成某些传统机械传感器所不能实现的功能。广泛应用于汽车产业、制鞋产业、石油化工产业、消费电子产业等。据统计,全世界MEMS传感器的年消费量达400多亿美元。

世界传感器市场正以持续稳定的增长之势向前发展,国际上传感器技术的研发非常活跃,特别是MEMS传感器的研发异常迅速,而国内相对落后。国内已出版的有关传统传感器技术方面的书籍内容相差无几,而对新型硅微机械传感器方面的参考书不多。作者根据自己和所在的课题组近十几年来对硅微机械传感器的教学和研究的经验,并查阅参考大量的文献著成此书,希望通过介绍硅微机械传感器技术的最新成果,为促进我国的传感器事业尽一份绵薄之力。本书可供从事传感器工作的教学、科研和工程技术人员参考。

本书分为两部分:第一部分根据微机械加工的工艺流程,逐步展开介绍微机械传感器的工艺技术和一些特殊工艺。第二部分介绍硅微机械传感器的最新研究成果,主要包括微压力传感器、微加速度传感器、微机械陀螺、微热流量传感器等。书中打破常规传感器技术教材以传感原理不同分类介绍的特点,而是按传感器的用途分类介绍,使读

者对不同用途的传感器的设计方法有更全面的认识。

本书在编写过程中,得到我的导师冯勇建、黄元庆教授的大力支持,同时得到莆田学院各级领导和厦门大学萨本栋微机电中心苏丽锦、张春权等老师的支持和帮助,在此表示感谢。

本书得到莆田学院出版基金资助出版。

由于传感器技术的发展日新月异,而作者的水平有限,成书时间仓促,书中难免有不妥或错误之处,恳请读者见谅和指正。

郑志霞
2012年9月

目 录

1	MEMS和MEMS传感器	1
1.1	微电子机械系统(MEMS)	1
1.2	微机械传感器研究的现状与发展方向	6
	本章参考文献	10
2	硅的基本特性	12
2.1	硅晶体结构	13
2.2	硅的电学性质	16
2.3	硅的光学、热学性质	19
2.4	硅的机械性质	19
2.5	硅的化学性质	21
	本章参考文献	21
3	硅片清洗与光刻工艺	23
3.1	硅片的清洗	23
3.2	光刻工艺	25
	本章参考文献	34
4	薄膜淀积	35
4.1	薄膜淀积	35
4.2	二氧化硅薄膜的制备方法	41
4.3	氮化硅薄膜的制备方法	43
	本章参考文献	44
5	硅刻蚀工艺	46
5.1	刻蚀参数	46
5.2	湿法刻蚀技术	48
5.3	干法刻蚀技术	50
	本章参考文献	53

6 杂质掺杂	55
6.1 扩散	55
6.2 离子注入	65
6.3 扩散和离子注入的优缺点	69
本章参考文献	70
7 圆片键合技术	71
7.1 金硅共熔键合	71
7.2 硅-硅直接键合	72
7.3 硅/玻璃静电键合	75
本章参考文献	76
8 微机械结构	78
8.1 微梁结构	78
8.2 膜片与薄膜	83
本章参考文献	85
9 微机械传感原理	87
9.1 金属应变片	87
9.2 半导体应变片	88
9.3 半导体应变片种类和结构	90
9.4 半导体应变片形变与阻值的转换	92
9.5 电容式传感器	93
本章参考文献	95
10 MEMS压力传感器	96
10.1 压阻式压力传感器	97
10.2 电容式压力传感器	105
10.3 谐振式微机械压力传感器	111
本章参考文献	117
11 加速度传感器	119
11.1 硅微加速度传感器	119
11.2 电容式微加速度传感器	125
本章参考文献	128
12 微机械角速度传感器——微机械陀螺仪	130
12.1 科里奥利效应	131
12.2 动力学原理	132
12.3 微机械陀螺仪的驱动方式	135

12.4 音叉式角速度传感器	137
12.5 硅微振动角速度传感器	139
本章参考文献	143
13 流体传感器	144
13.1 流体动力学	144
13.2 流体流量传感器	149
13.3 微机械风速计	158
13.4 其他流体传感器	165
本章参考文献	168
14 信号处理电路	170
14.1 压阻式传感器信号处理电路	170
14.2 电容式传感器信号处理电路	176
本章参考文献	181
15 MEMS传感器封装	183
15.1 MEMS传感器封装面临的挑战	183
15.2 MEMS传感器封装技术	184
15.3 适用于硅传感器的封装形式	186
15.4 封装应力	188
15.5 压力传感器封装	189
15.6 惯性传感器封装	190
15.7 热流体传感器封装	190
本章参考文献	191
附 录 英汉常用词对照表	192

1

MEMS 和 MEMS 传感器

在技术领域有一股很强的小型化的趋势,小型化系统可以完成大系统不能完成的事情,如导入手术、GSM 手机等。另一方面,集成电路制造工艺技术的发展使得低成本、大批量生产小型组件成为可能,如汽车和打印机上的压力传感器等。这种小型化技术导致了微机电系统(micro electro-mechanical system, MEMS)的诞生。

1.1 微电子机械系统(MEMS)

微电子技术的巨大成功在许多领域引发了一场微小型化革命,以加工微米/纳米结构和系统为目的的微米/纳米技术(micro/nano technology)在此背景下应运而生。一方面人们利用物理化学方法将原子和分子组装起来,形成具有一定功能的微米/纳米结构;另一方面人们利用精细加工手段加工出微米/纳米级结构。前者导致了纳米生物学、纳米化学等边缘学科的产生;后者则在小型机械制造领域开始了一场新的革命,导致了微电子机械系统(micro electro-mechanical system, MEMS)的诞生。微电子机械系统是从微机械(micro machinery)发展而来,原指利用光刻技术制造微米或纳米尺度的零件、部件或简单机构的系统。随着技术的发展,研究对象已不再是简单的零件和简单结构,而是集光机电于一体,可以驱动并完成一定功能的复杂系统。与之相关的制造、检测、控制等技术则称为微系统技术(MST)。纳米技术是实现微机械系统的重要技术基础。就目前而言, MEMS一般是指由微机械加工方法加工的微传感器和微执行器,与微电子信号处理和控制电路有机结合而成的自动化和智能化的微系统。一般是指外形轮廓尺寸在毫米量级以下,构成的元件尺寸在微米至纳米量级($10^{-6} \sim 10^{-9} \text{m}$)的可控制、可运动的微型机电装置。当前的尺寸为 $1\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$,未来也可能达到 nm 级。它将微型传感器、微型执行器、信号处理电路、自动控制电路、计算机接口电路、远距离通信系统和电源集为一体,构成一个完整的系统。其中微传感器获取信息,信号处理与控制电路处理信息并作出决策,微执行器则实现机械动作。对这一新兴领域,各国的学者使用不同的术语来表述。日本称之为微机械(micro machine),欧洲称之为微系统(micro systems),美国称之为微电子机械系统(micro electro-mechanical system, MEMS)。国内一般称之为微电子机械系统或微机电系统(MEMS)。

1.1.1 MEMS发展概况

微机电系统(MEMS)是随着半导体集成电路微细加工技术和超精密机械加工技术的发展而发展起来的。1962年,世界上第一个硅微压力传感器问世,紧接着又开发出尺寸为 $50\sim 500\mu\text{m}$ 的齿轮、气动涡轮等基于MEMS技术的微机构^[1]。20世纪70年代后,美国学者提出了基于硅半导体材料的微机械的设想,1988年,美国加州大学伯克利分校Muller研究小组利用MEMS制造技术研制出转子直径为 $60\sim 100\mu\text{m}$ 、厚度为 $1\mu\text{m}$ 的硅静电电机。该电机在380V电压的驱动下,最大转速 500r/min ,如图1-1所示。

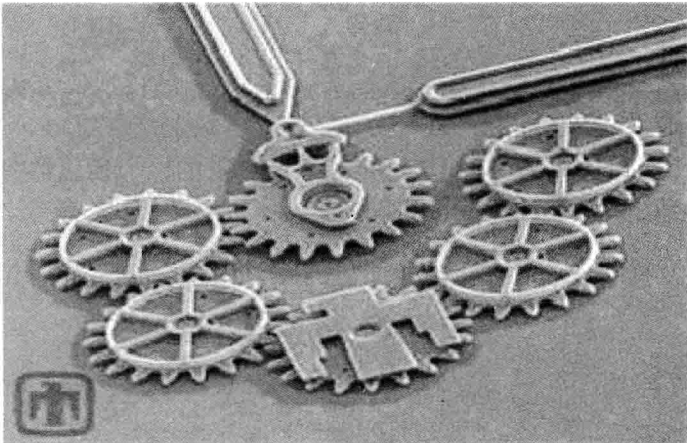
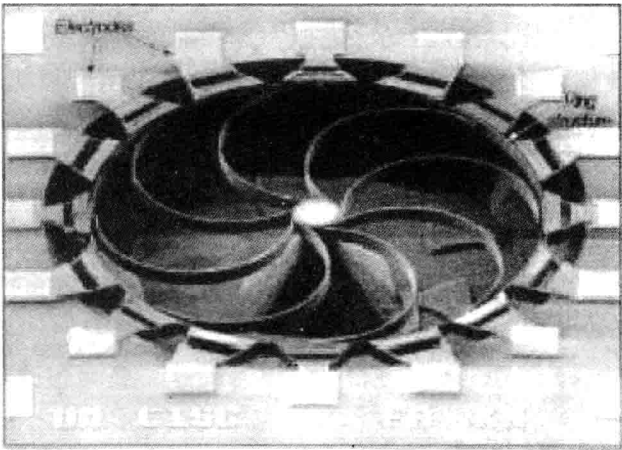


图 1-1 世界上第一台硅静电电机

第一台微静电电机的出现在当时学术界和工业界引起很大轰动,它表明了应用硅微加工技术制造微小可动结构的可行性,并能与集成电路兼容制造微小系统的优势^[2]。同期,MIT、Berkely、Standford等大学和AT&T及NSF的15名科学家向美国政府提出研究MEMS的建议。MEMS新技术已受到世界许多工业国家的重视,纷纷投以巨资开展研究并不断涌现新的研究成果,如各种微传感器、微执行器等。图1-2为微传感器和微执行器。



(a) 环形微机械陀螺仪



(b)微执行器

图 1-2 微传感器和微执行器照片

在日本,通产省自 1991 年开始了为期 10 年、总投资为 2500 亿日元的微机械技术研究开发计划。在欧洲,至 1993 年底,共有 8 所科研院校、23 个国家的研究所,建立了微系统研究小组。就目前研究状态来看,日本在一些研究方面处于国际领先地位,如奥林巴斯公司研制的直径近 1mm、长度数厘米的柔性机器人,它将形状记忆合金 SMA、传感器及控制电路全部集成到机器人体内,其末端能吊起 1g 的重块并自由运动^[3-5]。近年来,随着 MEMS 技术研究的进一步发展和深入,已经研制出许多新的 MEMS 器件,这些器件被大量应用在汽车、工业控制、医学和科学仪器等领域。

1.1.2 MEMS 技术涉及的学科

MEMS 技术是一种多学科交叉的前沿性领域,它几乎涉及自然及工程科学的所有领域,如电子、机械、光学、物理学、化学、生物医学、材料科学、能源科学等。MEMS 器件的设计已不再是传统意义上的设计,而是包含了新工作原理的研究和新器件结构的开发。MEMS 器件的设计需要综合多学科理论分析,这大大增加了设计参数选择的难度,常规分析计算已无法应付设计需求。对于 MEMS 技术的研究和开发而言,最重要的技术学科包括计算机、电气工程、机械工程、流体工程、集成电路工艺、电路设计、化学、计量学、材料科学、光学和封装技术等许多方面。

1.1.3 MEMS 制造工艺

微米/纳米技术包括了从亚毫米到亚微米范围内的材料、工艺和装置的加工制造和综合集成。微米制造技术包括对微米材料的加工和制造,其制造工艺主要有光刻、刻蚀、淀积、外延生长、扩散、离子注入、测试、监测与封装。纳米制造技术和工艺除了包括微米制造的一些技术(如离子束光刻等)与工艺外,还包括为了利用材料的本质特性对材料进行分子和原子量级的加工与排列等。目前,部分研究人员正致力于探索利用大规模集成电路的制造技术与工艺来实现微机电系统的制造,认为这样就有成熟的技术和设备可以利用,容易实现批量生产,经费也相对节省。有些人却持有不同观点。因

为与大规模集成电路一样,微机电系统与专用集成微型仪器是可以利用微电子制造技术和工艺方法来批量制造出来的。大规模集成电路的制造技术一直在不断地追求高集成度的芯片,但当计算机芯片线宽尺寸进一步缩小的时候,就出现了一个转折点。如当芯片线宽尺寸为 $150\mu\text{m}$ 以下时,由于量子力学效应的增强,原先把电子看作为粒子的微电子技术的理论将不再有效,而需要研制利用电子波动的量子效应原理而制作的器件,即所谓量子器件或称作纳米器件。也就是说,当制造装置小到一定尺寸的时候,就必须按照分子工程的理论(即量子力学理论)来构筑分子部件。纳米技术的核心就是装配分子,或者说,是按照人们的意愿直接操纵原子、分子或原子团、分子团,来制造出符合人们需要的具备特殊功能的部件和系统。此外,在加工三维微型结构和系统组装时,传统的方法也很受限制。简而言之,争论的焦点就在于,是继续沿袭传统的硅基制造方法,还是另辟蹊径,寻找其他制造方法。其他制造方法包括 LIGA 工艺(光刻、电镀成形、铸塑)、声激光刻蚀、非平面电子束光刻、真空镀膜(溅射)、硅直接键合、电火花加工、金刚石微量切削加工,甚至于使用传统的钟表加工技术,等等。目前,国际上比较重视的微机电系统的制造技术有牺牲层硅工艺、体微切削加工技术、LIGA 工艺和准 LIGA 工艺等。新的微型机械加工方法还在不断涌现,这些方法包括多晶硅的熔炼和声激光刻蚀,等等。

1.1.4 MEMS 应用举例

近年来微机电系统发展很快,已有一些实用性的成果问世。微机电系统的最高目标是信息系统集成,从信息获取(传感器)到信息处理(信息处理电路)和信息执行(执行器)等功能都实现集成(单片或多片 MEMS)。一般来说,采用微机械加工技术制作的 MEMS 器件大致可以分为力学换能器、热学换能器、光学换能器、电磁学换能器、化学与生物传感器及微流体器件等几类,下面分别予以介绍。

(1) 力学换能器

力学换能器分为力学传感器、力学执行器和机械电路元件三种。

微机械力学传感器检测的量主要有以下几种。

①加速度。微机械加速度计可用于汽车的安全气囊和导航、健身时的计步、机器检测、尖端武器的姿态控制等许多方面,是研究较早、也较为成熟的 MEMS 器件。采用的检测原理有压阻式、压电式、电容式、谐振式、隧道式和热敏式等。载体的旋转角速度可以用陀螺仪测量,但由于加工难度和强度等方面的原因,微机械陀螺一般不采用高速旋转的转子,而是采用振动式的原理,即利用载体旋转时的科氏(Coriolis)力的存在而引起振动模式的变化或引起振动的现象。另外也有用两个相差为 180° 的振动加速度计进行检测的方案,可以同时实现角速率和加速度的检测。

②压力。这是出现和应用最早的一种 MEMS 器件,已有大量成熟的产品问世。其核心是体或表面微机械加工技术制作的硅膜片。具体的检测形式有压阻式、压电式、电容式和谐振式等。

③应变。利用材料的应变效应,或利用材料应变而引起的其他效应研制而成的,主要用于传统应变计难以起作用的场合,如植入人体肌肉组织的微应变计。

④声音。微拾音器实际上是一种“不密封”的高灵敏度压力传感器,具有能批量生产的和性价比高的特点。所以对于助听器及侦察方面的应用有很大的吸引力。

⑤触觉。触觉传感器可以用于机器人手爪对其握持物体的感应,有利于精密组装,通常以阵列的形式得到应用。

根据实际采用的原理,力学执行器可以分为静电式、热学式和压电式等几种。机械电路元件包括采用微机械加工的方法制作的谐振器、通用继电器和射频开关等。

(2) 光学换能器

光学换能器可分为传感器和执行器两类。其中传感器的种类很多主要是采用微机械加工技术制作的半导体光学传感器和传感器阵列(如 CCD 器件)。具体采用的效应有光电效应、光伏效应、光倒效应和热电效应等。较早出现的光学执行器是微型发光器及其阵列(包括 LED、激光 LED、等离子光源、荧光光源)和液晶显示阵列。近年来又出现了几种新型微光学执行器,如光斩波器、光纤转换开关和数字微镜器件(digital mirror device, DMD)等。其中 DMD 实际上就是一个复杂的 MEMS,每一个像素由一个微型铝镜的偏转角决定,整个阵列的图像信息由一个 CMOS 存储阵列存储,其帧速率比一般的电视要高出几个数量级。

(3) 热学换能器

热学换能器可分为传感器和执行器。其中传感器主要有热电阻、热电偶原理和 PN 结效应制作的多种微型温度传感器、微型露点传感器、微型热量计等。由于体积小,传感器的响应时间比传统的器件大大缩短。执行器有制冷器和 Peltier 效应热泵等。

(4) 电磁学换能器

磁传感器主要包括霍尔效应传感器、磁敏电阻式传感器、真空电子式磁传感、磁通门式磁力计、隧道式磁力计和超导量子干涉磁力计等。其中霍尔效应传感器较为成熟,集成有处理电路的传感器已成为市场上的主要品种,超导量子干涉磁力计是其中灵敏度最高的。

(5) 电磁执行器

目前已有采用磁致伸缩原理和传统电机驱动原理制作的执行器。为了能在微结构中产生磁场,可采用制作永磁薄膜和微型线圈的办法。目前制作微型线圈的方法有多种,但制成的线圈匝数和最大电流有限,产生的磁场较弱。

(6) 化学和生物传感器

化学和生物传感器主要用在医学诊断、植入式检测、环境监测和食品工艺检测等方面,基本还处在研究阶段。除了与宏观化学和生物传感器对应的微观器件外,这类传感器还包括基因芯片及各种可与生物神经系统接口的微电极阵列等。

(7) 微流体器件

微流体器件的种类很多,构成的系统具有体积小、功耗低、功能强、成本低、可集成信号处理电路等优点,主要有以下几种:

①流体传感器。包括检测流量、流速、密度和黏滞性等物理量的传感器。

②阀。微型阀根据有无动力执行机构可分为有源和无源两类。有源阀的开关动作执行机构可采用热膨胀、气动、压电静电和电磁等原理。

③泵。微流体泵可实现的功能有输送反应物或悬浮颗粒、产生压力差、使冷却水循环、产生推进力等。具体的形式有利用蒸汽泡破裂推送液体的汽泡泵,靠变形产生推送力的膜片泵和张缩泵、旋转泵、超声泵和真空泵等。

④流体通道。流体通道是微流体系统的基本构件,可以采用包括硅在内的多种材料,采用的方法是体或表面微机械加工技术。流体通道可直接构成混合器,并实现放大的逻辑功能。

⑤集成的化学分析系统。这类实例包括气体和液体的色彩分析系统、细胞融合装置以及DNA放大分析系统等。

MEMS技术的目标是通过系统的微型化、集成化来探索具有新原理、新功能的元件和系统。MEMS技术开辟了一个全新的领域和产业,它们不仅可以降低微机电系统的成本,而且还可以完成许多大尺寸机电系统无法完成的任务。例如尖端直径为 $5\mu\text{m}$ 的微型镊子可以夹起一个红细胞,3mm大小的能够开动的小汽车等。MEMS的出现对电子技术、传感技术、自动化技术、机电一体化等领域产生深远影响。鉴于上述特性和优点,MEMS自20世纪80年代中末期发展至今一直受到世界各发达国家的广泛重视,被认为是一项面向21世纪可以广泛应用的新兴技术。因此在航空、航天、汽车、生物医学、环境监测、军事以及几乎人们接触到的所有领域中都有着十分广阔的应用前景。

1.2 微机械传感器研究的现状与发展方向

微机械系统是从微传感器发展起来的,自20世纪70年代微机械压力传感器问世以来,已出现包括微压力传感器、微加速度传感器、微流量传感器、微喷墨打印头、数字微镜显示器在内的几百种产品。

1.2.1 微机械压力传感器

微机械压力传感器是最早开始研制的微机械产品,也是微机械技术中最成熟、最早实现产业化的产品。从信号检测方式来看,微机械压力传感器分为压阻式和电容式两类,分别以体微机械加工技术和牺牲层技术为基础制造。从敏感膜结构来看,有圆形、方形、矩形、E形等多种结构。目前,压阻式压力传感器的精度可达 $0.05\%\sim 0.01\%$,年稳定性达 $0.1\%/F.S$,温度误差为 0.0002% ,耐压可达几百兆帕,过压保护范围可达传感器量程的20倍以上,并能进行大范围下的全温补偿^[6]。电容式压力传感器也是压力传感器中出现较早的一种传感器,该传感器在国外有较成熟的生产技术,已实现大批量生产,并在市场上占有一定的份额。国内对微机械压力传感器研究得比较成熟的机构有厦门大学、东南大学、上海微系统研究所等,其研制的传感器具有良好的线性度、重复,回程误差小等特点,已应用于医学、油井、航空航天等方面。现阶段微机械压力传感器的主要发展方向有以下几个方面。

(1)研制智能化的压力传感器,实现将敏感元件与信号处理、校准、补偿、微控制器

等的单片集成。

这一方面, Motorola 公司的 YoshiiY 等人在 Transducer 上报道的单片集成智能压力传感器堪称典范^[7]。这种传感器在 1 个 SOI 晶片上集成了压阻式压力传感器、温度传感器、CMOS 电路、电压电流调制、8 位 MCU 内核、10 位模/数转换(A/D)器、8 位数模转换(D/A)器、2K 字节 EPROM、128 字节 RAM、启动系统 ROM 和用于数据通信的外围电路接口, 其输出特性可以由 MCU 的软件进行校准和补偿, 在相当宽的温度范围内具有极高的精度和良好的线性。

(2) 进一步提高压力传感器的灵敏度, 实现低量程的微压力传感器^[8]。

这种结构以 Endevco 公司在 1977 年提出的双岛结构为代表, 它可以实现应力集中从而提高了压阻式压力传感器的灵敏度, 可实现 10kPa 以下的微压传感器。1989 年复旦大学提出一种梁膜结构来实现应力集中, 其结构可看作一个正面的哑铃形梁叠加在平膜片上, 可实现量程为 1kPa 的微压传感器。另外, 美国 Honeywell 公司在 1992 年提出的“Ribbed and Bossed”结构和德国柏林技术大学提出的类似结构。这种微压传感器用于脉动风压、流量和密封件泄露量标识等领域。

(3) 研制高温压力传感器, 提高工作温度。

压阻式压力传感器由于受 pn 结耐温限制, 只能用于 120℃ 以下的工作温度, 然而在许多领域迫切需要能够在高低温下正常工作的压力传感器, 例如测量锅炉、管道、高温容器内的压力, 井下压力和各种发动机腔体内的压力。目前对高温压力传感器的研究主要包括 SOS, SOI, SiC, PolySi 合金薄膜溅射压力传感器、高温光纤压力传感器、高温电容式压力传感器等。其中 SiC 高温压力传感器可望在 600℃ 环境下应用^[9]。

(4) 开发谐振式压力传感器。

微机械谐振式压力传感器除了具有普通微传感器的优点外, 还具有准数字信号输出、抗干扰能力强、分辨率和测量精度高的优点。硅微谐振式传感器的激励/检测方式有电磁激励/电磁拾振、静电激励/电容拾振、逆压电激励/压电拾振、电热激励/压敏电阻拾振和光热激励/光信号拾振^[10]。其中, 电热激励/压敏电阻拾振的微谐振式压力传感器价格低廉, 与工业 IC 技术兼容, 可将敏感元件与信号调理电路集成在 1 块芯片上, 具有诱人的应用前景。目前国内主要有中科院电子所、北京航空航天大学 and 西安交通大学从事这方面的研究, 精度可达到 0.37%。

1.2.2 微加速度传感器

硅微加速度传感器是继微压力传感器之后第二个进入市场的微机械传感器。其主要类型有压阻式、电容式、力平衡式和和谐振式^[11]。其中最具有吸引力的是力平衡加速度计, 其典型产品是 Kuehnel 等人在 1994 年报道的 AGXL50 型^[12], 其结构包括四个部分: 质量块、检测电容、力平衡执行器和信号处理电路。四部分集成制作在 3mm×3mm 的硅片上, 其中机械部分采用表面微机械工艺制作, 电路部分采用 BiCMOSIC 技术制作。随后 Zimmermann 等人报道了利用 SIMOXSOI 芯片制作的类似结构^[13], Chan 等人报道了测量范围在 5g 和 1g 的改进型力平衡式加速度传感器^[14]。这种传感器在汽车的防撞气囊控制

等领域有广泛的用途,成本在15美元以下。

国内在微加速度传感器的研制方面也做了大量的工作,如西安电子科技大学研制的压阻式微加速度传感器和清华大学微电子所开发的谐振式微加速度传感器^[15]。后者采用电阻热激励、压阻电桥检测的方式,其敏感结构为高度对称的四角支撑质量块形式,在质量块四边与支撑框架之间制作了四个谐振梁用于信号检测。

1.2.3 微机械陀螺

角速度一般是用陀螺仪来进行测量的。传统的陀螺仪是利用高速转动的物体具有保持其角动量的特性来测量角速度的。这种陀螺仪的精度很高,但它的结构复杂,使用寿命短,成本高,一般仅用于导航方面,而难以在一般的运动控制系统中应用。实际上,如果不是受成本限制,角速度传感器可在诸如汽车牵引控制系统、摄像机的稳定系统、医用仪器、军事仪器、运动机械、计算机惯性鼠标、军事等领域有广泛的应用前景。因此,近年来人们把目光投向微机械加工技术,希望研制出低成本、可批量生产的固态陀螺。目前常见的微机械角速度传感器有双平衡环结构^[16]、悬臂梁结构^[17]、音叉结构^[18]、振动环结构^[19]等。但是,目前实现的微机械陀螺的精度还不到 $10^{\circ}/\text{h}$,离惯性导航系统所需的 $0.1^{\circ}/\text{h}$ 相差尚远。

1.2.4 微流量传感器

微流量传感器不仅外形尺寸小,能达到很低的测量量级,而且死区容量小,响应时间短,适合于微流体的精密测量和控制。目前国内外研究的微流量传感器依据工作原理可分为热式(包括热传导式和热飞行时间式)、机械式和谐振式三种。清华大学精密仪器系设计的阀片式微流量传感器通过阀片将流量转换为梁表面弯曲应力,再由集成在阀片上的压敏电桥检测出流量信号^[20]。该传感器的芯片尺寸为 $3.5\text{mm} \times 3.5\text{mm}$,在 $10 \sim 200\text{ml}/\text{min}$ 的气体流量下,线性度优于5%。

荷兰Twente大学的Rob. Legten Berg等人利用薄膜技术和微机械加工技术制作了一对具有相对V型槽的谐振器芯片和顶盖芯片,利用低温玻璃键合技术将两者键合在一起,形成质量流量传感器^[21, 22],相对的V型槽形成流体通过流管。由于激励电阻和检测电桥产生的热量,使谐振器温度上升到高于环境温度的某一温度,如果有气流流过流管,对流换热使谐振器温度降低。气体流量不同,谐振器温度也不同。由于谐振器和衬底材料不同,不同温度对应不同的内应力,因而可通过谐振频率的大小得到流量的大小。谐振器可以是微桥谐振器,也可以是方膜谐振器。研究表明,质量流量传感器的灵敏度与向衬底传导的热量和对流换热之比有关。对相同材料制作的微桥谐振器和微方膜谐振器来说,后者向衬底传导的热量更多,因而其灵敏度较桥谐振器低。对它们制作的氮化硅桥谐振器来说,在压曲临界温度以下,灵敏度为 $4\text{kHz}/(\text{ml}/\text{min})$,在压曲温度以上为 $-7\text{kHz}/(\text{ml}/\text{min})$ 。

1.2.5 微气体传感器

根据制作材料的不同,微气敏传感器分为硅基气敏传感器和硅微气敏传感器。其中前者以硅为衬底,敏感层为非硅材料,是当前微气敏传感器的主流。微气体传感器可满足人们对气敏传感器集成化、智能化、多功能化等要求。例如许多气敏传感器的敏感性能和工作温度密切相关,因而要同时制作加热元件和温度探测元件,以监测和控制温度。MEMS 技术很容易将气敏元件和温度探测元件制作在一起,保证气体传感器优良性能的发挥^[23]。

谐振式气敏传感器不需要对器件进行加热,且输出信号为频率量,是硅微气敏传感器发展的重要方向之一。北京大学微电子所提出的一种微结构气体传感器^[24],由硅梁、激振元件、测振元件和气体敏感膜组成。微梁放置于被测气体环境之后,表面的敏感膜吸附气体分子而使梁的质量增加,使梁的谐振频率降低。这样通过测量硅梁的谐振频率可得到气体的浓度值。对 NO_2 气体浓度的检测实验表明,在 $0 \sim 1 \times 10^{-4}$ 范围内有较好的线性,浓度检测极限达到 1×10^{-6} ,当工作频率是 19kHz 时,灵敏度是 $1.3\text{Hz}/10^{-6}$ 。德国的 M. Maute 等人在氮化硅悬臂梁表面涂敷聚合物 PDMS 来检测己烷气体,得到 $-0.099\text{Hz}/10^{-6}$ 的灵敏度^[25]。

1.2.6 微机械温度传感器

微机械传感器与传统的传感器相比,具有体积小、重量轻的特点,其固有热容量仅为 $10^{-8}\text{J/K} \sim 10^{-15}\text{J/K}$,使其在温度测量方面具有传统温度传感器不可比拟的优势。国内有人开发了硅/二氧化硅双层微悬臂梁温度传感器。基于硅和二氧化硅两种材料热膨胀系数的差异,不同温度下梁的挠度不同,其形变可通过位于梁根部的压敏电桥来检测。其非线性误差为 0.9%,迟滞误差为 0.45%,重复性误差为 1.63%,精度为 1.9%。

1.2.7 其他微机械传感器

利用微机械加工技术还可以实现其他多种传感器,例如瑞士 Chalmers 大学的 E. Peter 等人设计的谐振式流体密度传感器^[26]、浙江大学研制的力平衡微机械真空传感器^[27]和中科院合肥智能所研制的振梁式微机械力敏传感器^[28]等。

总之,用 MEMS 技术加工制作的微结构传感器具有微型化、可集成化、阵列化、智能化、低功耗、低成本、高可靠性、易批量生产、可实现多点多参数检测等一系列优点,受到各国研究者的重视。尽管目前开发的传感器还有某些不足之处,例如灵敏度低、工作温区窄、精度不高,但是,随着科研工作者的深入研究,在不久的将来必有更多结构更新、性能更优异的传感器问世。