

新型传感器 技术及应用

刘广玉 陈 明 编著
吴志鹤 樊尚春

北京航空航天大学出版社

新型传感器技术及应用

刘广玉 陈 明 编 著
吴志鹤 樊尚春

北京航空航天大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

新型传感器技术及应用/刘广玉编著. —北京:北京航空航天大学出版社,
1995.4

ISBN 7-81012-546-X

I. 新… II. 刘… III. 传感器-基本知识 N. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 00318 号

内 容 简 介

本书系综合目前国内外有关文献及作者的研究成果编著而成。主要内容有:传感器敏感材料;微机械加工技术;传感器建模;硅电容式集成传感器;谐振式传感器;声表面波传感器;薄膜传感器;光纤传感器;场效应管型化学传感器;固态成像传感器;Smart 传感器等十一章。从敏感材料、微机械加工技术到一些先进传感器的设计原理、应用和发展情况作了较全面、深入的讨论。

本书内容丰富、实用、新颖。既重视理论,又结合应用。可供大专院校有关专业的研究生、高年级大学生和从事仪器仪表、测试技术、自动化等方面的科技人员参考使用。

新型传感器技术及应用

XINXING CHUANGANQI JISHU JI YINGYONG

刘广玉 陈 明 编 著
吴志鹤 樊尚春

责任编辑 王小青

北京航空航天大学出版社出版

北京海淀学院路 37 号 发行科电话 2015720 邮编(100083)

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

朝阳科普印刷厂印装

787×1092 1/16 印张:18 字数:461 千字

1995 年 6 月第一版 1995 年 6 月 第一次印刷 印数:5000 册

ISBN 7-81012-546-X/TN·027 定价 14.00 元

前 言

传感器在当代科学技术中占有十分重要的地位。现在,所有以计算机为基础的测控系统,都需要传感器提供赖以作出实时决策的数据。随着系统的自动化程度和复杂性的增加,对传感器的精度、可靠性和响应,要求得越来越高。而许多传统的传感器,在实用上已经很难再作进一步改善来满足对它们的高要求,特别在缩小体积、减轻重量等方面几乎已无潜力可挖。因此,近些年来,国际上在传感器技术方面,开展了许多探索性的预研工作,非常明显的发展趋势是:沿用传统的作用原理和某些新效应,优先使用晶体材料(硅、石英、蓝宝石、陶瓷等),采用微机械加工技术和微电子技术,从传统的结构设计转向微机械加工工艺的微结构设计,研制成新型传感器及传感器系统。

作者注意到这个发展趋势,吸取和总结了我们近年来在科研和教学中获得的成果及经验,并参考国内外有关书籍和文献,编著了此书。

第一章~第三章,主要论述用于研制传感器的先进敏感材料、微机械加工技术和传感器的建模。先进敏感材料是研制先进传感器的基础,微机械加工技术是制造固态传感器(特别是硅微传感器)的重要手段,传感器的建模是研究先进传感器特性最重要的基础理论之一。这三章是研制传感器的共同基础。

第四章~第十章,对几种有发展前景的新型传感器(硅电容式集成传感器、谐振式传感器、声表面波式传感器、薄膜式传感器、光纤式传感器、硅场效应管式化学传感器和固态成像传感器)的敏感机理、设计方法和应用作了深入而实用的论述。

第十一章,对代表传感器发展总趋势的 Smart 传感器的组成原理和功能作了扼要的讨论,并以实例说明它能完成过去传感器无法实现的功能。

本书与已出版的同类型书籍相比,内容编排新颖,增补了传感器的若干最新研究成果。其中许多新内容是第一次系统地向读者介绍;不但重理论,而且重应用;特别体现在第三章、第五章和第六章。这是作者近几年科研成果的结晶。某种程度上说,本书有专著性质。

全书共分十一章。第一、二、四、十、十一章,由北航刘广玉教授编写。第三、五章,由北航樊尚春教授编写。第六、七章,由西工大陈明教授编写。第八、九章,由南航吴志鹤教授编写。绝大部分插图由北航孙奎兰描绘。全书由主编刘广玉教授统稿、整理,并对部分章节内容进行了局部调整,修改和补充,其间得到了北航周浩敏副教授的帮助。全书由北京理工大学朱伯申教授审稿,提出一些宝贵意见。我们甚表谢意。

在本书编写过程中,尽管我们已做了很大努力,但由于水平所限,不免一些内容仍有遗漏、不妥之处,敬请读者批评指正。

本书根据原航空航天工业部 1993~1995 年航空高校教材建设规划,作为航空高校《检测技术与仪器仪表》专业教材编写的。除可供本专业大学生和研究生使用外,也可供仪器仪表、测试、计量、自动化等方面的科技人员和大学有关专业参考。

编著者

1994 年 6 月

目 录

第一章 传感器敏感材料

一、半导体硅材料	(1)
1. 单晶硅	(1)
2. 多晶硅	(2)
3. 非晶体硅	(2)
4. 硅蓝宝石	(3)
二、化合物半导体材料	(3)
三、石英敏感材料	(4)
1. 石英晶体	(4)
2. 石英玻璃	(5)
四、精密陶瓷材料	(5)
五、ZnO 薄膜	(7)
六、铁电聚合物	(8)
七、非晶态磁性合金	(9)
八、形状记忆合金	(10)
九、复合材料	(10)
思考题	(11)
参考文献	(11)

第二章 微机械加工技术

一、概 述	(12)
二、硅微机械加工技术	(12)
1. 刻蚀技术	(12)
2. 薄膜技术	(16)
3. 薄膜参数及其测量方法	(20)
4. 固相键合工艺	(25)
三、X 射线深层光刻电铸成型技术	(27)
四、微型传感器结构	(29)
思考题	(31)
参考文献	(31)

第三章 传感器的建模

一、概 述	(32)
二、理论基础	(33)
1. 弹性体的力平衡方程	(33)

2. 弹性体的几何方程	(34)
3. 弹性体的物理方程	(37)
4. 弹性体的弹性势能	(38)
5. 弹性体外力的功	(39)
6. 虚功原理	(39)
7. 弹性体的动能	(40)
8. 弹性体的能量泛函原理	(40)
9. Hamilton 原理	(40)
10. 建模的一般方法	(40)
二、梁的建模	(41)
1. 受轴向力两端固支梁	(41)
2. 改型悬臂梁	(41)
四、平膜片的建模	(46)
1. 周边固支的平膜片	(46)
2. 近似解析解	(49)
3. 算 例	(51)
4. 结 论	(52)
五、波纹膜片的建模	(53)
1. 受均布压力的波纹膜片	(54)
2. 受集中力的波纹膜片	(55)
3. 算 例	(55)
六、E 型膜片的建模	(58)
1. 基本方程	(58)
2. 受集中力的 E 型膜片	(60)
3. 受均布压力的 E 型膜片	(61)
4. 算 例	(62)
七、带有顶盖的圆柱壳的建模	(63)
1. 基本方程	(63)
2. 圆柱壳环单元的有限元列式	(65)
3. 算 例	(68)
八、顶端开口圆柱壳的建模	(70)
1. 基本方程	(70)
2. 底端约束的特征	(71)
3. 约束因子	(72)
九、半球壳的建模	(74)
1. 简 述	(74)
2. 半球壳的振动方程	(75)
3. 半球壳的振型进动特性	(79)
4. 半球壳的耦合振动	(81)

思考题	(85)
参考文献	(86)

第四章 硅电容式集成传感器

一、概 述	(87)
二、硅电容式集成压力传感器	(88)
三、硅电容式集成压力传感器的接口电路	(91)
1. 开关-电容接口电路	(91)
2. 电容-频率变换电路	(96)
四、硅电容式加速度传感器	(97)
思考题	(98)
参考文献	(99)

第五章 谐振式传感器

一、概 述	(100)
二、谐振式传感器的基础理论	(101)
1. 基本结构	(101)
2. 闭环自激	(101)
3. 敏感机理	(104)
4. 谐振子的 Q 值	(104)
5. 设计要点	(106)
6. 特征与优势	(106)
三、振动筒压力传感器	(106)
1. 简 述	(106)
2. 压电激励特性	(107)
3. 拾振信号的转换	(108)
4. 稳定的单模态自激系统的实现	(109)
5. 双重模态的有关问题	(110)
四、谐振式角速率传感器	(113)
1. 简 述	(113)
2. 压电激励谐振式圆柱壳角速率传感器	(113)
3. 静电激励半球谐振式角速率传感器	(117)
五、谐振式直接质量流量传感器	(121)
1. 简 述	(121)
2. 测量理论	(121)
六、硅微结构谐振式传感器	(122)
1. 简 述	(125)
2. 热激励方式	(125)
3. 差动式硅谐振微传感器	(128)

思考题·····	(129)
参考文献·····	(129)

第六章 声表面波传感器

一、概 述·····	(130)
二、声表面波技术基础知识·····	(131)
1. 声表面波的类型·····	(131)
2. 声表面波的主要性质·····	(135)
3. 声表面波叉指换能器·····	(138)
三、声表面波传感器理论基础·····	(144)
1. 声表面波振荡器的结构组成及其工作原理·····	(144)
2. 测量各种物理量的理论分析·····	(145)
四、各种声表面波传感器·····	(149)
1. SAW 压力传感器·····	(149)
2. SAW 加速度传感器·····	(152)
3. SAW 气体传感器·····	(157)
4. SAW 角速度传感器·····	(160)
5. SAW 流量传感器·····	(171)
思考题·····	(173)
参考文献·····	(173)

第七章 薄膜传感器

一、概 述·····	(175)
二、几种薄膜传感器·····	(176)
1. 薄膜应变电阻及传感器·····	(176)
2. 薄膜热敏元件及传感器·····	(181)
3. 薄膜气敏元件及传感器·····	(182)
4. 薄膜磁敏元件及传感器·····	(188)
思考题·····	(189)
参考文献·····	(190)

第八章 光纤传感器

一、概 述·····	(191)
二、光纤的导波原理·····	(191)
三、光纤的传输损耗·····	(195)
1. 吸收损耗·····	(195)
2. 散射损耗·····	(195)
3. 辐射损耗·····	(196)
四、强度调制光纤传感器·····	(196)

1. 光纤微弯传感器	(197)
2. 反射式光纤位移传感器	(198)
3. 反射式光纤压力传感器	(200)
4. 半导体吸收式光纤温度传感器	(201)
5. 折射率调制光纤传感器	(202)
五、相位调制光纤传感器	(202)
1. 马赫-泽德尔干涉仪	(203)
2. 萨格纳克干涉仪	(211)
3. 法布里-泊罗干涉仪	(213)
4. 迈克尔逊干涉仪	(214)
六、偏振态调制光纤传感器	(214)
1. 光纤电流传感器	(214)
2. 光纤电压传感器	(216)
3. 偏振态调制型光纤加速度传感器	(219)
七、频率调制光纤传感器	(222)
八、分布式光纤传感器	(223)
1. 概 述	(223)
2. 损伤评估	(223)
3. 应变测量	(226)
4. OTDR 测量原理	(228)
思考题	(230)
参考文献	(230)

第九章 场效应管型化学传感器

一、离子敏传感器	(231)
1. MOSFET 的基本原理	(231)
2. ISFET 的工作原理	(232)
3. ISFET 敏感膜的种类	(234)
4. ISFET 的结构	(236)
5. 多功能 ISFET	(239)
6. ISFET 的特点	(241)
7. ISFET 的应用	(241)
二、气敏传感器	(242)
1. 氢气敏 MOSFET	(242)
2. 一氧化碳气敏 Pd-MOSFET	(245)
3. 氧化敏 MOSFET	(246)
4. 氨气敏 MOSFET	(246)
三、湿敏传感器	(247)
思考题	(248)

参考文献	(249)
------	-------

第十章 固态成像传感器

一、概 述	(250)
二、CCD 的基本结构与 MOS 电容器	(251)
1. 结构	(251)
2. MOS 电容器与 CCD	(251)
3. CCD 的基本工作原理	(254)
三、CCD 成像传感器	(255)
1. 线列 CCD 成像传感器	(255)
2. 面阵 CCD 成像传感器	(258)
四、CCD 成像传感器的主要特性	(260)
1. 调制传递函数(MTF)	(260)
2. 输出饱和特性	(261)
3. 暗电流	(261)
4. 灵敏度	(262)
5. 光谱响应及背面照光	(263)
6. 信噪比与动态范围	(263)
五、红外固态成像传感器	(264)
1. 引 言	(264)
2. 混合式 IR-CCD 传感器	(264)
3. 单片集成式 IR-CCD 传感器	(265)
六、微光 CCD 象传感器	(266)
思考题	(267)
参考文献	(267)

第十一章 Smart 传感器

一、Smart 传感器的含义	(268)
二、基本传感器	(269)
三、Smart 传感器中的软件	(271)
1. 标度变换技术	(271)
2. 数字调零技术	(272)
3. 非线性补偿	(272)
4. 温度补偿	(272)
5. 数字滤波技术	(272)
四、应 用	(272)
五、发展前景	(276)
思考题	(278)
参题文献	(278)

第一章 传感器敏感材料

一、半导体硅材料

传感器敏感材料有多种,如物理材料(无机材料)、化学材料(有机材料)和生物材料(酶)等,其中性能优良的是研制先进传感器的基础。这主要有以硅材料为主的半导体材料、石英材料、精密陶瓷材料、高分子材料、酶以及新的复合材料等。

1. 单晶硅

当今,固态传感器大部分是用单晶硅材料制造的,因为单晶硅具有优良的机械、物理性质,材质纯,内耗低、功耗小。单晶硅的机械品质因数可高达 10^6 数量级(实际值往往比最大值小几倍),滞后和蠕变极小、几乎为零,机械稳定性好。

硅材料的质量轻,密度为不锈钢的 $\frac{1}{3}$,而弯曲强度却为不锈钢的 3.5 倍。它具有高的强度密度比和高的刚度密度比。

单晶硅为立方晶体,是各向异性材料。许多物理特性取决于晶向,如弹性性质等等。

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 $\frac{1}{7}$ 。

单晶硅又是半导体材料,具有优良的电学性质,其压阻效应取决于晶向,压阻系数矩阵为

$$\pi_{ij} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

式中: π_{11} ——纵向压阻系数;

π_{12} ——横向压阻系数;

π_{44} ——剪切压阻系数。

单晶硅的应变灵敏系数($k = \pi E =$ 压阻系数 $\times$ 弹性模量)比金属的高 1~2 数量级。

单晶硅传感器的制造工艺与硅集成电路工艺有很好的兼容性。硅传感器与调理电路单片集成,将对传感器技术产生巨大变革;可实现微型化、低功耗,并有利于提高传感器的一致性、可靠性和快响应。

基于单晶硅的优良机械性质、电学性质,用微机械加工方法不仅已制成实用的扩散硅压阻式集成压力传感器;近年来,还研制成多种小型和超小型的、性能优良的传感器,如硅电容式集成压力传感器、硅谐振式压力传感器,光入/光出——硅谐振式传感器和硅加速度传感器等。

表 1-1 给出单晶硅有关机械物理性质。

表 1-1 单晶硅机械物理性质

名 称	数 据	
密度(g/cm^3)	2.33	
弯曲强度(MPa)	70~200	
屈服强度(MPa)	7000	
弹性模量(MPa)	$\langle 100 \rangle$; $E=130 \times 10^3$	$G=79 \times 10^3$
	$\langle 110 \rangle$; $E=170 \times 10^3$	$G=61.7 \times 10^3$
	$\langle 111 \rangle$; $E=190 \times 10^3$	$G=57.5 \times 10^3$
$\frac{dE}{EdT} (\text{K}^{-1})$	$\langle 100 \rangle$; -63×10^{-6} $\langle 110 \rangle$; -80×10^{-6} $\langle 111 \rangle$; -46×10^{-6}	
泊松比	$\langle 100 \rangle$; 0.18	
热膨胀系数($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	2.33	
热导率($\text{Cal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$)	0.3	
应变灵敏系数	$\langle 100 \rangle$ N-Si; -132	P-Si; +10
	$\langle 110 \rangle$ N-Si; -52	P-Si; +123
	$\langle 111 \rangle$ N-Si; -13	P-Si; +177

2. 多晶硅

多晶硅是许多单晶(晶粒)的聚合物,这些晶粒的排列是无序的,不同晶粒有不同的单晶取向,而每一晶粒内部具有单晶的特征。

晶粒与晶粒之间的部位称为晶界。晶界对压阻效应的影响可以通过控制掺杂浓度来降低。

晶粒大小对压阻效应也有一定影响,晶粒越大,压阻效应越大,即应变灵敏系数越大(单晶情况下为最大)。图 1-1 所示为晶粒直径和应变灵敏系数的关系。

低温淀积的多晶硅膜经过高温处理后晶粒明显增大,有利于提高压阻效应。

多晶硅压阻膜与单晶硅压阻膜相比,其优点是可在不同衬底材料上制作,如金属材料衬底,而制备过程与常规半导体工艺相容,且无 PN 结隔离问题,因而有良好的温度稳定性。多晶硅压阻膜的应变灵敏系数虽比单晶硅膜低,但仍比金属的高一个数量级。用多晶硅压阻膜可有效地抑制传感器的温漂,是制造低温漂传感器的好材料。

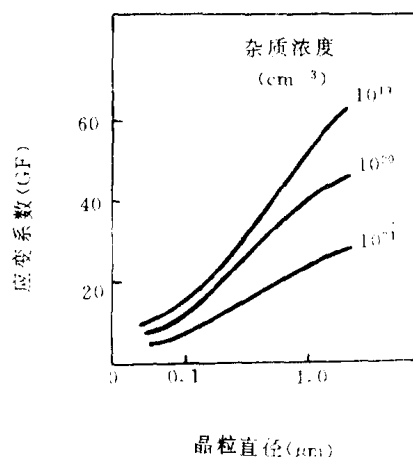


图 1-1 晶粒直径和应变灵敏系数的关系

3. 非晶硅

非晶硅不仅在光电器件中广泛应用(如太阳能电

池),而且在传感器中也有相当大的应用潜力。这是因为非晶体硅具有晶体材料所难以得到的特性:

(1)在可见光范围内具有高的光吸收系数。

(2)淀积温度低($200\sim 300^{\circ}\text{C}$),可以使用多种材料作衬底,并可在大面积上淀积(或喷镀),如象飞机表面那样大的曲面上进行喷镀。也可以在大面积挠性有机膜片上淀积,用以感受压力分布和识别形状。

(3)材料性能稳定,随时间变化很小,且有较高的机械强度。

(4)具有高的塞贝克系数($200\mu\text{V/K}$)。

(5)纯非晶硅没有压阻效应,利用微晶相与非晶相混合便可产生压阻效应。其应变灵敏系数比金属的高一个数量级。

(6)非晶硅的弹性模量和多晶硅一样,取决于制备和热处理,一般为 $(150\sim 170)\times 10^3\text{MPa}$ 。

基于非晶体硅的上述特性,可用其制造多种传感器,如光传感器,成象传感器,高灵敏度的温度传感器,微波功率传感器、触觉传感器等。

4. 硅蓝宝石

硅蓝宝石材料,是在蓝宝石($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)衬底上应用外延生长技术形成的硅薄膜。由于衬底是绝缘体,可以实现元件之间的分离,且寄生电容小。蓝宝石的机械强度为体形硅的2倍多,蠕变极小,优于单晶硅;耐辐射能力强;化学稳定性好,耐腐蚀性强。

扩散硅式压力传感器,为了在N型硅基片上形成P型扩散硅层,基片之间必须有一个PN结,由这种PN结形成的绝缘不能在 150°C 以上的高温下使用。而硅蓝宝石膜由于和基片之间是完全绝缘的,可制做在高达 300°C 温度下使用的性能稳定的传感器。其制备工艺与集成电路工艺相容。

总之,应用硅蓝宝石膜制做传感器具有耐环境性强的优势。

二、化合物半导体材料

先进的成象传感器(探测器)日益采用化合物半导体材料,如碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)、锑化铟(InSb)、硅化铂(PtSi)、砷化镓(GaAs)等。这些材料均需在致冷条件下使用,致冷温度一般为(77K)。

实用的光敏成象器,主要针对红外辐射在大气传输中“透明度”最好的三个大气窗口,即 $(1\sim 3)\mu\text{m}$, $(3\sim 5)\mu\text{m}$ 和 $(8\sim 14)\mu\text{m}$ 三个波段。同时也在开发更长波段的应用。对于 $(1\sim 3)\mu\text{m}$ 波长辐射敏感的成象器有 PbS , InAs , $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 等。对于 $(3\sim 5)\mu\text{m}$ 波长辐射敏感的成象器有 InSb , PbSe , $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 等。对于 $(8\sim 14)\mu\text{m}$ 波长敏感的成象器有 $\text{Ge}:\text{Hg}$ (非本征型), $\text{Si}:\text{Ga}$ (非本征型), PbSnTe 和 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 。其中三个元素 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 是一种本征型吸收材料,敏感波长可以从 $1\mu\text{m}$ 到 $30\mu\text{m}$ 变化;调整组分可以制作适合三个大气窗口的器件,也是最有成效的长波红外成象器。

作为无源探测的红外光敏技术,在许多关键系统中得到广泛应用。如红外夜视、飞机前视、侦察、告警、火控、跟踪定位、精确制导、地球监视、卫星系统等。

三、石英敏感材料

1. 石英晶体

石英的化学组成为 SiO_2 , SiO_2 的晶态形式即石英晶体(Quartz)。石英晶体的理想形状为六角锥体(见图 1-2)。通过锥顶端的轴线称为 z 轴(光轴),

通过六面体平面并与 z 轴正交的轴线称为 y 轴(机械轴),通过棱线并与 z 轴正交的轴线称为 x 轴(电轴)。

石英晶体为各向异性材料,不同晶向具有各异的物理特性。

石英晶体又具有压电特性,即其弹性和电学性质为相互耦合的。其压电矩阵为

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ -d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & 2d_{11} & 0 \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

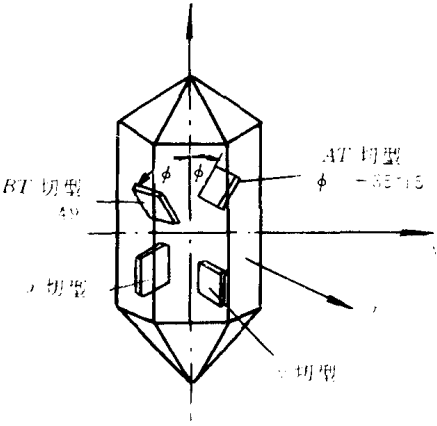


图 1-2 石英晶体的理想形状

仅有两个独立的压电系数 d_{11}, d_{14} 。常用其长度伸缩和厚度伸缩模式,没有可用的剪切模式。

石英晶体又是绝缘体,在其表面淀积金属电极引线,应不会产生漏电现象。

石英晶体和单晶硅一样,具有优良的机械物理性质。材质纯、内耗低、功耗小;机械品质因数可高达 10^6 数量级,但实际值却往往比最高值小几倍;滞后和蠕变极小,小到可以忽略不计。

石英材质轻,密度约为不锈钢的 $\frac{1}{3}$ 。它的弯曲强度为不锈钢的 4 倍。

利用其压电特性和稳定的机械物理性质,石英晶体是制作各种谐振器和谐振式传感器理想的敏感材料。

石英晶体最高工作温度不超过 $200^\circ\text{C} \sim 250^\circ\text{C}$ 。在 $20^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 区间, d_{11} 的温度系数约为 $0.016/^\circ\text{C}$;低于这一区间变化不明显。

表 1-2 给出石英晶体的一些主要性能。

表 1-2 石英晶体的主要性能

名 称	数 据	
密 度(g/cm^3)	2.65	
弹性模量(MPa)	(001) $\parallel z$;	$E=100 \times 10^3$
	$\perp (001)$;	$E=80 \times 10^3$
弯曲强度(MPa)	90	
压电系数($\times 10^{-12}\text{C}/\text{N}$)	$d_{11}=2.3(\parallel z, \perp z)$,	$d_{14}=-0.67$
介电常数(ϵ/ϵ_0)	4.6($\parallel z, \perp z$)	
热膨胀系数($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	7.1($\parallel z$),	13.2($\perp z$)
热导率($\text{Cal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$)	$29 \times 10^3(\parallel z)$,	$16 \times 10^3(\perp z)$
电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$)	0.1×10^{15}	($\parallel z$)

2. 石英玻璃

石英玻璃(非晶态的 SiO_2)的物理特性与方向无关。这种透明的石英玻璃又叫熔凝石英。它的机械物理性能和化学性能极优。材质纯、内耗小,机械品质因数高、弹性储能比大,滞后和蠕变极小,有极其稳定的机械和化学性能。它是制造高精度传感器的可靠而理想的敏感材料。如先进的半球谐振陀螺的谐振子、精密标准压力计的敏感元件(石英弹簧管),都是采用这种理想材料制成的。

石英玻璃与大多数材料的区别是:在 $700^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 以前,它的弹性模量随温度的增高而增大,以后则随温度升高而下降。石英玻璃的容许使用温度为 1100°C 。

表 1-3 列出熔凝石英有关的机械物理性质。

表 1-3 熔凝石英的有关机械物理性质

名 称	数 据
密 度(g/cm^3)	2.50
屈服强度(MPa)	8.4×10^3
弹性模量(MPa)	73×10^3
泊松比	0.17~0.19
热膨胀系数($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	0.55

四、精密陶瓷材料

传感器用的陶瓷材料与一般陶瓷不同,它是以化学合成的物质为原料,控制其中的组分比,经过精密的成型烧结,可制成适合传感器需要的多种精密陶瓷材料,通常称其为功能陶瓷材料。充分利用功能陶瓷具有的耐热性、耐腐蚀性、多孔性、光电性、介电性和压电性等许多独特的性能,已开发出多种传感器,如陶瓷温度(新型热敏电阻)、气体、温度、光电、离子、超声、加速度、力、陀螺等传感器,还将有更多的新型传感器被开发出来。

陶瓷加速度和力传感器等使用的是陶瓷的电性,即压电陶瓷。它是由陶瓷经过极化之后形成的(见图 1-3)。压电陶瓷的弹性和电学性质

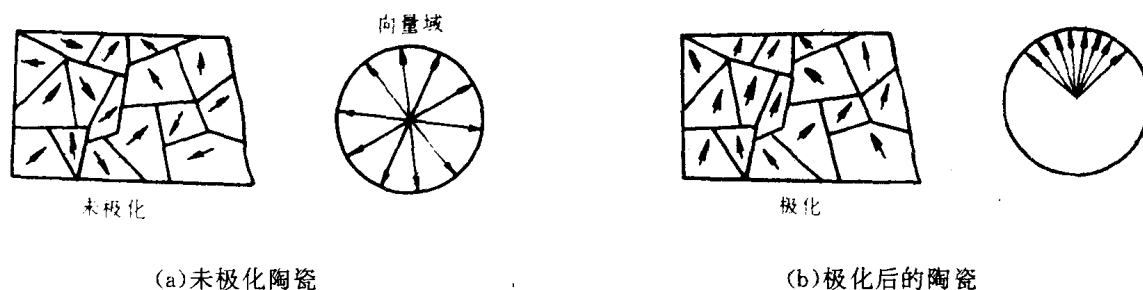


图 1-3 极化处理的陶瓷

具有耦合性,其耦合关系可用下式表示

$$d = \left(\frac{\partial D}{\partial \sigma} \right)_E = \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)_\sigma \quad (1-3)$$

式中： d, D, E, S, σ 分别代表压电常数、电位移、电场、应变和应力； $\left(\frac{\partial D}{\partial \sigma} \right)_E, \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)_\sigma$ 分别表示正压电效应、逆压电效应。

压电陶瓷为各向异性体，其压电常数矩阵为

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

可见，压电陶瓷有三个独立的压电常数，其中 d_{31} 代表横向伸缩模式， d_{33} 代表纵向伸缩模式， d_{15} 代表剪切模式。图 1-4 表示压电陶瓷的伸缩(振动)模式。

锆钛酸铅 ($\text{PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3$) 简称 PZT，是基于压电效应的传感器，最常用的压电陶瓷。世界许多国家都有系列产品。表 1-4 列出压电陶瓷一些主要性能。

表 1-4 压电陶瓷主要性能

性能参数	锆 钛 酸 铅					铌酸铅
	PZT-4	PZT-5A	PZT-7A	PZT-8	PZT-6B	$\text{Pb}(\text{NbO}_3)_2$
压电常数 $d_{33}(10^{-12}\text{C/N})$	289	374	150	225	71	85
$d_{31}(10^{-12}\text{C/N})$	-123	-171	-60	-97	-27	-9
$g_{33}(10^{-3}\text{Vm/N})$	24.9	24.8	—	25.4	—	—
$g_{31}(10^{-3}\text{Vm/N})$	-10.6	-11.4	—	-10.9	—	—
机电耦合系数						
K_{33}	0.70	0.705	0.66	0.64	0.375	0.38
K_{31}	0.33	0.34	—	0.30	—	—
K_t (厚度伸缩)	0.51	0.486	0.50	0.48	0.30	0.37
K_p (径向伸缩)	-0.58	-0.60	-0.51	-0.51	-0.25	-0.07
介电常数 (ϵ_{33}/ϵ_0)	1300	1700	425	1000	460	225
(ϵ_{11}/ϵ_0)	1475	1730	—	1290	—	—
弹性模量 (10^3MPa)						
E_{11}	82	61	93	82	110	—
E_{33}	66	53	72	74	107	—
密度 (g/cm^3)	7.6	7.7	—	7.6	—	—
抗拉强度 (MPa)	40	27	24	47	24	—
机械品质因数 Q_m	500	75	600	1000	1300	11
居里点 ($^\circ\text{C}$)	328	365	350	300	350	570

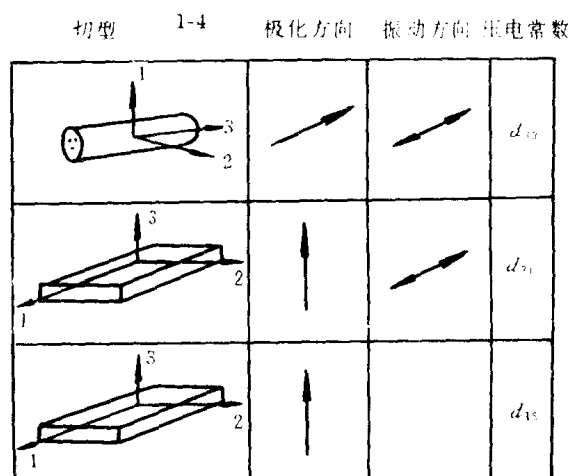


图 1-4 压电陶瓷的典型振动模式

值得指出,近些年来,基于材料的化学组分控制,以达到材料特性的控制,借以实现传感器的理想特性。如 $(\text{Pb}, \text{Ca})[(\text{CO}_{1/2}, \text{W}_{1/2})\text{Ti}]\text{O}_3$ 族就是其中一种复合压电陶瓷材料,它非常适合用于超声传感器的设计。

两相复合材料由压电陶瓷和聚合物组成(如PZT+PVDF*),它是将陶瓷粉粒填入聚合物格子中,陶瓷粉粒之间彼此不接触。填充压电陶瓷借以增强压电效应,聚合物相则可以降低材料的密度和介电常数而增加材料的弹性柔性。

表 1-5 给出 PVDF+PZT 的主要性能。

表 1-5 PVDF+PZT 的主要性能

材料	机电耦合系数 (K)	介电常数 (ϵ/ϵ_0)	压电常数		弹性模量 (10^3MPa)	密度 (g/cm^3)	声速 (m/s)	声阻抗 ($10^6\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
			$d(10^{-12}\text{C}/\text{N})$	$g(10^{-3}\text{V} \cdot \text{m}/\text{N})$				
PVDF +PZT	0.048	118	$d_{31}=30\sim50$	$g_{31}=29$	2.6	5.5	1100	5.8

五、ZnO 薄膜

作为压电体、光导体、光波导和半导体材料的氧化锌(ZnO)是一种多用途的材料。它是六角晶结构、各向异性体,具有大的压电常数、大的声光、电光和非线性光学系数,在可见光区具有光学透明和相当大的折射率。

淀积 ZnO 膜的技术有多种,目前采用最广泛的方法是磁控溅射方法。由于采用了溅射工艺,可获得压电性能、光学性能优良,表面平坦而透明的致密薄膜层。

由于 ZnO 膜具有大的压电耦合系数,故一般认为它是最有用途的一种压电薄膜材料。在较低频段内,用 ZnO 薄膜作压电换能器的传感器,实例有硅谐振膜压力传感器、压电微音器和硅振梁力传感器等。在高频段(兆赫级),常常把 ZnO 薄膜应用于制作声表面波(SAW)传感器的压电叉指换能器。

另外,ZnO 薄膜也可应用于各种传感器的平面光波导。

综合利用 ZnO 的光电导,半导和压电性能,可将表面光压电效应应用于驱动微机械构件。如图 1-5 所示,ZnO 表面受到周期性光照,从而导致其表面应力发生变化,若此变化的频率与硅梁的固有频率相同,硅梁即可产生谐振振动。

导电性 ZnO 薄膜还用于象 LEDs 和太阳能电池之类的光电子器件中的透明电极材料。

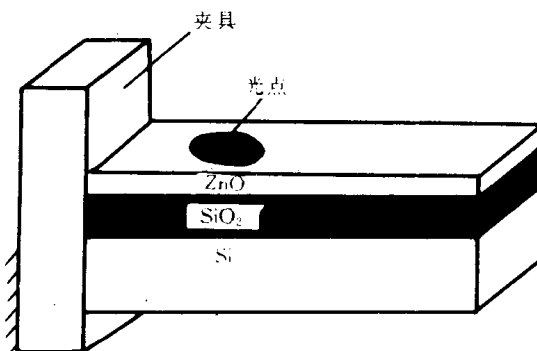


图 1-5 光驱动 ZnO/SiO₂/Si 悬臂梁

* PVDF——聚偏二氟乙烯,见下一节。