

高等院校通用教材

刘广玉 编著

# 微传感器 设计、制造与应用



高等院校通用教材

# 微传感器设计、制造与应用

刘广玉 编著

北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要内容是,对基于压阻效应、电容效应、机械谐振效应、光电效应、电子隧道效应和原子力效应的多种微传感器和智能微传感器的物理机理、材料、设计、制造、应用和发展进行了深入系统的讨论,包括对压力、加速度、角速度、纳米尺度和图像生成等的测量与性能分析。全书内容丰富,重理论也重应用,各章后配有思考题。

本书适合作高等学校相关专业微机械传感器课程的教材,也可供从事微机械传感器研究的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

微传感器设计、制造与应用/刘广玉编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2008.2

ISBN 978-7-81124-199-0

I. 微… II. 刘… III. 微型—传感器—基本知识 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 206706 号

© 2008,北京航空航天大学出版社,版权所有。

未经本书出版者书面许可,任何单位和个人不得以任何形式或手段复制或传播本书内容。  
侵权必究。

### 微传感器设计、制造与应用

刘广玉 编著

责任编辑 力扶清等

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhp@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:14.25 字数:365 千字

2008 年 2 月第 1 版 2008 年 2 月第 1 次印刷 印数:4000 册

ISBN 978-7-81124-199-0 定价:23.00 元



## 前 言

现代传感器明显的发展趋势是沿用传统的作用原理和某些新效应,优先选用半导体晶体材料,采用微机械制造技术,从传统传感器的设计和应用,转向以微机械、微电子和光电子为基础的微型传感器、智能微型传感器的设计和应用,来满足以计算机为控制中心的自动化、智能化系统对传感器在体积、质量、功耗和动、静态特性等方面的要求。本书正是基于这一发展趋势构思、选材编著的。

全书共9章,第1章微传感器概论;第2章微传感器与材料;第3章微机械制造技术;第4章硅压阻式微传感器;第5章硅电容式微传感器;第6章硅谐振式微传感器;第7章纳米微传感器;第8章光电式微传感器;第9章智能化微传感器。

与国内已公开出版的传感器书籍相比,本书的特点为:

- (1) 国内未见到公开出版专论微机械传感器的新书。
- (2) 本书以硅微机械传感器为核心,对形成微传感器的微机械、微电子、光电子、微制造、材料、设计以及性能测试和应用作了全面介绍,理论和应用并重。
- (3) 本书内容和举例,注重在航空航天领域的应用。因为该领域对传感器微型化、智能化的要求越来越高,反过来更促进微传感器及微系统的发展。

本书适合作为高等学校相关专业微机械传感器课程的教科书,也可作为从事微机械传感器研究的工程技术人员参考。

在本书编写过程中,尽管已做了很大努力,但由于水平所限,难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2007年5月



## 目 录

|                    |    |
|--------------------|----|
| 第 1 章 微传感器概论       | 1  |
| 1.1 微传感器优特点        | 1  |
| 1.1.1 微尺寸          | 1  |
| 1.1.2 微结构          | 1  |
| 1.1.3 分布场测量        | 1  |
| 1.1.4 节省空间和能源      | 2  |
| 1.1.5 动态测量         | 2  |
| 1.1.6 集成化          | 2  |
| 1.1.7 阵列化          | 3  |
| 1.1.8 分布式单元和智能结构   | 3  |
| 1.1.9 智能化          | 4  |
| 1.2 微传感器弱信号检测技术    | 4  |
| 1.3 微传感器分类         | 5  |
| 1.4 现状与未来          | 5  |
| 1.5 本书讨论内容         | 6  |
| 思考题                | 6  |
| 第 2 章 微传感器与材料      | 7  |
| 2.1 概 述            | 7  |
| 2.2 硅及其化合物材料       | 8  |
| 2.2.1 单晶硅          | 8  |
| 2.2.2 多晶硅          | 10 |
| 2.2.3 硅-蓝宝石        | 14 |
| 2.2.4 碳化硅          | 15 |
| 2.2.5 氧化硅和氮化硅      | 16 |
| 2.3 化合物半导体材料       | 16 |
| 2.4 光导纤维           | 17 |
| 2.5 熔凝石英           | 18 |
| 2.6 金刚石材料          | 18 |
| 2.7 压电材料           | 19 |
| 2.7.1 压电效应(电致伸缩效应) | 19 |
| 2.7.2 压电石英晶体       | 19 |
| 2.7.3 压电陶瓷         | 21 |
| 2.7.4 聚偏二氟乙烯薄膜     | 22 |
| 2.7.5 ZnO 压电薄膜     | 24 |



|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| 2.7.6 压电自感知驱动器           | 25        |
| 2.8 磁致伸缩材料               | 26        |
| 2.9 形状记忆合金               | 27        |
| 2.10 膨胀合金                | 28        |
| 2.10.1 铁镍低膨胀系数合金(4J36)   | 28        |
| 2.10.2 铁、镍、钴玻璃封接合金(4J29) | 28        |
| 2.10.3 铁、镍、钴瓷封合金(4J33)   | 28        |
| 2.11 几种通用金属材料            | 29        |
| 2.12 超导体                 | 29        |
| 2.13 纳米相材料               | 30        |
| 2.14 结 论                 | 31        |
| 思考题                      | 31        |
| <b>第3章 微机械制造技术</b>       | <b>32</b> |
| 3.1 概 述                  | 32        |
| 3.2 硅微机械加工技术             | 32        |
| 3.2.1 表面微加工技术            | 33        |
| 3.2.2 体型微加工技术            | 44        |
| 3.3 LIGA技术和SLIGA技术       | 56        |
| 3.3.1 LIGA技术             | 56        |
| 3.3.2 SLIGA技术            | 57        |
| 3.4 固相键合技术               | 58        |
| 3.4.1 技术要求               | 58        |
| 3.4.2 键合方法               | 62        |
| 3.5 特种加工技术               | 68        |
| 3.5.1 激光加工技术             | 68        |
| 3.5.2 电子束加工技术            | 69        |
| 思考题                      | 69        |
| <b>第4章 硅压阻式微传感器</b>      | <b>70</b> |
| 4.1 概 述                  | 70        |
| 4.2 硅压阻式压力微传感器           | 71        |
| 4.2.1 基本原理               | 71        |
| 4.2.2 方形(或矩形)硅膜片的模拟计算    | 72        |
| 4.2.3 硅的压阻系数             | 78        |
| 4.2.4 压敏电阻电桥特性的零位温漂      | 79        |
| 4.2.5 压敏电阻电桥的温度误差补偿      | 80        |
| 4.2.6 硅压阻式压力微传感器的制造      | 81        |
| 4.3 硅压阻式加速度微传感器          | 83        |
| 4.3.1 概 述                | 83        |
| 4.3.2 静态性能模拟             | 84        |



|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 4.3.3 动态性能模拟·····           | 91  |
| 4.3.4 硅压阻式加速度微传感器·····      | 95  |
| 思考题·····                    | 96  |
| <b>第5章 硅电容式微传感器</b> ·····   | 97  |
| 5.1 概  述·····               | 97  |
| 5.2 硅电容式集成压力传感器·····        | 97  |
| 5.3 微弱电容信号的检测电路·····        | 99  |
| 5.3.1 MOS开关-电容网络·····       | 99  |
| 5.3.2 硅电容式集成压力传感器的接口电路····· | 100 |
| 5.4 接触式硅电容压力微传感器·····       | 106 |
| 5.5 硅电容式加速度微传感器·····        | 107 |
| 思考题·····                    | 112 |
| <b>第6章 硅谐振式微传感器</b> ·····   | 113 |
| 6.1 概  述·····               | 113 |
| 6.2 谐振式微传感器的物理机理·····       | 114 |
| 6.2.1 工作原理·····             | 114 |
| 6.2.2 品质因数·····             | 115 |
| 6.2.3 谐振梁的微分方程·····         | 118 |
| 6.3 激励和检测机制·····            | 120 |
| 6.3.1 静电激励与电容检测·····        | 120 |
| 6.3.2 电热激励与压敏电阻检测·····      | 122 |
| 6.3.3 光热激励与光纤检测·····        | 122 |
| 6.3.4 电磁激励与检测·····          | 123 |
| 6.3.5 压电激励与检测·····          | 123 |
| 6.4 硅谐振式微传感器·····           | 125 |
| 6.4.1 硅谐振梁式压力微传感器·····      | 125 |
| 6.4.2 硅谐振式加速度微传感器·····      | 131 |
| 6.4.3 硅谐振式角速率微传感器·····      | 135 |
| 思考题·····                    | 144 |
| <b>第7章 纳米微传感器</b> ·····     | 145 |
| 7.1 概  述·····               | 145 |
| 7.2 电子隧道传感器工作原理·····        | 145 |
| 7.3 隧道加速度传感器·····           | 147 |
| 7.3.1 结构和制造·····            | 147 |
| 7.3.2 反馈控制电路·····           | 149 |
| 7.3.3 噪声源分析·····            | 149 |
| 7.3.4 隧道加速度计的特性测试·····      | 150 |
| 7.3.5 隧道加速度计的性能验证·····      | 152 |
| 7.4 原子力纳米结构传感器检测原理·····     | 153 |



|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 7.4.1 概述 .....                | 153        |
| 7.4.2 工作原理和结构 .....           | 154        |
| 7.4.3 实验测试 .....              | 155        |
| 7.5 碳纳米管质量传感器 .....           | 157        |
| 7.5.1 概述 .....                | 157        |
| 7.5.2 谐振式碳纳米管质量传感器 .....      | 158        |
| 思考题 .....                     | 160        |
| <b>第8章 光电式微传感器</b> .....      | <b>161</b> |
| 8.1 概述 .....                  | 161        |
| 8.2 基本原理 .....                | 162        |
| 8.2.1 物理原理基础 .....            | 162        |
| 8.2.2 半导体光源 .....             | 163        |
| 8.2.3 半导体光电探测器 .....          | 165        |
| 8.2.4 光电导探测器 .....            | 167        |
| 8.3 光电传感器性能参数 .....           | 168        |
| 8.3.1 灵敏度(响应型,响应率) .....      | 168        |
| 8.3.2 检测限 .....               | 168        |
| 8.3.3 光谱灵敏度特性 .....           | 169        |
| 8.3.4 时间响应特性 .....            | 170        |
| 8.3.5 内部阻抗 .....              | 170        |
| 8.3.6 信噪比与动态范围 .....          | 171        |
| 8.3.7 暗电流 .....               | 171        |
| 8.3.8 分辨率 .....               | 171        |
| 8.4 CCD 成像传感器 .....           | 172        |
| 8.4.1 概述 .....                | 172        |
| 8.4.2 CCD 基本结构与 MOS 电容器 ..... | 173        |
| 8.4.3 CCD 成像传感器举例 .....       | 178        |
| 8.4.4 微光 CCD 成像传感器 .....      | 181        |
| 8.5 红外传感器 .....               | 182        |
| 8.5.1 概述 .....                | 182        |
| 8.5.2 光导型红外探测器 .....          | 183        |
| 8.5.3 光电(伏)红外探测器 .....        | 185        |
| 8.5.4 红外焦平面阵列探测器 .....        | 185        |
| 8.6 光纤传感器 .....               | 188        |
| 8.6.1 光纤的分类和数值孔径 .....        | 188        |
| 8.6.2 光纤的波导传播 .....           | 190        |
| 8.6.3 光纤耦合器 .....             | 192        |
| 8.6.4 光纤传感器的基本类型 .....        | 193        |
| 8.6.5 光纤传感器举例 .....           | 193        |



|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 思考题.....                 | 196        |
| <b>第9章 智能化微传感器</b> ..... | <b>198</b> |
| 9.1 概 述 .....            | 198        |
| 9.2 现场总线式智能传感器 .....     | 199        |
| 9.2.1 组 成 .....          | 199        |
| 9.2.2 基本传感器 .....        | 201        |
| 9.2.3 软件技术 .....         | 202        |
| 9.3 应用举例 .....           | 203        |
| 9.4 网络式智能微型无线传感器 .....   | 211        |
| 9.4.1 组 成 .....          | 211        |
| 9.4.2 智能“微尘”自组网 .....    | 212        |
| 9.4.3 微型操作系统 .....       | 214        |
| 思考题.....                 | 215        |
| 参考文献.....                | 216        |



# 第1章

## 微传感器概论

沿用传统传感器的检测原理,即物理法则和物性变化,优先选用半导体晶体材料,利用机械制造技术,从传统的传感器设计和应用,转向制造以微机械和微电子为基础的微型传感器和智能微型传感器的设计和应用,这是当今传感器明显的发展趋势。微型传感器或称微机械传感器(简称微传感器)与传统(宏)传感器相比,有许多特点和优点。

### 1.1 微传感器优缺点

#### 1.1.1 微尺寸

传统(宏)传感器的最小构件尺寸通常是毫米(mm)量级,而微传感器的最小构件尺寸则是微米( $\mu\text{m}$ )、亚微米( $0.1\ \mu\text{m}$ )乃至纳米(nm)量级。微传感器的整体尺寸仅达几个毫米,完全进入一个新的尺度范畴( $10^{-3}\sim 10^{-8}\ \text{m}$ )。因而制造传统传感器的加工方法已不适用于制造微传感器,而应采用适于微米和纳米尺度的制造技术,简称微制造(加工)技术。它包括光刻、刻蚀、薄膜淀积、外延生长、离子注入和扩散,以及封装和测试等(详见第3章)。

#### 1.1.2 微结构

绝大多数的微传感器,都是以硅为基底,用微制造技术加工的,层与层之间有较大差别的三维微结构。其中可能包含膜片、两端固支梁、悬臂梁、敏感质量块、探针、梳状齿等可活动的微器件,以及孔、槽、空腔、沟道、锥体等不同微结构,与特殊用途的薄膜和高性能的微电子线路相结合构成微机电合一或微光机电合一的能量变换装置。这些能量变换装置常称为 MEMS (Microelectromechanical Systems) 传感器或 MOEMS (Microoptoelectromechanical Systems) 传感器。图 1-1 所示为微传感器的组成框图。

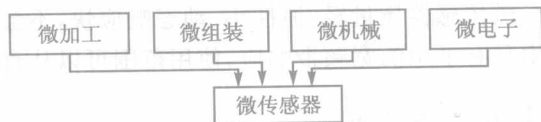


图 1-1 微传感器组成框图

#### 1.1.3 分市场测量

微传感器的尺寸小,意味着对被测参数的干扰小,测量精度高,非常适合测量流动场中的分布参数。例如,采用分布贴片安装的多个微型压力传感器(如直径 $\leq 1\ \text{mm}$ 的感压硅膜片)测量直升机旋翼叶片表面的风压分布。图 1-2 所示为硅微型压力传感器在叶片表面上的粘贴安装位置及部分测量结果。从图中的安装位置可看到,流体压力变化大的位置要密集地粘贴压力传感器,而在稳定流附近,仅在具有代表性的位置上粘贴即可。还可看到,将叶片旋转一周作为周期,则各周期内的压力波形大致相同。传感器使用压力范围为 $\pm 98.1\ \text{kPa}$ 。显然 $6.9\ \text{kPa}$ ( $1\ \text{lbf/in}^2$ )也完全可以测出。

又如,在涡轮发动机的压缩机叶片上,常需要标定出紊流压力分布场。为了不影响被测压力场的完整性,采用分布贴片安装的多个微型压力传感器(MEMS 传感器阵列)进行接近点压力的测量方式,压力分辨率可达 0.5 Pa,能如实反映出涡轮机的性能状况。

#### 1.1.4 节省空间和能源

微传感器的尺寸小、质量轻,意味着功耗低,能节省空间、原材料和能源。例如,现在一架航天飞机上,需要安装 3 000~4 000 支,甚至更多的各种用途的传感器,若用质量只有几克(g)的微传感器取代那些质量为公斤(kg)级宏传感器,显然在减轻飞机质量、减少能源供应和存储、降低发射成本以及可携带更多的有用设备等方面都有积极的作用。

又如,为了确保卫星在规定的空间轨道上运行,需要精确控制卫星的姿态,即在空间的位置和方位角。为此使用了包括太阳传感器在内的卫星姿态控制子系统,这个系统还含有惯性传感器(陀螺仪和加速度计)、地球传感器、全球定位系统(GPS)接收器和卫星跟踪定位器,来校正卫星的姿态。其中以硅为基底的光敏薄膜太阳传感器(MOEMS 太阳传感器),从敏感入射的太阳光来测定太阳的方位角,测量的视野大于  $2\pi \text{ sr}^{\text{①}}$ ( $\pm 90^\circ$ ),分辨率约  $1^\circ$ 。由得知的太阳方位角即可得知卫星的姿态。

纳米卫星是一种小型卫星。其质量一般小于 10 kg,仅常规的太阳传感器的质量至少有数百克,甚至超过 1 kg。因此,常规的太阳传感器对于预先严格限制质量的纳米卫星来说根本无法使用,必须使用微机械太阳传感器。当然,微机械太阳传感器及其他传感器也倍受大卫星的欢迎。

#### 1.1.5 动态测量

微传感器质量轻、惯性小、动态响应快,不会对系统的动态特性产生严重干扰。在动态应用中具有平坦的宽频带响应,使用范围可以从直流到兆赫(MHz)量级。

#### 1.1.6 集成化

硅微传感器便于和有关的信号处理单元(见图 1-3)实现部分或全部集成在同一芯片上(称单片集成),构成微传感器系统。集成的优点是体积小、结构紧凑,相关联器件彼此靠近,有益于排除噪声对有用信号的干扰。但集成难度较大,特别是单片集成,设计者必须预先考虑周全。因为和传感器相关联的每一部分必须同时设计、制造,任何部分的变动,都要重新设计掩模版图。这些技术上的相互制约,既增加了设计和制造的难度,也增加了成本。不像传统传感器系统那么方便,因为其传感器、接口电路、乃至封装各个部分,都可以独立设计和制造。当然,它也不可能实现单片集成。

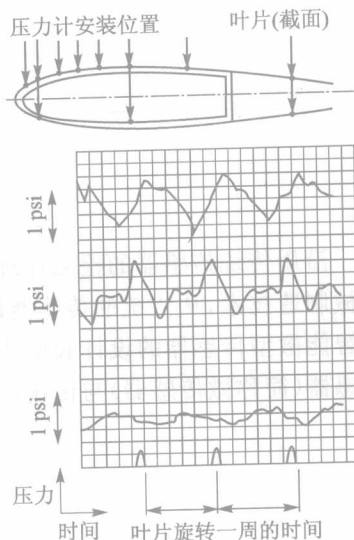


图 1-2 直升机叶片表面风压的测量

①  $\text{sr}$ =steradian 球面角度

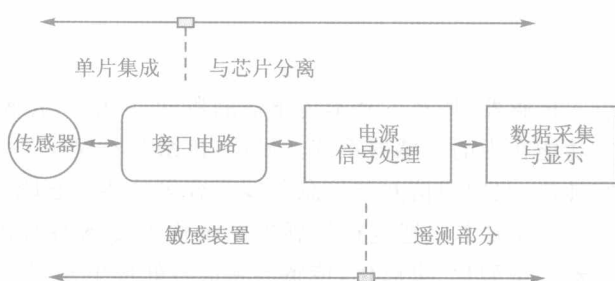


图 1-3 微传感器系统原理框图

集成式微传感器或微传感器系统,其测量性能和功能都会得到明显改善和扩展。

### 1.1.7 阵列化

微传感器便于阵列化,在多种新技术发展中,常需要阵列化传感器装置。同类型微传感器的阵列化,可通过冗余技术来提高测量的可靠性,通过多数的逻辑平均值(排除个别明显的差异值)来提高测量结果的稳定性,最终得到可靠稳定的测量结果。

不同类型的微传感器组成阵列,目的不是为了得到可靠稳定的测量结果,而是为了获得一个功能优良的控制单元。例如,在内燃发动机中,利用气体(空气)压力微传感器、温度微传感器和湿度微传感器组成的阵列单元,来控制并得到理想的气流和空气/燃油比,以实现最佳的燃烧过程。

### 1.1.8 分布式单元和智能结构

为了适应各种技术领域中测量和控制系统的自动化需求,分布式微传感器功能单元已成为发展趋势。在材料或结构内嵌入微传感器阵列或分布敏感光纤,就像植入人工神经元一样,使材料或结构具有感知功能,微传感器阵列既是结构件的组成部分又是监测部分。这种具有预期的、自我监测功能的材料(结构),称为感知或智能材料(结构)。例如,把 MEMS 阵列单元(微传感器+微执行器+专用集成电路)嵌入飞机机翼中,便可连续地感知机翼的工作状况。若将能测量和控制气动涡流和扰动气流 MEMS 单元分布嵌入飞机襟翼表面,使其成为主动柔性表面,便可对气流扰动或涡流形成主动抑制,从而可降低气动阻力,改善飞机飞行的机动性,如图 1-4 所示。类似的主动活动表面也可用于直升机的旋翼叶片、燃气轮机的叶片,以达到减振降噪、提高功效的目的。

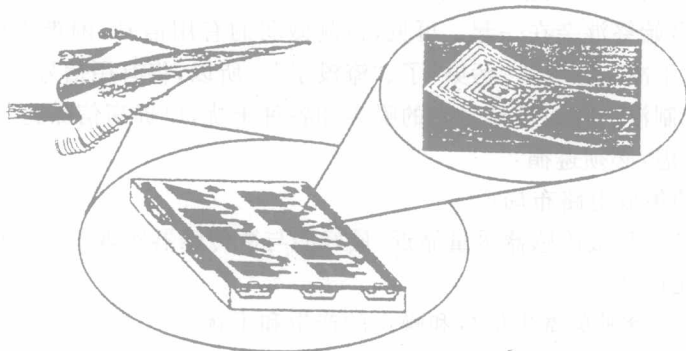


图 1-4 气流扰动控制的柔性襟翼示意图

### 1.1.9 智能化

把微处理器技术引入传感器,拓宽了基本传感器的概念,由单一敏感功能扩展为集信息获取、处理、存储和传输等功能在内的传感器系统。显然,该系统不仅仅是一个简单的传感器,而是具有自检、自校、数字补偿、双向通信并与信息总线兼容等功能。它既能提高传感器的精度、动态范围和可靠性,又能降低成本。把这种传感器系统称为传感器的智能化,简称智能传感器。为了实现智能传感器的微型化、集成化,传感器和信号处理单元宜采用模块化结构设计。

随着 Internet 网络技术的出现和发展,智能微型传感器迈向更高的技术层次,跃为智能微型无线传感器网络。即把智能传感器视为如同网络中的一个节点,节点之间用无线设备连通起来形成感知网络。如将这样的网络布设在某一真实的预测环境中,可监测环境的变化状况,如遭遇何种污染物、污染浓度如何,通过无线通信将测得数据发送到主计算机终端,便可分析得知污染物和污染程度。

可见,智能微型无线传感器网络不是别的,而是集分布式传感、计算机和无线通信技术于一体的微型感知网络。它能密集监测广泛的物理现象(详见第9章)。

微传感器是正在发展、完善和不断扩大应用的新一代传感器,对至今仍沿用传统传感器的测量领域必将产生巨大变革;对新兴的测控装备,必将发挥越来越大的关键作用。以现代某型号战机为例具体说明,机上配置有功能强大的雷达和航空电子系统。此系统使用的是有源相控阵雷达技术,由数千个通过高速计算机连接的微传感器组成。其主要功能包括:扰乱对方的传感器和电子系统;分析对方的雷达电波;提供安全的语音和资料通信,以保护自身安全战胜敌人。

## 1.2 微传感器弱信号检测技术

与传统的大尺寸传感器不同,由于微尺寸效应,微传感器的输出量极其微小,如运动位移、振幅及形变小到亚  $\mu\text{m}$  和  $\text{nm}$  量级,将它们转换成可供接收和处理的电信号,相应的电压量小到  $\mu\text{V}$ 、亚  $\mu\text{V}$  乃至  $\text{nV}$ ,电流量小到  $\text{nA}$ ,电容量小到  $0.1\sim 0.001\text{ pF}$ 。如此微弱信号,其空间耦合干扰较强,任何放大电路在此情况下都存在较强的背景噪声,如何从背景噪声下把微弱的有用信号提取出来,是成功设计微传感器必须解决的一个关键问题。

基于上述,可归纳为:微弱信号一般是指其信号幅度的绝对值很小,信噪比很低( $\ll 1$ )的信号,并且和噪声信号始终混杂在一起。可见,检测微弱的有用信号,困难主要不在于信号的微小,而在于信号“不干净”,被噪声“污染”了、“淹没了”。所以,将有用信号从背景噪声下检测出来的关键是设法抑制混杂在有用信号中的噪声和各种干扰,以提高信噪比。

从设计观点考虑,必须遵循:

- 1) 设计合理的集成电路布局;
- 2) 检测电路必须和微传感器尽量靠近,最好能与微传感器实现单片集成或混合集成;
- 3) 采用模块化设计。

目的都是为了尽量避免寄生信号和噪声的产生和干扰。

从检测微弱信号的技术和方法考虑,当前所用到的主要有:滤波技术、相关原理和相关检测技术,锁相环技术和开关-电容网络技术。



## 1.3 微传感器分类

如今,以计算机应用为基础的许多工程领域,包括航空、航天与航海,生物医学与健康保健,工业过程检测与监控,环境污染检测与监控等诸多方面,它们的自动化程度和复杂性日益增加,越来越离不开先进的微传感器以获取各种被测对象的信息,提供赖以作出实时决策的依据。

从获取信息的形态可分为非成像的和成像的两大类。获取非成像信息的称为非成像传感器;探测成像信息的称为成像传感器。非成像传感器,直接用以检测诸多参数,如压力、流量、位移、加速度、角速度、温度和荷重等,并以电参数输出,以数据或曲线显示。显示结果不外乎:①对某些被测参数提供高精度测量值;②对某些参数提供可重复、可靠的测量值;③对某些被测参数的实时变化量提供高灵敏度的测量值,而无需得知其绝对值。这些非成像传感器在各种工程测量领域应用中特别重要。

成像传感器的特征是,以足够的非连续点(阵列)探测能量,继而产生被监控对象(物体)的影像。光电探测器阵列,工作在可见光频域内(如 CCD——电荷耦合器件),是一种重要等级的成像传感器,用于监视系统、电视摄像机和机器人视觉系统等。在红外频段,红外成像探测器可用于许多关键系统,包括夜视系统和地球监视卫星等。成像传感器在许多高技术应用中起着重要作用。

## 1.4 现状与未来

微机械制造和集成电路技术是发展微传感器和 MEMS 系统的基础。如今有大量关于各类微传感器的报道文献,就其应用前景,它们绝大多数都有竞争力,但目前还不能完全替代高性能的传统传感器。主要原因是,有些微传感器的性能,包括精度、稳定性、寿命以及便于操作和装配等方面尚存在一些待改进和提高的技术问题。例如,微机械陀螺仪,在军民两用方面都有广阔的应用前景。但目前有些性能指标还一般,最好的漂移精度当前才达到  $10^\circ/\text{h}$ ;而惯性导航系统所要求的漂移精度为  $0.01^\circ/\text{h}$ 。显然,还不能替代正在使用的激光环陀螺(RLG)、半球谐振陀螺(HRG),甚至战术级光纤陀螺(FOG)。努力提高微机械陀螺和其他一些微传感器的性能指标是今后应攻克的主要目标,以加速微传感器及系统在装备新兴工业领域的广泛应用。为此,需要解决以下几个问题。

### 1. 加强微制造技术的研究和工艺设备开发

为了满足高性能微传感器需求,必须研发和采用更好的微加工设备和易于操作的生产流程,并能获得可重复生产、性能一致的器件。例如,光刻技术是微制造技术的关键因素,它是在晶片表面形成精准图形和开发高密度电路图形又不影响材料本身特性的技术。如在扫描电子束光刻中,入射电子在穿透抗蚀剂后又反弹回来穿过抗蚀剂,导致图形线加宽,影响图形质量。因此,研发激光束和其他方法的直接光刻技术已引起人们的关注。

又如,开发低温下 Si-Si 直接键合的工艺设备,对提高微传感器的性能至关重要,目前使用的高温( $800\sim 1\ 100^\circ\text{C}$ )Si-Si 直接键合设备,会改变键合后器件材料的性质,造成不确定因素的影响,使传感器性能下降。

## 2. 密封封装技术

微传感器体积小,结构小巧复杂。封装和密封难以标准化,往往随应用而定,故实现难度大。但是,必须突破这道坎,因为目前封装技术在很大程度上成为微传感器达到高性能的不可靠因素和瓶颈。包括敏感结构的真空封装、敏感环境的封装、外界应力干扰的隔离封装、多层薄膜之间的密封等,排除这些非被测参数的干扰,才能获得传感器理想的测试环境,确保提高传感器稳定可靠的性能。

## 3. 多层薄膜之间的亲合力

必须解决好多层薄膜之间的亲合力和接近的材料物性,尽量消除残余应力,确保传感器稳定的输出。

## 4. 电路设计库

必须建立高性能的电路设计库,保证各种微传感器利用单片或多片电路进行顺利设计。对于智能微型传感器,应在尽可能宽的应用范围内采用硬件接口标准、软件标准、总线标准和测试/补偿技术,以保证新设计的传感器系统体现出高性能。智能微型无线传感器网络的开发,是当今很有价值的研究课题。

还要认识到传感器的精度是由组成传感器的所有元器件的精度决定的,为确保传感器的高性能,设计和制造中必须遵循这一理念。

微传感器技术在现代和今后的科技上更具重大作用,如隐形飞机、战略防卫体系、远红外线、超导、科学技术现象的验证等都与传感器密不可分。

# 1.5 本书讨论内容

被测对象繁多,信息形式多样,需要传感器品种也日益增加,本书不可能包容其全部,只能从中选出一些有代表性的几种检测原理和应用的微传感器进行研讨。在此基础上,不难去拓宽、探讨以其他物理量为检测参数的微传感器和以化学生物物质成分为检测参数的化学传感器和生物传感器。尽管它们利用的某某效应、现象和反应可能各不相同,但是它们都是基于敏感材料与被测参数相互作用或接触时,引起材料几何变形、应变、电极电位、表面化学反应或生物体各种反应,并由此直接或间接地转换成电信号。可见,它们的基础技术理念是相同的。至于各类传感器的后续电路和信号处理,许多共性技术在它们之间是通用的。所以,通过对本书各章节的学习与掌握,不难对感兴趣的其他传感器进行探讨与掌握,可谓是触类旁通。

## 思考题

- 1.1 能否按比例缩小规则解释微尺寸概念,微尺寸会引起某些物理特性(或现象)变化吗?
- 1.2 传统传感器与微传感器相比,哪种更适合用于动态测量,说明理由。
- 1.3 为什么说场的测量用微传感器更有优势?
- 1.4 传统技术的小型化为何不适于制造微机械传感器?你能给出微传感器的定义吗?



## 第2章

# 微传感器与材料

### 2.1 概述

制造微传感器的材料有多种多样,大体可分为非金属材料 and 金属材料,主要有:半导体硅及其化合物;化合物半导体;电致伸缩和磁致伸缩材料;陶瓷和玻璃材料;高分子聚合物;复合材料;超导材料;纳米材料;金属和合金材料等。按照它们在传感器中的功用又可将其分为起能量转换的敏感材料和起承载能力及其他作用的结构材料。

敏感材料是传感器组成的核心部分。性能优越的敏感材料是研制高性能微传感器的基础。

面对如此多种材料,设计者必须面临一个合理选择材料的问题,以保证不同测量目标、不同使用条件下的传感器获得最佳性能和可靠性。选择材料时主要依据材料的物理性质,材料的内耗和材料的残余应力。

材料的物理性质主要包括弹性模量、密度、泊松比、线膨胀系数和每单位质量的热容量等。

材料的损耗用损耗系数  $\eta$  表示,它是衡量谐振器件振动时能量损耗的系数,与谐振器件的机械品质因数  $Q$  互为倒数,即

$$\eta = Q^{-1} = \frac{\Delta W}{2\pi W} \quad (2-1)$$

或写为

$$Q = \frac{2\pi W}{\Delta W} = \eta^{-1} \quad (2-2)$$

式中, $W$  代表谐振器件储备的最大应变能, $\Delta W$  代表每一振动循环损失掉的能量。

$$\eta = \eta_e + \eta_i \quad (2-3)$$

式中, $\eta_i$  代表材料内部固有的能量损耗系数; $\eta_e$  代表谐振器件外部周边的能量损耗系数,包括空气阻尼、压膜阻尼和声阻等。

材料内部的残余应力是热载荷作用的结果,在微结构设计中尤其应该加以考虑。例如,在衬底材料表面上,蒸镀或淀积薄膜材料,由于衬底和薄膜材料的热膨胀系数不同,在淀积过程中便会产生热应变。若在一矩形截面的硅梁衬底上,淀积一层其他的薄膜材料,产生的轴向热应变  $\epsilon_t^T$  可表示为

$$\epsilon_t^T = -\Delta\alpha(T - T_d) \quad (2-4)$$

式中, $\Delta\alpha$  代表衬底和薄膜材料热膨胀系数的差值, $T_d$  代表有效薄膜淀积温度, $T$  代表正常温度。由于热应变  $\epsilon_t^T$ ,便导致残余应力(热应力)的产生。

一支具体的微传感器常由多种材料构成,在选择材料时要注意它们之间热膨胀系数的匹配,以免引起因环境温度而产生的额外残余应力,导致传感器性能漂移,使稳定性下降。因此,在设计传感器时,应尽量选择热膨胀系数接近的材料,最好为同一种材料。

对于由多种材料组合的微结构,优选组件的时效处理温度和机械老化措施也是降低残余应力的有效方法。

## 2.2 硅及其化合物材料

### 2.2.1 单晶硅

单晶硅为中心对称立方晶体。图 2-1 表示一个简单的立方单元晶胞及其几个不同的主要晶面:(100)、(110)和(111)面。晶面的法线称为晶向。

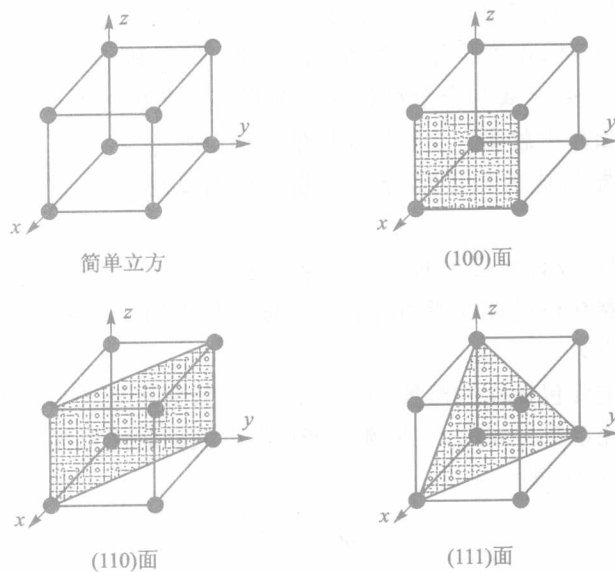


图 2-1 简单立方原子结构及其几个不同的主要晶面

图 2-2 表示出一个完整的硅单元晶胞中的原子排列,8 个角上各有一个原子,6 个面中心各有一个原子,体对角线 1/4 处各有一个原子。这种单元晶胞在空间的重复排列,就形成完整的硅单晶晶体结构。

在单晶硅的不同晶面上,原子密度不同,故其物理性质也不相同。例如,弹性模量、压阻效应、腐蚀速率等,表现出各向异性的特征。也就是说,单晶硅为各向异性材料。

单晶硅材料质量轻,密度为  $2.33\text{g}/\text{cm}^3$ ,是不锈钢的  $1/3.5$ ;强度高,弯曲强度为不锈钢的  $3.5$  倍,具有较高的刚度/密度比和强度/密度比。

单晶硅具有很好的热导性,是不锈钢的  $5$  倍,而热膨胀系数则不到不锈钢的  $1/7$ ,与 Invar 合金、7740<sup>#</sup> 玻璃接近,它们之间彼此封接在一起,几乎可以避免热应力的产生。

单晶硅的电阻应变灵敏系数高,在同样的输入下,可以得到比金属应变计更高的信号输

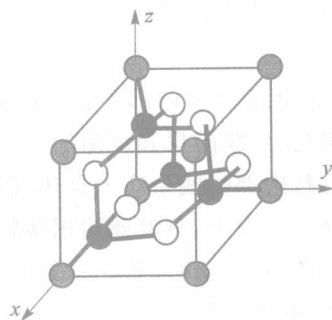


图 2-2 完整的硅单元晶胞中的原子排列