



北京市高等教育精品教材立项项目

# 新型 传感技术及应用

樊尚春 刘广玉 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)



北京市高等教育精品教材立项项目

# 新型 传感技术及应用

樊尚春 刘广玉 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书结合国际上近年来传感技术及应用方面的最新发展趋势,就传感技术的基础共性问题与几种有代表性的传感器进行深入系统地讨论。在传感技术的共性基础问题中,介绍传感技术涉及的先进材料、制造工艺、传感器建模,以及传感器向智能化方向发展的一些新概念、新思想。在有代表性的传感器中,介绍电容式传感器、谐振式传感器、声表面波式传感器、薄膜式传感器、光电式传感器与磁传感器检测原理和应用。

在介绍每一种传感器时,既重视理论分析,又结合实际应用,以便于读者掌握。

本书的每章后都配有适量的思考题与习题。

本书可作为仪器科学与技术、控制理论与工程、机械工程等专业硕士研究生的教材,也可供相关专业的师生和有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

新型传感技术及应用/樊尚春,刘广玉编著. —北京:  
中国电力出版社, 2005

北京市高等教育精品教材立项项目

ISBN 7-5083-3415-9

I. 新... II. ①樊... ②刘... III. 传感器 -  
高等学校 - 教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 062567 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2005 年 8 月第一版 2005 年 8 月北京第一次印刷  
787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 21.125 印张 481 千字  
印数 0001—3000 册 定价 29.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

# 前 言

本书是根据北京市高等教育精品教材建设项目制定的教学大纲编写的,主要用于仪器科学与技术、控制科学与工程以及机械工程等专业作为研究生教材,同时也适用于作为其他相关学科专业参考书。

传感器在当代科学技术中占有十分重要的地位,所有以计算机为基础的自动化、智能化系统,都需要传感器提供赖以做出实时决策的数据。针对这一趋势,在信息、自动化、机电一体化等技术领域,国内外都明显加强了对传感技术及应用方面的研究;在仪器科学与技术、控制科学与工程以及机械工程等学科的研究生和本科生教学中,也都新开设了以“传感器”为核心的课程,而且有逐步加强的趋势。

近年来传感技术发展非常迅速,国内外在传感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(如硅、石英、陶瓷等),采用微机械加工工艺和微电子技术,从传统的结构设计转向微机械加工工艺的微结构设计,研制各种新型传感器及传感器系统,以满足自动化与智能化系统对传感器在体积、质量、功耗及动、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。

全书共分11章。前五章介绍传感技术中的一些共性基础问题,重点介绍传感技术中采用的先进材料,如硅及其化合物材料、半导体化合物材料,电致伸缩和磁致伸缩材料,恒弹和高弹合金材料,以及具有广泛应用前景的纳米材料;介绍以硅材料为重点的制造技术,包括硅半导体平面工艺和三维体型加工工艺;介绍一些有代表性的传感器敏感结构的建模和模拟计算方法;介绍传感器向智能化方向发展的一些新概念、新思想。后六章介绍六类有代表性的传感器:电容式传感器、谐振式传感器、声表面波式传感器、薄膜式传感器、光电式传感器与磁传感器的检测原理和应用。

本书与已出版的同类型书籍相比,内容充实、编排新颖,并且增补了传感器的若干最新研究成果,不但重理论,而且重应用。

本书由北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院测控与信息技术系樊尚春教授(第3~9章)和刘广玉教授(第1,2,10,11章)编著。在编写过程中,作者结合多年来在研究生教学工作中积累的经验与科研工作中取得的研究结果,同时参考、引用了许多专家学者的论著和教材;清华大学精密仪器及机械学系丁天怀教授审阅了全稿并提出了许多宝贵的意见和建议,在此一并表示衷心感谢。

新型传感技术领域内容广泛且发展迅速,尽管我们作了很大努力,由于编著者水平所限,不免一些内容仍有疏漏与不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2005年1月

# 目 录

## 前言

<b>1 传感器与敏感材料</b> .....	1	4.6 E形圆膜片的建模 .....	143
1.1 概述 .....	1	4.7 带有顶盖的圆柱壳的建模 .....	150
1.2 硅材料 .....	1	4.8 顶端开口圆柱壳的建模 .....	157
1.3 化合物半导体材料 .....	6	4.9 半球壳的建模 .....	161
1.4 压电材料 .....	7	思考题与习题 .....	174
1.5 磁致伸缩材料 .....	13	<b>5 传感器技术的智能化</b> .....	176
1.6 形状记忆合金 .....	14	5.1 发展背景与功能 .....	176
1.7 熔凝石英 .....	15	5.2 智能化传感器的实现 .....	177
1.8 光导纤维 .....	16	5.3 典型应用 .....	181
1.9 弹性合金 .....	16	5.4 发展前景 .....	184
1.10 纳米材料 .....	17	思考题与习题 .....	185
思考题与习题 .....	18	<b>6 硅电容式集成传感器</b> .....	186
<b>2 传感器的制造和封装技术</b> .....	19	6.1 概述 .....	186
2.1 概述 .....	19	6.2 硅电容式集成压力传感器 .....	187
2.2 硅微加工技术 .....	19	6.3 硅电容式集成压力传感器的	
2.3 LIGA 技术和 SLIGA 技术 .....	37	接口电路 .....	191
2.4 特种精密加工技术 .....	39	6.4 硅电容式加速度传感器 .....	197
2.5 封装技术 .....	39	6.5 硅电容式角速度传感器 .....	199
思考题与习题 .....	50	思考题与习题 .....	200
<b>3 传感器建模的力学基础</b> .....	52	<b>7 谐振式传感器</b> .....	202
3.1 概述 .....	52	7.1 概述 .....	202
3.2 弹性体的应力 .....	53	7.2 谐振式传感器的基础理论 .....	203
3.3 弹性体的应变 .....	59	7.3 谐振弦式压力传感器 .....	209
3.4 弹性体的物理方程 .....	83	7.4 谐振膜式压力传感器 .....	210
3.5 弹性体的能量方程 .....	85	7.5 谐振筒压力传感器 .....	211
思考题与习题 .....	90	7.6 谐振式角速率传感器 .....	219
<b>4 传感器的建模</b> .....	91	7.7 谐振式直接质量流量传感器 .....	228
4.1 弹性圆柱体(杆)的建模 .....	91	7.8 硅微结构谐振式传感器 .....	235
4.2 梁的建模 .....	100	思考题与习题 .....	241
4.3 圆平膜片的建模 .....	106	<b>8 声表面波传感器</b> .....	243
4.4 矩形(方形)平膜片的建模 .....	125	8.1 概述 .....	243
4.5 波纹膜片的建模 .....	139	8.2 表面波的基本理论 .....	244

8.3	声表面波叉指换能器	249	10.4	光导型传感器	290
8.4	声表面波谐振器	253	10.5	光电型传感器	292
8.5	SAW 加速度传感器	255	10.6	CCD 成像传感器	293
8.6	SAW 压力传感器	257	10.7	红外焦平面成像传感器	303
8.7	SAW 气体传感器	260	10.8	光纤传感器	306
8.8	SAW 流量传感器	263	思考题与习题	314	
	思考题与习题	265	<b>11 磁传感器</b>	315	
<b>9 薄膜传感器</b>		266	11.1 概述	315	
9.1 概述		266	11.2 磁传感器的工作原理	315	
9.2 几种薄膜传感器		267	11.3 霍尔元件与霍尔传感器	320	
思考题与习题		279	11.4 磁阻元件和传感器	326	
<b>10 光电传感器</b>		280	11.5 硅谐振式磁传感器简介	328	
10.1 概述		280	思考题与习题	330	
10.2 基本原理		281	参考文献	331	
10.3 光电传感器的一些性能参数		285			

## ● 新型传感技术及应用 ●

## 传感器与敏感材料

## 1.1 概 述

传感器必须是由对外界变化敏感的材料, 又称功能材料制成的器件。称这种功能材料为敏感材料。它直接感知(感受)被测对象施于的能量, 以形变或物性变化响应之, 再将其转换为可用的电信号输出。

敏感材料有多种, 包括半导体、绝缘体、压电材料、金属材料、磁性材料、有机材料以及超导材料等。而现代传感器用得最多的敏感材料当属半导体及其化合物和化合物半导体。

敏感材料的材质是设计和制造高性能传感器的基础。材料自身的优良性能能否充分发挥, 在很大程度上取决于制造它时采用的工艺方法和处理过程。工艺方法和处理过程不当, 会导致材料内部产生残余应力, 制约了材料固有优良性能的发挥, 最终影响到传感器性能, 使之下降。所以, 在设计和制造传感器时, 除优选敏感材料外, 还必须考虑选择恰当的工艺方法。

此外, 从传感器整体结构考虑, 还应顾及到与传感器敏感部分相匹配的一些结构材料的选用, 以减小因膨胀系数不同而产生的热应力和隔离外界非被测对象(或因素)对敏感部分的干扰。

## 1.2 硅 材 料

## 1.2.1 单晶硅

硅在集成电路和微电子器件生产中有着广泛的应用, 主要是利用硅的电学特性; 在传感器设计中, 往往同时利用其优良的机械特性和电学特性, 以研制不同敏感机理的传感器。

硅材料储量丰富, 硅晶体生长不难, 并能获得纯净无杂, 不纯度在十亿分之一数量级, 内耗小, 机械品质因数高达  $10^6$  数量级(实际值常比其最高值小几倍)的材料。设计和制造得当的敏感元件, 能达到极小的迟滞和蠕变, 极佳的重复性和长期稳定性。所以, 用硅材料制作传感器, 有利于解决长期困扰传感器领域的三个难题——迟滞、重复性和长期漂移。

硅材料质量轻、密度为  $2.33\text{g}/\text{cm}^3$ , 是不锈钢密度的  $1/3.5$ , 而弯曲强度却为不锈钢的  $3.5$  倍, 具有较高的强度/密度比和刚度/密度比。

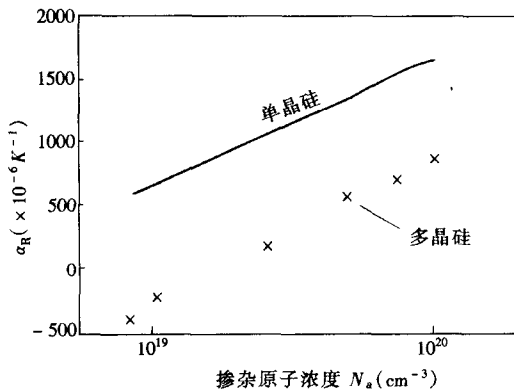


图 1.2.1 硅的电阻温度系数

甚至次  $10^{-6}$  数量级敏感到输入信号。

硅材料的制造工艺与集成电路工艺有很好的兼容性。这便于制造微型化、集成化的硅传感器。

基于上述这些优点，使硅材料成为制造微机械结构和微型化传感器首选材料。但是，硅材料对温度很敏感，其电阻温度系数接近于  $2000 \times 10^{-6}/K$  的数量级，见图 1.2.1。因此，凡是基于硅的压阻效应为测量原理的传感器，必须进行温度补偿。这是硅材料对温度很敏感带来的不利的一面，但也有可利用的一面，则是在测量被测参数的同时，可以直接对温度也进行测量。

表 1.2.1 给出单晶硅材料的主要物理性质。

表 1.2.1 单晶硅材料的主要物理性质

物性参数	数 据	
密度 $\rho_m$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.33	
弯曲强度 (MPa)	70 ~ 200	
屈服强度 (MPa)	7000	
弹性模量 $E$ (MPa) 和切变模量 $G$ (MPa)	N 型硅	
	(100) $E = \begin{cases} 130 \times 10^3 \\ 170 \times 10^3 \\ 190 \times 10^3 \end{cases}$	$G = \begin{cases} 79 \times 10^3 \\ 61.7 \times 10^3 \\ 57.5 \times 10^3 \end{cases}$
$\frac{1}{E} \frac{dE}{dT}$ (1/K)	N 型硅	
	(100) $-63 \times 10^{-6}$	P 型硅
	(110) $-80 \times 10^{-6}$	
	(111) $-46 \times 10^{-6}$	
泊松比 $\mu$	(100) 0.278	(111) 0.18
线膨胀系数 $\alpha_1$ (1/K)	$2.62 \times 10^{-6}$	
热导率 $\lambda$ (W/(m·K))	157	
电阻应变灵敏系数 $K_s$ ( $K_s = \frac{1}{\epsilon} \frac{\Delta R}{R}$ )	(100) -132	+10
	(110) -52	+123
	(111) -13	+177
电阻率 $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	$11.7 \times 10^{-2}$	
压阻系数 $\pi$ (m <sup>2</sup> /N)	$\pi_{11} = -102 \times 10^{-11}$	$\pi_{11} = 6.6 \times 10^{-11}$
	$\pi_{12} = 53.4 \times 10^{-11}$	$\pi_{12} = -1.1 \times 10^{-11}$
	$\pi_{44} = -13.6 \times 10^{-11}$	$\pi_{44} = 138 \times 10^{-11}$

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，能很好地和低膨胀合金钢（Invar 合金）连接，并避免热应力产生。

单晶硅为对称立方晶体，是各向异性材料，许多机械特性和电学特性取决于晶向，如弹性模量，压阻效应等。

单晶硅的电阻应变灵敏系数 ( $K_s = \frac{1}{\epsilon} \frac{\Delta R}{R}$ ) 高，在同样输入下，可以得到比金属应变计更高的信号输出，一般为金属的 10 ~ 100 倍，能在  $10^{-6}$  数量级



### 1.2.2 多晶硅

多晶硅 (poly-si) 是许多单晶 (晶粒) 的聚合物。这些晶粒的排列是无序的, 不同的晶粒有不同的单晶取向, 而每一晶粒内部有单晶的特征。晶粒与晶粒之间的部位叫晶界, 晶界对其电特性的影响可以通过控制掺杂浓度来调节。现就多晶硅的电阻率、电阻温度系数及电阻应变灵敏系数与掺杂浓度的关系论述如下。

多晶硅膜一般由低压化学气相淀积 (LPCVD) 法制作而成, 其电阻率随掺杂浓度的变化特性如图 1.2.2 中的实线所示, 虚线代表的是扩散电阻的单晶硅电阻率特性。由图可见, 多晶硅膜的电阻率比单晶硅的高, 特别在低掺杂原子浓度下, 多晶硅电阻率迅速升高。随着掺杂原子浓度不同, 其电阻率可在较宽数值范围内变化。

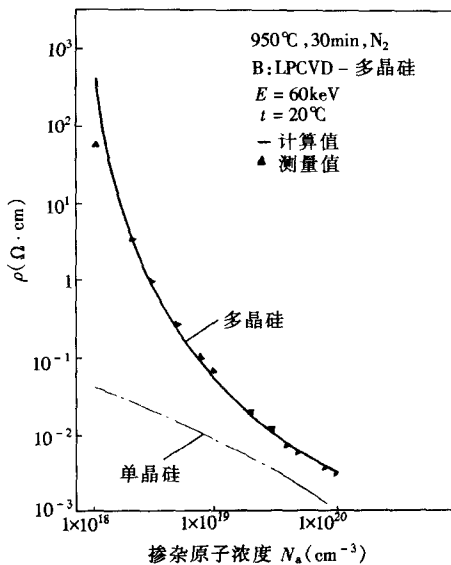


图 1.2.2 电阻率与掺杂原子浓度的关系

图 1.2.3 所示为不同掺杂原子浓度的多晶硅电阻随温度的变化特性, 一般为非线性, 可表达为

$$R(t) = R_0 \exp[\alpha_R(t - t_0)] \quad (1.2.1)$$

式中  $R_0$ ——温度为 20°C 时的电阻;  
 $t_0$ ——温度,  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ;  
 $t$ ——实时温度;  
 $\alpha_R$ ——电阻温度系数。

电阻温度系数  $\alpha_R$  与掺杂原子浓度的关系如图 1.2.4 所示。掺杂原子浓度的不同, 使得多晶硅膜的电阻温度系数在很大范围内变化。掺杂原子浓度低时出现很大负值, 随着浓度增加, 电阻温度系数经过 0 而达到正值。

图 1.2.5 所示为多晶硅相对电阻与纵向应变的关系。由图可见, 压缩时电阻下降, 拉伸时电阻上升。

图 1.2.6 表示多晶硅电阻应变灵敏系数与掺杂原子浓度的关系。由图可知, 电阻应变灵敏系数随掺

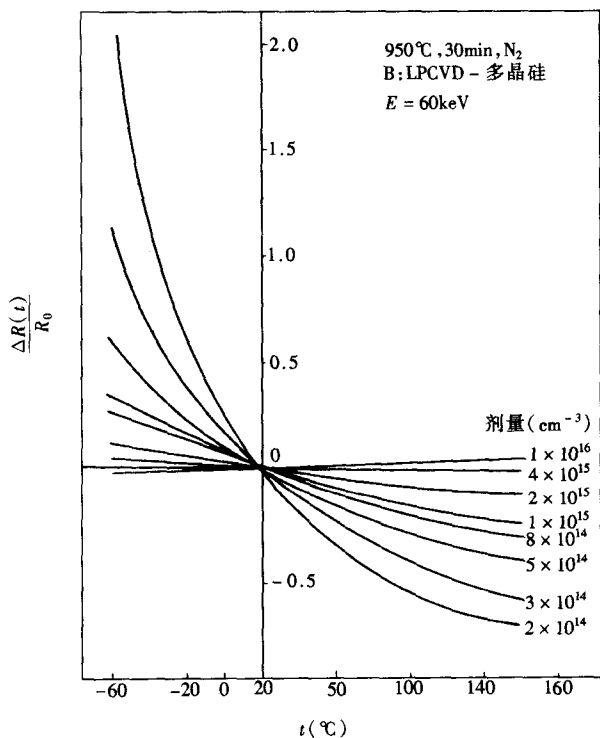


图 1.2.3 多晶硅电阻随温度变化的特性

$R_0$ ——温度为 20°C 时的电阻

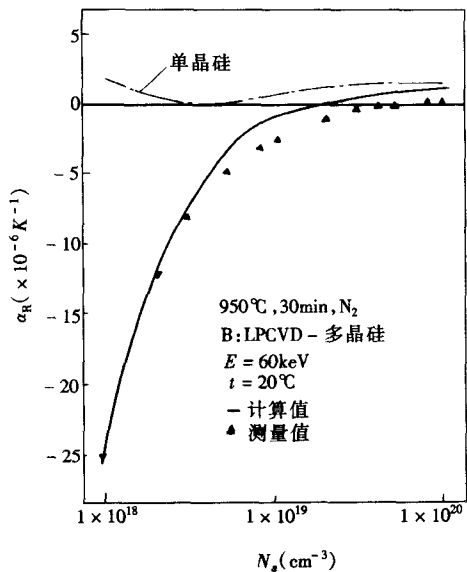


图 1.2.4 电阻温度系数与掺杂原子浓度的关系

杂浓度的增加而略有下降。其中  $K_t$  为纵向应变灵敏系数，最大值约为金属应变计最大值的 30 倍，为单晶硅电阻应变灵敏系数最大值的 1/3。 $K_l$  为横向应变灵敏系数，其值随掺杂浓度出现正负变化，故一般都不采用。

此外，与单晶硅压阻膜相比，多晶硅压阻膜可以在不同的材料衬底上制作，如在介电体 ( $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) 上。其制备过程与半导体硅的工艺兼容，且无 PN 结隔离问题，因而适合在更高工作温度 ( $t \geq 200^\circ\text{C}$ ) 场合使用。在相同工作温度下，多晶硅压阻膜与单晶硅压阻膜相比，可更有效地抑制温度漂移，有利于长期稳定性的实现。多晶硅电阻膜的准确阻值，可以通过光刻手段获得。

综上所述，多晶硅膜具有较宽的工作温度范围 ( $-60 \sim +300^\circ\text{C}$ )、可调的电阻率特性、可调的温度系数、较高的应变灵敏系数及能达到准确调整阻值的特点，所以在研制微传感器和微执行器时，利用多晶硅膜这些电学特

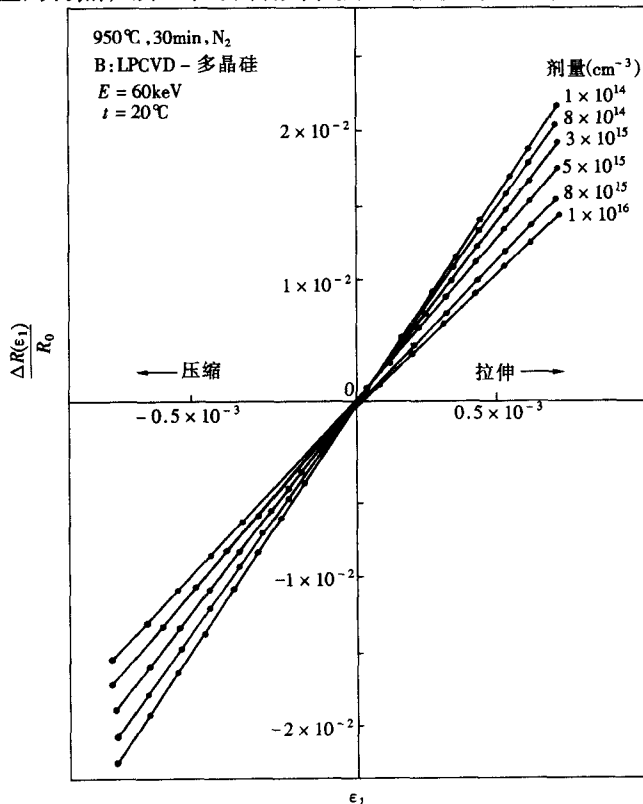


图 1.2.5 多晶硅相对电阻与纵向应变的关系

性，有时比只用单晶硅更有价值。例如，利用机械性能优异的单晶硅制作感压膜片，在其上覆盖一层介质膜  $\text{SiO}_2$ ，再在  $\text{SiO}_2$  上淀积一层多晶硅压敏电阻膜制成混合结构的微型压力传感器（如图 1.2.7 所示），发挥了单晶硅和多晶硅材料各自的优势，其工作高温至少可达到  $200^\circ\text{C}$ ，甚至  $300^\circ\text{C}$ ，低温为  $-60^\circ\text{C}$ 。该传感器的输出特性如图 1.2.8 所示。

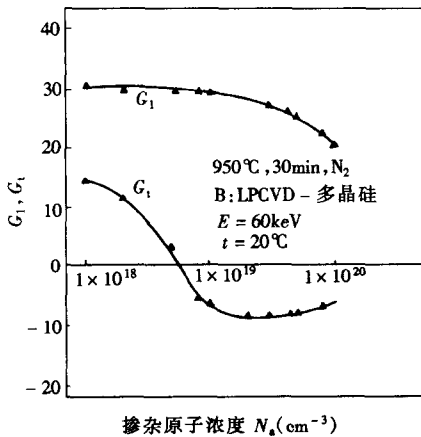


图 1.2.6 多晶硅电阻应变灵敏系数与掺杂原子浓度的关系

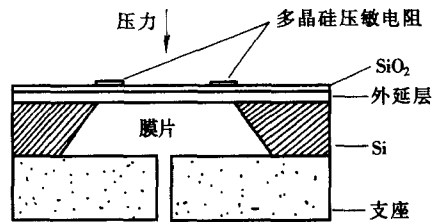


图 1.2.7 多晶硅压敏电阻压力传感器

### 1.2.3 碳化硅 (SiC)

$\text{SiC}$  是由碳原子和硅原子组成，利用离子注入掺杂技术将碳原子注入单晶硅内，便可获得优质的立方晶体结构的  $\text{SiC}$ 。随着掺杂浓度的差异，得到的晶体结构不同，可表示为  $\beta\text{-SiC}$ 。 $\beta$  表示不同形态的晶体结构。

用离子注入法得到的  $\text{SiC}$  材料，自身的物理、化学及电学特性优异，表现出高强度、高硬度、残余应力很低、化学惰性极强、较宽的禁带宽度（近乎硅的 1~2 倍）以及较高的压阻系数。因此， $\text{SiC}$  材料能在高温下耐腐蚀、抗辐射，并具有稳定的电学性质，非常适合选为制作高温、恶劣环境下工作的传感器材料。

由于  $\text{SiC}$  单晶材料硬度高，加工难度大，所以，以硅单晶片为衬底的  $\text{SiC}$  薄膜，就成为研究和使用的理想选择。通过离子注入、化学气相淀积等技术，将其制作在  $\text{Si}$  衬底上或者绝缘体 ( $\text{SiCOI}$ ) 衬底上，供设计者选用。例如，可选用以绝缘体为衬底的  $\text{SiC}$  薄膜，作为感压敏感元件（如膜片），并制成高温压力传感器，实现航空发动机、火箭、导弹及卫星等耐热腔体及其表面部位的压力测量，工作温度可达  $600^\circ\text{C}$  以上。

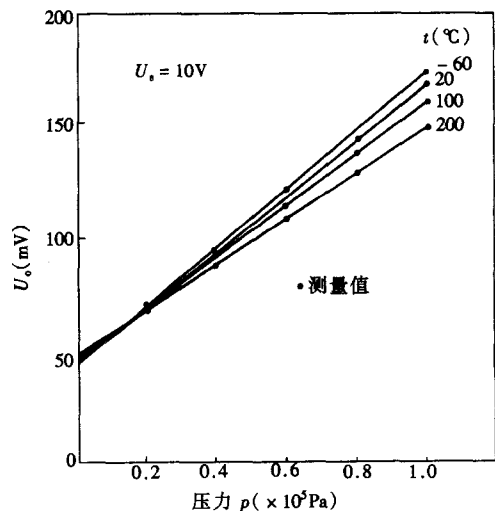


图 1.2.8 多晶硅压敏电阻压力传感器输出特性

除了使用单晶 SiC 薄膜外, 还可选用多晶 SiC 薄膜。与单晶 SiC 薄膜相比, 多晶 SiC 薄膜的适用性更广。它可以在多种衬底 (如单晶硅、绝缘体、SiO<sub>2</sub> 及非晶硅等) 上, 采用离子体强化气相淀积、物理溅射、低压气相淀积以及电子束放射等技术 (工艺方法详见第 2 章) 生长成薄膜, 供制作高温压力传感器等使用。

#### 1.2.4 氧化硅和氮化硅

硅的氧化物——SiO<sub>2</sub>, 是一种介电材料, 不仅能掩蔽杂质的掺杂, 而且能为器件表面提供优良的保护层。

硅的化合物——Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, 也是一种介电材料, 并且耐腐蚀, 不仅能为器件表面提供优良的钝化层, 还因其具有极高的机械强度, 适合于制作很薄 (厚度约为 1μm) 的弹性元件, 如膜片、梁等。

上述 Poly-Si、SiC、SiO<sub>2</sub> 和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 四种薄膜材料, 在硅传感器中各有不同用途。Poly-Si 和 SiC 膜常被选用作为敏感被测对象的薄膜使用; SiO<sub>2</sub> 膜常被选用作为介质膜起绝缘作用, 同时它还用来起尺寸控制作用的衬垫层 (或牺牲层), 在器件加工完成之前腐蚀掉; 而 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 膜常用其覆盖在 Si 器件表面上, 起到防腐蚀保护作用, 并且具有较久的耐磨性。

这些作为薄膜使用的材料, 视应用场合, 其厚度可从几十纳米直到 2μm 之间选择。

表 1.2.2 给出上述四种材料的主要物理性质。

表 1.2.2 Poly-Si、SiC、SiO<sub>2</sub>、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的主要物理性质

物性参数	Poly-Si	SiC	SiO <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
密度 ρ <sub>m</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	类同单晶硅	—	2.55	3.44
弹性模量 E (MPa)	(145 ~ 170) × 10 <sup>3</sup>	(430 ~ 450) × 10 <sup>3</sup>	(50 ~ 80) × 10 <sup>3</sup>	(280 ~ 310) × 10 <sup>3</sup>
线膨胀系数 α <sub>l</sub> (1/K)	(2 ~ 2.8) × 10 <sup>-6</sup>	3.4 × 10 <sup>-6</sup>	(0.5 ~ 0.55) × 10 <sup>-6</sup>	(0.8 ~ 2.8) × 10 <sup>-6</sup>
泊松比 μ	0.25	—	—	—
热导率 λ [W/(m·K)]	13	68	6.5	19

### 1.3 化合物半导体材料

硅及其化合物是设计和制造传感器的主要材料。先进的成像传感器和光电传感器近来日益多的采用化合物半导体材料。例如, 红外传感器 (探测器), 是利用红外辐射与物质作用产生的各种效应发展起来的。实用的光敏红外探测器, 主要是针对红外辐射在大气传输中透射率最为清晰的三个波段 (1 ~ 3、3 ~ 5、8 ~ 14μm) 研制的。对于波长 1 ~ 3μm 敏感的有 PbS、InAs 及 Hg<sub>0.61</sub>Cd<sub>0.39</sub>Te 材料制成的探测器; 对于波长 3 ~ 5μm 敏感的有 InAs、PbSe 及 Hg<sub>0.73</sub>Cd<sub>0.27</sub>Te 材料制成的探测器; 对于波长 8 ~ 14μm 敏感的有 Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te、Hg<sub>0.8</sub>Cd<sub>0.2</sub>Te 及非本征半导体 Ge:Hg、Si:Ga 及 Si:Al 等材料制成的探测器。

其中三元合金 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 是一种本征吸收材料, 通过调整材料组分, 不仅可以制成适合三个波段的器件, 还可以开发在更长工作波段 (1 ~ 30μm) 上的应用, 因而备受人们

的关注。

化合物半导体材料的具体应用详见本书第 10 章。

## 1.4 压电材料

### 1.4.1 压电效应

压电材料的主要属性是其弹性效应和电极化效应在机械应力或电场（压）作用下将发生相互耦合，应力 - 应变 - 电压之间的内在耦合关系可表示为

$$d_{ij} = \left( \frac{\partial D}{\partial \sigma} \right)_E = \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial E} \right)_\sigma \quad (1.4.1)$$

式中， $d_{ij}$  为压电常数； $D$  为电位移； $E$  为电场强度； $\epsilon$  为应变； $\sigma$  为应力； $\left( \frac{\partial D}{\partial \sigma} \right)_E$ 、 $\left( \frac{\partial \epsilon}{\partial E} \right)_\sigma$  分别为正压电效应和逆压电效应；括号外的下标表示作为条件恒定不变的参数，实际上，往往以外电路短路（ $E=0$ ）和压电体不受机械约束的自由状态（ $\sigma=0$ ）来满足恒定条件；下标  $i$ 、 $j$  分别表示电场方向和应力方向。

正压电效应表现为在机械应力作用下，将机械能转换为电能；逆压电效应，则是在电压作用下，将电能转换为机械能。

反映压电材料能量转换效率的系数叫机电耦合系数，用  $k_{ij}$  表示，计算式为

$$k_{ij} = \left( \frac{\text{由正压电效应转换为电能}}{\text{输入机械能}} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{\text{由逆压电效应转换为机械能}}{\text{输入电能}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.4.2)$$

利用正压电效应可制成机械能的敏感器（检测器）；利用逆压电效应可制成电激励的驱动器（执行器）。可见，压电材料是一种具有双向功能的材料，在双向机电式传感器设计中得到广泛的应用。

### 1.4.2 压电石英晶体

石英的化学组成是  $\text{SiO}_2$ ， $\text{SiO}_2$  的晶态形式为石英晶体（Quartz）。它的理想形状为六角锥体，见图 1.4.1。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），通过梭线并与  $z$  轴正交的轴线称为  $x$  轴（电轴）。

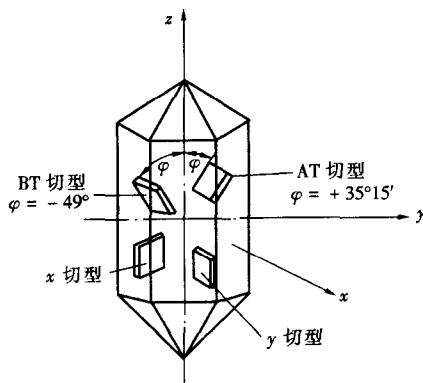


图 1.4.1 石英晶体的理想形状

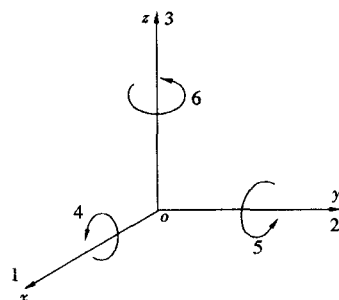


图 1.4.2 压电常数的轴向表示法

石英晶体是各向异性材料，不同晶向具有各向异性的物理特性。石英晶体又是压电材料，其压电效应与晶向有关，压电矩阵可写为

$$d_{ij} = \begin{pmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ -d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & -2d_{11} & 0 \end{pmatrix} \quad (1.4.3)$$

$d_{ij}$ 称为压电常数。

根据图 1.4.2 可看出，式 (1.4.3) 中下标 1~6 与三个晶轴  $x, y, z$  有关。压电常数  $d_{ij}$  的物理意义可用量纲表示法阐明。对于正压电效应，则有

$$\dim d_{ij} = \frac{C/m^2}{N/m^2} = C \cdot N^{-1} \quad (1.4.4)$$

即每单位力输入时的电荷输出。

对于逆压电效应，则有

$$\dim d_{ij} = \frac{m/m}{V/m} = m \cdot V^{-1} \quad (1.4.5)$$

即每单位场强作用下的应变输出。

为计算方便，引入压电电压常数  $g_{ij}$ ，则

$$\dim g_{ij} = \frac{V/m}{N/m^2} = V \cdot m \cdot N^{-1} \quad (1.4.6)$$

该常数表示每单位压强下的电压输出。

式中， $m, V, N$  及  $C$  分别为米、伏、牛、及库的单位符号。

由式 (1.4.3) 可知，虽然压电矩阵含有 18 项，但石英对称条件要求其中 13 项应取 0 值，并要求其他项之间有一定关系，即  $d_{12} = -d_{11}$ ， $d_{25} = -d_{14}$ ， $d_{26} = -2d_{11}$ 。

这样，最后只剩下 2 个独立的压电常数  $d_{11}$  和  $d_{14}$ 。它们的数值分别为  $d_{11} = 2.3 \times 10^{-12} C \cdot N^{-1}$ ， $d_{14} = -0.67 \times 10^{-12} C \cdot N^{-1}$ 。

石英晶体又是绝缘体，在其表面淀积金属电极引线，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。它材质纯、内耗低及功耗小，机械品质因数的理想值可高达  $10^6$  数量级，迟滞和蠕变极小，小到可以忽略不计。

石英材质轻，密度为  $2.65g/cm^3$ ，为不锈钢的  $1/3$ ，弯曲强度为不锈钢的 4 倍。

石英晶体的实际最高工作温度不应超过  $250^\circ C$ ，在  $20 \sim 200^\circ C$  区间， $d_{11}$  的温度系数为  $0.016/^\circ C$ 。

表 1.4.1 给出了石英晶体的主要物理性质。

石英晶体作为压电材料，主要用于制造压电振子和换能器。前者利用材料本身的谐振特性，基于电—机和机—电转换原理进行工作，要求有较高的机械品质因数；后者主要用于将一种形式的能量转换为另一种形式的能量，要求换能效率高。

表 1.4.1

石英晶体的主要物理性质

物性参数	数 据	物性参数	数 据
密度 $\rho_m$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.65	介电常数 $\epsilon_r = \epsilon\epsilon_0^{-1}$	4.6 ( $\parallel z$ , $\perp z$ )
弹性模量 $E$ (MPa)	(001) $\parallel z$ : $100 \times 10^3$	热膨胀系数 $\alpha_L$ ( $\times 10^{-6}/\text{K}$ )	7.1 ( $\parallel z$ ), 13.2 ( $\perp z$ )
	(001) $\perp z$ : $80 \times 10^3$	热导率 $\lambda$ [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]	$455.3 \times 10^{-2}$ ( $\parallel z$ ), $251.2 \times 10^{-2}$ ( $\perp z$ )
弯曲强度 (MPa)	90		
压电常数 $d_{ij}$ ( $\times 10^{-12}\text{C}/\text{N}$ )	$d_{11} = 2.3$ , $d_{14} = -0.67$	电阻率 $\rho$ ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	$0.1 \times 10^{15}$

注  $\epsilon_0$  (真空介电常数)  $= 8.854 \times 10^{-12}\text{F}/\text{m}$ ;  $\epsilon_r$  为相对介电常数。

压电石英具有很高的机械品质因数, 而其换能效率不够理想, 所以主要用来制造诸如谐振器、振荡器及滤波器等。

### 1.4.3 压电陶瓷

陶瓷材料是以化学合成物质为原料, 经过精密的成型烧结而成。烧结前, 严格控制合成物质的组分比, 便可以研制成适合多种用途的功能陶瓷, 如压电陶瓷 (电致伸缩陶瓷)、半导体陶瓷、导电陶瓷、磁性陶瓷及多孔陶瓷等。

压电陶瓷是陶瓷经过电极化之后形成的, 如图 1.4.3 所示。电极化之后的压电陶瓷为各向异性的多晶体。

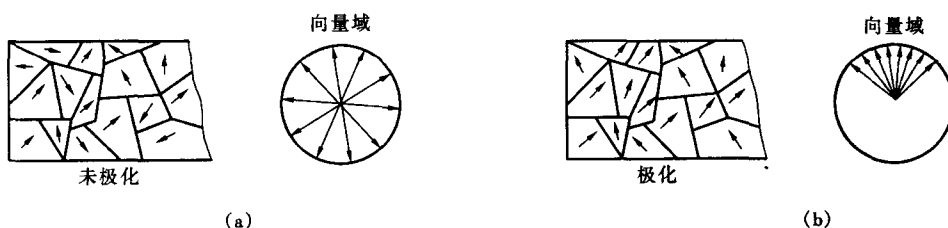


图 1.4.3 电极化处理的陶瓷

(a) 未极化陶瓷; (b) 极化后陶瓷

压电陶瓷的弹性效应和电极化效应具有耦合性, 耦合关系如式 (1.4.1) 所示。压电常数矩阵为

$$d_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.4.7)$$

式中, 矩阵元素  $d_{32} = d_{31}$ ,  $d_{24} = d_{15}$ 。

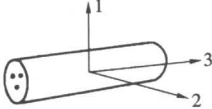


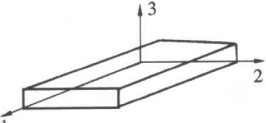


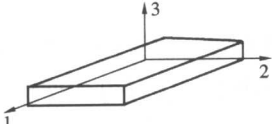

由此可见, 压电陶瓷有 3 个独立的压电常数。其中  $d_{31}$  代表横向向伸缩模式,  $d_{33}$  代表纵向向伸缩模式,  $d_{15}$  代表剪切模式, 见表 1.4.2。

压电陶瓷材料有多种, 最早的是钛酸钡 ( $\text{BaTiO}_3$ ), 现在最常用的是锆钛酸铅 ( $\text{PbZrO}_3 - \text{PbTiO}_3$ ), 简称 PZT。PZT 良好的压电性, 成为它们用途广泛的重要基础。

基于材料化学组分的控制和掺杂技术的应用, 在 PZT 陶瓷中掺镧, 研制成掺镧锆钛酸铅, 简称 PLZT, 是一种透明的压电陶瓷; 利用 PLZT 的电控光折射效应和电控光散射效

应, 可以进行光调制、光存储及光显示, 并可制成各种光阀和光闸。

表 1.4.2 压电陶瓷的振动模式

切 型	极化方向	振动方向	压电常数
			$d_{33}$
			$d_{31}$
			$d_{15}$

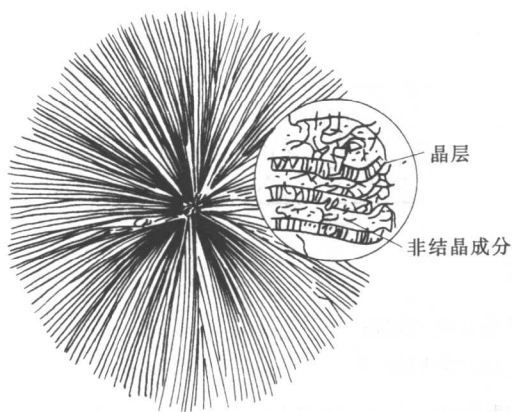


图 1.4.4 PVF<sub>2</sub> 晶粒组织示意图

#### 1.4.4 聚偏二氟乙烯薄膜

聚偏二氟乙烯 (简称 PVDF 或 PVF<sub>2</sub>) 是一种压电和热释电高分子功能材料。它是由重复单元 (CF<sub>2</sub> - CH<sub>2</sub>) 长链分子组成的半晶态聚合物, 相对分子质量约为 10<sup>5</sup>, 分子链展开长度约为 0.5 μm, 相当于 2000 个重复单元; 材料内部组织由分层结构的晶体与无定形结构混合而成; 晶体薄层约占 50%, 厚度约为 0.01 μm。图 1.4.4 所示为 PVF<sub>2</sub> 晶粒组织的示意图。由图可见, 分子链在晶层内来回折叠多次。

PVF<sub>2</sub> 薄膜通常用单向拉伸或双向拉伸改善其机械特性和压电特性。经单向拉伸后再极化, 其压电常数矩阵为

$$d_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.4.8)$$

对于双向拉伸而言,  $d_{32} = d_{31}$ ,  $d_{24} = d_{15}$ 。式中, 下标 1、2、3 分别代表薄膜的拉伸方向、平面内的横向方向及厚度方向 (见图 1.4.5)。

PVF<sub>2</sub> 薄膜在温度作用下会产生热应力变化, 导致电荷的电效应, 即热释电效应。热



释电常数为

$$p_y = \left( \frac{dp_s}{dT} \right)_{\substack{E=0 \\ \sigma=0}} \quad (1.4.9)$$

式中， $p_s$  和  $T$  分别代表极化强度和温度。

温度升高使薄膜晶态的体积增加，同时也使沿第 3 垂直轴（厚度方向）的平均偶极矩降低，最终导致沿第 3 垂直轴方向的极化强度下降。

在此情况下，沿轴 1、轴 2 方向不存在有效的偶极矩，即在轴 1、轴 2 方向的热释电常数  $p_1$  和  $p_2$  为 0。这样，热释电常数矩阵为

$$p_y = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -p_3 \end{pmatrix} \quad (1.4.10)$$

即只有一个非 0 值  $p_3$ ，且为负值。

PVF<sub>2</sub> 压电薄膜是一种柔性、质轻、高韧度塑料薄膜，并可制成多种厚度和较大面积的阵列元件。作为一种高分子传感材料，它的主要特点如下：

(1) 可制成轻软而结实的检测元件，附着在被测对象的弯曲或柔性表面上，对参数进行检测。

(2) 化学稳定性高，且不会析出有毒物质，与人的血液有良好的兼容性，适用于体内检测。

(3) 有和水及人体软组织相接近的低声阻抗 [水的声阻抗为  $1.5 \times 10^6 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，PVF<sub>2</sub> 的为  $2.7 \times 10^6 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，而压电陶瓷的则在  $30 \times 10^6 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  以上]，因而在 PVF<sub>2</sub>/水界面上有较低的声反射系数，约 0.43 (PZT/水界面上的声反射系数达 0.91)。故用 PVF<sub>2</sub> 作为水下声（或超声）检测装置或人体超声诊断设备的检测元件，可省去阻抗匹配层。

(4) PVF<sub>2</sub> 的压电常数比石英高 1 个数量级，比压电陶瓷低 1 个数量级。而压电电压常数  $g_{ij}$  则远远大于压电陶瓷，非常适合制作高灵敏度的应力（应变）检测元件，而不适合制作激励器。

(5) 加工性能好，易于制作大面积、不同厚度（数微米至 1mm 以上）的薄膜，也可用模压技术制成多种特定形状的元素。这给设计和应用带来极大的灵活性。

(6) PVF<sub>2</sub> 内阻大，固有频率高，具有优异的宽频带响应特性（在  $10^{-3} \sim 5 \times 10^8 \text{Hz}$  内，响应平坦，振动模式单纯，余波极小）。

尽管 PVF<sub>2</sub> 薄膜的尺寸稳定性和热稳定性（工作温度  $-40 \sim +80^\circ\text{C}$ ）都比相应的压电陶瓷差些，但像任何一种功能材料一样，PVF<sub>2</sub> 可被使用在能发挥其优势而又能忽略其劣势的场合，如拾音传声、振

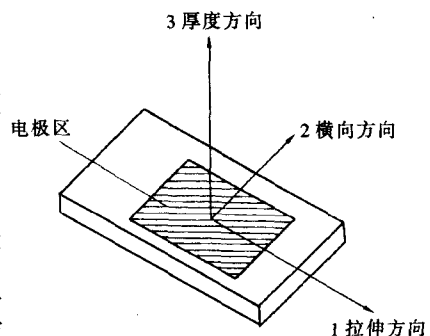


图 1.4.5 PVF<sub>2</sub> 轴向代表符号