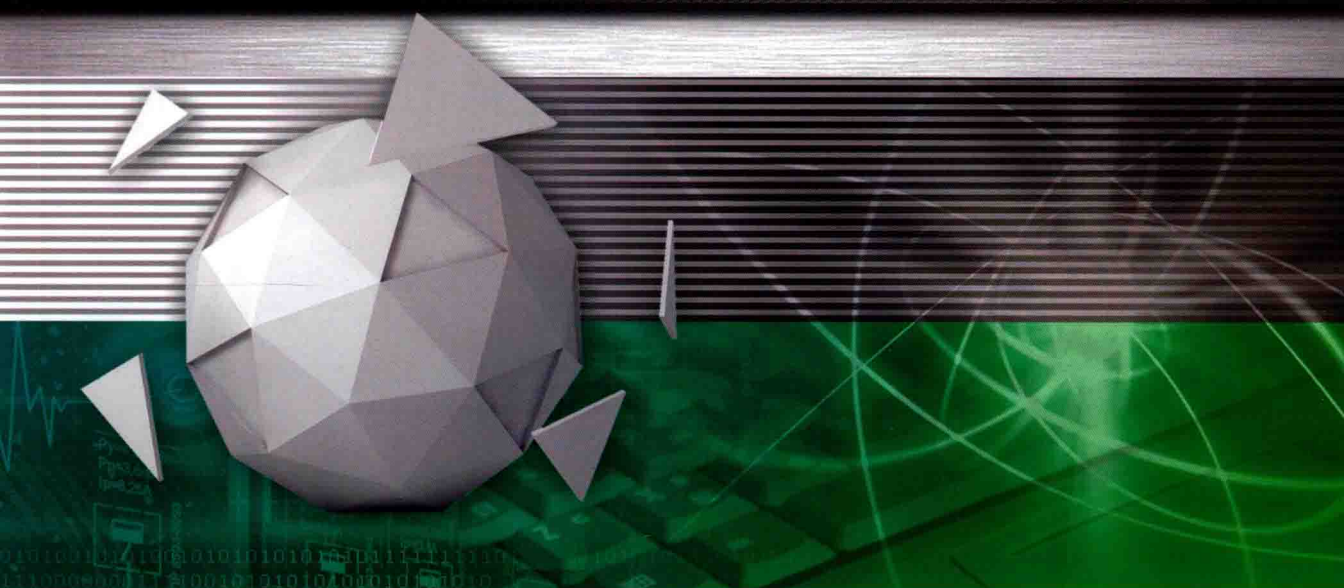


普通高等教育“十三五”规划教材

半导体微系统制造技术

刘斌◎主编



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



赠电子课件、习题答案、
模拟试卷及答案等

普通高等教育“十三五”规划教材

半导体微系统制造技术

主 编 刘 斌
副主编 任 建 于 慧
参 编 付 英 蒋晶鑫 姜贵民 董海青
主 审 韩 娜



机械工业出版社

本书根据半导体技术的发展趋势,主要介绍了常用的半导体微系统制造工艺,并加入了部分超大规模集成电路工艺。

本书在半导体微系统制造工艺的基础上主要介绍了 MEMS 及微系统常用材料、硅的各向同性腐蚀、阳极腐蚀、硅的各向异性腐蚀、电钝化腐蚀、自停止腐蚀技术、非晶薄膜的腐蚀与表面微加工、静电键合技术、硅热键合技术、超大规模集成电路工艺、掺杂工艺、平坦化等几个主要半导体微系统制造工艺,具体到每一道工艺中都详细讲述了工艺的基本原理、工艺的操作过程,力求把当前比较新的工艺介绍给读者。

本书主要供高等院校微电子科学与工程专业的高年级本科生或研究生学习,也可以作为从事半导体微系统制造工作的工程技术人员自学或进修的参考书。

为方便教学,本书配有免费电子课件、习题答案、模拟试卷及答案等,凡选用本书作为授课教材的学校,均可来电(010-88379564)或邮件(cmpqu@163.com)索取,有任何技术问题也可通过以上方式联系。

图书在版编目(CIP)数据

半导体微系统制造技术/刘斌主编. —北京:机械工业出版社,2015.5
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-50268-5

I. ①半… II. ①刘… III. ①微电子学-高等学校-教材 IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 236311 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑:曲世海 责任编辑:曲世海 韩 静
责任校对:张晓蓉 封面设计:陈 沛
责任印制:常天培
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm·14.5 印张·349 千字
标准书号:ISBN 978-7-111-50268-5
定价:32.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

在半导体技术领域，微电子与微系统制造之间的相近关系往往使人们想到二者是可以交换的，事实上，当前许多的微系统制造技术与微电子制造技术非常接近，然而，微系统的设计和封装技术与微电子技术有很大的不同。许多半导体微系统使用微电子材料（如硅、砷化镓）作为传感和执行元件，是因为它们的尺寸稳定，并且它们的制造和封装技术可以很好地建立在微电子技术的基础上。然而，在半导体微系统中还使用大量的其他材料，如石英、硼硅酸玻璃、聚合物、塑料、陶瓷、金属等。随着半导体工艺的高速发展，行业对人才的需求不断增加，既需要高水平的研究设计人员，也需要从事一线生产的专业技术人才。而当前适合于高等院校培养研究型人才的教材十分匮乏，大部分高等院校由于缺乏资金，实验室建设难以满足学生课程实践的需求。

本书的编写注重实用性，从半导体微系统生产企业收集了大量的素材充实在教材中，并增加了实验分析内容，解决了理论与实践脱离的问题。本书共 12 章，介绍了 MEMS 及微系统常用材料、硅的各向同性腐蚀、阳极腐蚀、硅的各向异性腐蚀、电钝化腐蚀、自停止腐蚀技术、非晶薄膜的腐蚀与表面微加工、静电键合技术、硅热键合技术、超大规模集成电路工艺、掺杂工艺、平坦化等几个主要微系统制造工艺，具体到每一道工艺中都详细讲述了工艺的基本原理、工艺的操作过程。

该书由孙承松教授主审，在此表示感谢。教材第 1 章、第 4 章、第 5 章、第 8 章、第 11 章由刘斌完成，第 2 章、第 3 章、第 10 章由任建完成，第 6 章由于慧完成，第 7 章由董海青和蒋晶鑫完成，第 9 章由姜贵民完成，第 12 章由付英完成。

由于时间有限，书中难免存在不足和疏漏，希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 MEMS 及微系统常用材料	1
1.1 衬底和晶片	1
1.1.1 硅材料	1
1.1.2 硅化合物	4
1.1.3 化合物半导体材料	5
1.2 压电材料	6
1.2.1 压电效应	6
1.2.2 石英晶体	6
1.2.3 压电陶瓷	7
1.2.4 聚偏二氟乙烯薄膜	9
1.2.5 ZnO 压电薄膜	11
1.3 其他材料	12
1.3.1 磁致伸缩材料	12
1.3.2 形状记忆合金	13
1.3.3 膨胀合金	14
1.3.4 金刚石材料	14
本章小结	15
习题	15
第 2 章 硅的各向同性腐蚀	16
2.1 各向同性腐蚀原理	16
2.2 影响各向同性腐蚀的因素	17
2.2.1 温度的影响	18
2.2.2 腐蚀液成分的影响	20
2.2.3 成分比对硅腐蚀形貌及角、棱的影响	21
2.3 各向同性自停止腐蚀	24
本章小结	25
习题	25
第 3 章 阳极腐蚀	26
3.1 阳极腐蚀原理	26
3.2 影响阳极腐蚀的因素	28
3.2.1 掺杂浓度的影响	28
3.2.2 外部电压及 HF 浓度的影响	29
3.3 采用阳极腐蚀的自停止腐蚀方法	31
本章小结	32
习题	32

第 4 章 硅的各向异性腐蚀	33
4.1 硅的各向异性腐蚀原理	33
4.1.1 KOH 系统的腐蚀原理	33
4.1.2 成分比对腐蚀特性的影响	34
4.1.3 成分比对腐蚀速率与掺杂浓度关系的影响	35
4.1.4 EPW 系统腐蚀原理	37
4.1.5 EPW 成分比对腐蚀特性的影响	38
4.2 腐蚀速率与掺杂浓度的关系	41
4.2.1 EPW 系统	41
4.2.2 KOH 系统	42
4.2.3 EPW 和 KOH 的腐蚀速率与掺锗、磷浓度的关系	44
4.2.4 重掺杂硅自停止腐蚀机制	45
4.2.5 硅的腐蚀	48
4.2.6 重掺杂硅的腐蚀	50
4.3 腐蚀速率与晶体取向的关系	51
4.3.1 晶向与晶面	51
4.3.2 各向异性腐蚀的特点	52
4.3.3 侧向腐蚀速率与晶体取向的关系	54
4.3.4 腐蚀速率与温度的关系	56
4.3.5 各向异性腐蚀的机制	59
4.3.6 各向异性腐蚀剂腐蚀出的微结构的特点	60
4.3.7 凸角腐蚀及补偿	63
4.4 各向异性自停止腐蚀的方法	69
4.4.1 SiO_2 的腐蚀	69
4.4.2 重掺杂自停止腐蚀技术	71
4.4.3 (111) 面自停止腐蚀技术	71
本章小结	71
习题	72
第 5 章 电钝化腐蚀	73
5.1 电钝化腐蚀原理	73
5.1.1 电钝化腐蚀的电流—电压特性	73
5.1.2 电钝化腐蚀机制	74
5.2 电钝化腐蚀的相关因素	76
5.2.1 光照对电钝化腐蚀的影响	79
5.2.2 PN 结自停止腐蚀方法	80
5.2.3 PN 结自停止腐蚀的原理	80
5.2.4 PN 结自停止腐蚀的四电极系统	82
5.2.5 制备悬臂梁的方法	84
5.3 制备 P 型硅膜的脉冲电压方法	86
5.3.1 电钝化层的溶解性	86
5.3.2 P 型硅膜的制备	87
本章小结	88

习题	88
第 6 章 自停止腐蚀技术	89
6.1 异质自停止腐蚀方法	89
6.1.1 注入损伤自停止腐蚀	89
6.1.2 Si—SiO ₂ 结构自停止腐蚀	90
6.1.3 Si _{1-x} Ge _x —Si 异质结自停止腐蚀	90
6.2 自停止腐蚀方法的比较	92
6.2.1 轻掺杂自停止腐蚀方法	92
6.2.2 阳极自停止腐蚀方法	92
6.2.3 重掺杂自停止腐蚀方法	92
6.2.4 (111) 面自停止腐蚀方法	93
6.2.5 电钝化 PN 结自停止腐蚀方法	93
本章小结	94
习题	94
第 7 章 非晶薄膜的腐蚀与表面微加工	95
7.1 非晶薄膜的腐蚀	95
7.2 表面微加工技术	96
7.2.1 牺牲层制备微结构技术	96
7.2.2 硅体表面加工	97
7.3 表面微机械加工技术的应用	99
7.4 硅的直接激光加工	100
7.5 LIGA 技术	101
本章小结	102
习题	102
第 8 章 静电键合技术	103
8.1 玻璃的导电性	103
8.2 静电键合原理	105
8.3 影响静电键合的因素	107
8.3.1 键合力的引入	107
8.3.2 阴极形状对键合的影响	107
8.3.3 键合体之间的引力	108
8.3.4 非导体玻璃对静电力的影响	108
8.3.5 导电玻璃对静电力的影响	110
8.3.6 极化区中残余电荷的作用	110
8.3.7 表面粗糙度对键合的影响	111
8.3.8 弹性形变、塑性形变和黏滞流动对键合的影响	111
本章小结	112
习题	112
第 9 章 硅热键合技术	113
9.1 硅直接键合过程	113

目 录

9.1.1 硅直接键合工艺	113
9.1.2 硅直接键合机制	113
9.2 与硅直接键合工艺相关的因素	114
9.2.1 表面处理的作用	114
9.2.2 温度对键合的影响	114
9.2.3 表面平整度对键合的影响	117
9.3 硅直接键合界面的特性	119
9.3.1 键合界面的杂质	119
9.3.2 键合界面的晶格结构	119
9.4 硅直接键合工艺的特征技术	121
9.4.1 孔洞的检测	121
9.4.2 界面电特性的测量	122
9.4.3 键合引入的应力表征	124
本章小结	126
习题	126
第 10 章 超大规模集成电路工艺	127
10.1 光刻的分辨率	127
10.2 紫外线曝光	128
10.3 X 射线曝光和电子束曝光	129
10.4 极端远紫外线光刻技术	131
10.5 刻蚀	134
10.5.1 SiO ₂ 的刻蚀	134
10.5.2 多晶硅化金属的刻蚀	136
10.5.3 铝及铝合金的刻蚀	137
10.6 阻挡金属的溅射镀膜	138
10.6.1 TiN	139
10.6.2 钛钨合金	139
10.6.3 硅化钨和钨	139
10.7 表面组装技术	142
10.8 SMT 的发展方向	143
10.9 表面组装半导体器件	144
本章小结	145
习题	145
第 11 章 掺杂工艺	146
11.1 掺杂	146
11.1.1 掺杂的概念	146
11.1.2 掺杂的两种方法	146
11.1.3 掺杂工艺流程	147
11.2 扩散	147
11.2.1 扩散原理	147
11.2.2 扩散工艺步骤	150
11.2.3 扩散设备、工艺参数及其控制	151

11.2.4	常用扩散杂质源	158
11.3	离子注入	159
11.3.1	离子注入原理	160
11.3.2	离子注入的重要参数	161
11.3.3	离子注入掺杂工艺与扩散掺杂工艺的比较	163
11.4	离子注入机	163
11.4.1	离子注入机的组成与工作原理	163
11.4.2	退火	172
11.4.3	离子注入工艺、规范操作	173
11.4.4	离子注入使用的杂质源及注意事项	174
11.4.5	关键工艺控制	175
11.4.6	离子注入的应用	176
11.5	掺杂质量控制	179
11.5.1	结深的测量及分析	179
11.5.2	掺杂浓度的测量	180
11.5.3	污染	184
11.6	掺杂实验	185
11.6.1	扩散工艺模拟实验	185
11.6.2	离子注入工艺模拟实验	185
	本章小结	186
	习题	186
第 12 章	平坦化	187
12.1	概述	187
12.2	传统平坦化技术	189
12.2.1	反刻	189
12.2.2	玻璃回流	190
12.2.3	旋涂玻璃法	190
12.3	化学机械平坦化	191
12.3.1	CMP 的优点和缺点	191
12.3.2	CMP 机理	192
12.3.3	CMP 实现	197
12.3.4	CMP 工艺控制	208
12.3.5	CMP 应用	213
12.4	CMP 质量控制	219
12.4.1	膜厚的测量及均匀性分析	220
12.4.2	晶圆表面状态的观测方法及分析	221
	本章小结	223
	习题	223
参考文献	224

第 1 章 MEMS 及微系统常用材料

本章教学目标

- 了解微电子衬底材料的种类及其特性
- 了解化合物半导体材料的应用范围
- 掌握压电材料的压电机理及影响压电特性的因素
- 了解磁致伸缩材料的物理机制
- 了解形状记忆合金的微观机制

1.1 衬底和晶片

在微系统中，衬底的使用除了表示微电子中衬底的含义外还有其他的目的，它除了支撑将机械动作转换为电输出或者反之的转换器之外，还可作信号转换器。对于微执行器，其中的执行部件（如微加速度计的硅梁）也叫作衬底。有两种衬底材料用于微系统：活性衬底材料和惰性衬底材料。活性衬底材料主要用于微系统的传感器和执行器或其他 MEMS 器件。用于微系统的典型活性材料包括硅、砷化镓、锗和石英。这些材料中除石英是绝缘体外都是半导体材料，它们基本上都具有四面体键的立方晶格。选择这些材料作为活性材料主要是因为它们的空间稳定性对于环境条件相对不是很敏感，空间稳定性是高精度传感器和执行器的一个主要要求。

1.1.1 硅材料

单晶硅材料是用于 MEMS 的理想材料，也是使用最广泛的衬底材料。其主要原因是：

1) 它的力学性能稳定，并且可以与电子器件集成到相同衬底上。一个典型的例子是集成压阻式压力传感器。

2) 硅几乎是理想的结构材料，它有几乎与钢相同的杨氏模量（约 2×10^5 MPa）但却与铝一样轻，其质量密度约为 2.3 g/cm^3 。高杨氏模量的材料可更好地保持载荷与变形的线性关系。它的熔点为 1400°C ，为铝的两倍，这可使硅在高温时也保持尺寸的稳定。

3) 它的热膨胀系数是钢热膨胀系数的 $1/8$ ，是铝热膨胀系数的 $1/10$ 。

4) 硅在事实上没有机械迟滞，因此是理想的传感器和执行器的候选材料，易于加工成平整度和表面粗糙度满足要求的平面。

5) 与其他材料相比，硅衬底在设计和制造中具有更大的灵活性。硅衬底的处理和制作工艺已经比较成熟。

6) 硅单晶材料的制作、衬底的加工以及硅的电学性质、力学性质已是大家熟知的知识，在此不再重复。

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，每一晶粒内部都具有单晶的特征。晶粒与晶粒之间存在晶界，晶界对其电学性质的影响可以通过掺杂来控制。下面讨论一下多晶硅的电阻率、电阻温度系数、电阻应变灵敏度系数与掺杂浓度的关系。

多晶硅一般由低压化学气相淀积方法（LPCVD）制作，其电阻率随掺杂原子浓度的变化关系如图 1-1 所示，由图可见，多晶硅膜的电阻率比单晶硅高，特别是在低掺杂浓度下其电阻率比单晶硅高得多，随掺杂浓度的增加其电阻率有很大的变化范围。

不同掺杂浓度的多晶硅电阻随温度的变化一般为非线性，如图 1-2 所示，电阻和时间的关系可表达为

$$R(t) = R_0 \exp[\alpha_R(t - t_0)] \quad (1-1)$$

式中， R_0 为温度 20°C 时的电阻； $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ； t 为实时温度； α_R 为电阻温度系数。

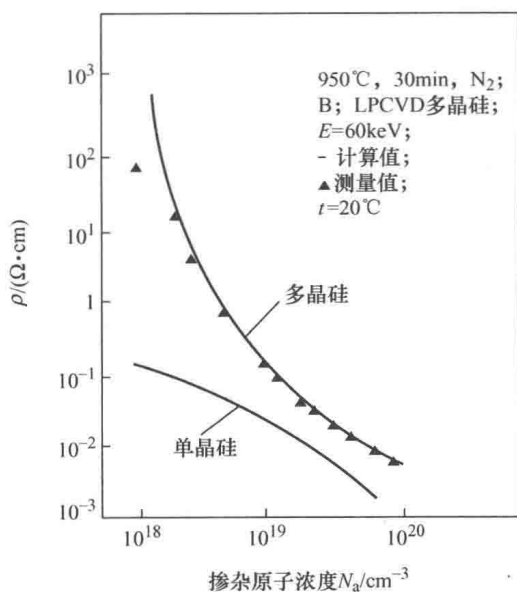


图 1-1 电阻率与掺杂原子浓度的关系

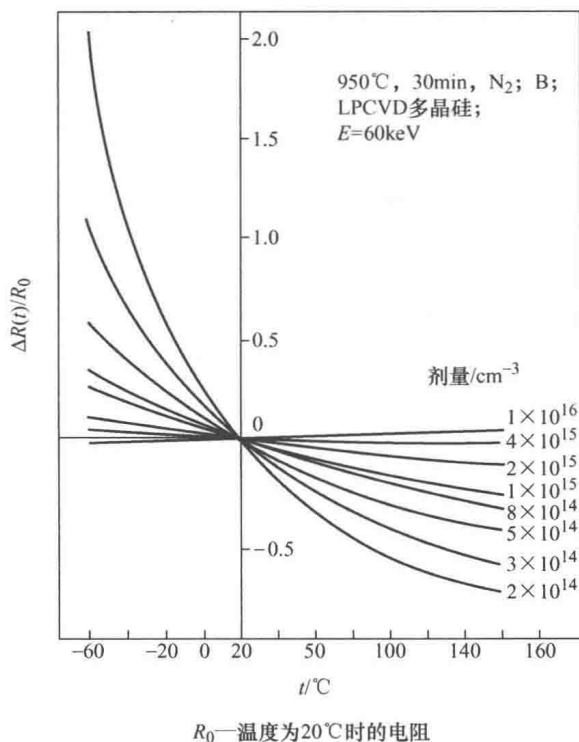


图 1-2 多晶硅电阻随温度变化的特性

电阻温度系数与掺杂原子浓度的关系如图 1-3 所示，掺杂浓度的变化使多晶硅的电阻温度系数在很大的范围内变化。低掺杂时，表现出负的温度系数，随掺杂浓度的增加，电阻温度系数增加到 0 直至正值。

多晶硅电阻应变灵敏特性如图 1-4 所示，由图可见，压缩时电阻下降，拉伸时电阻上升。

电阻应变灵敏系数与掺杂原子浓度的关系如图 1-5 所示，由图可见，电阻应变灵敏系数随掺杂浓度的增加略有下降。其中 G_1 为纵向应变灵敏系数，其最大值约为金属应变计最大值的 30 倍，为单晶硅的 $1/3$ 。 G_2 为横向应变灵敏系数，其值随掺杂浓度出现负值，故一般不采用。

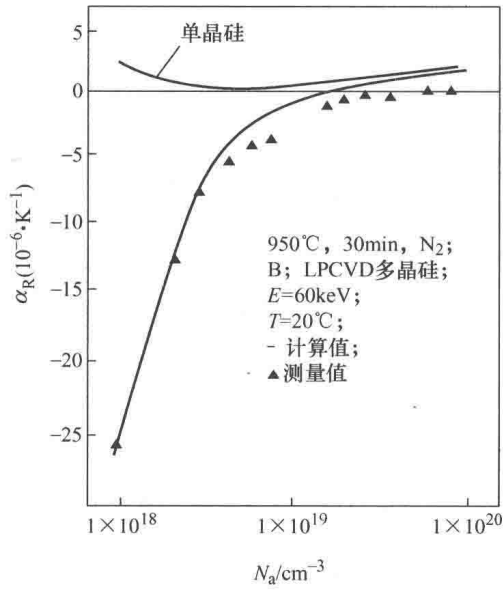


图 1-3 电阻温度系数与掺杂原子浓度的关系

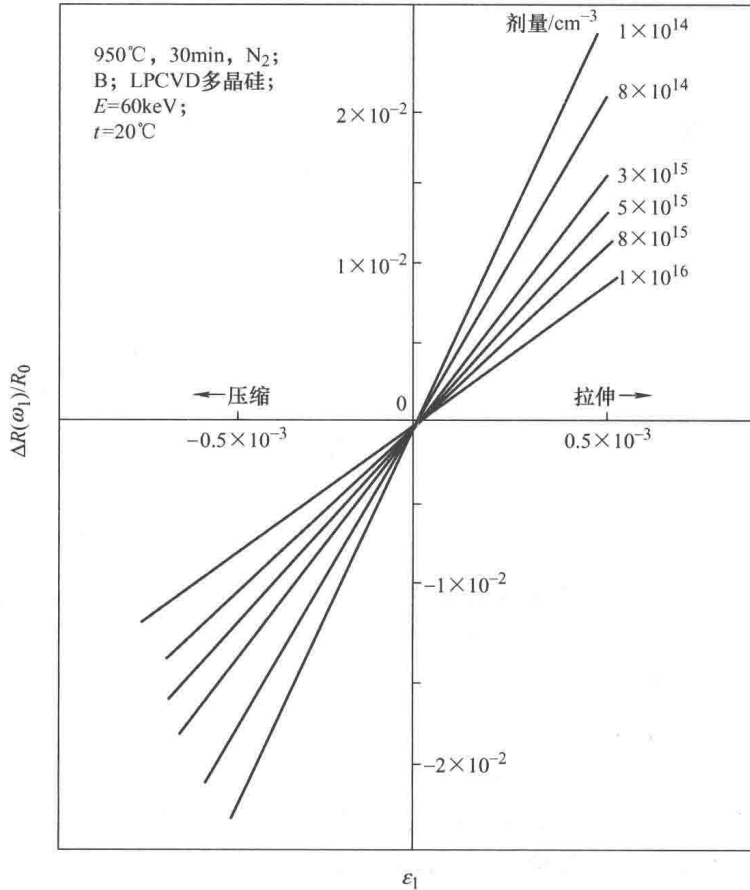


图 1-4 多晶硅相对电阻与纵向应变的关系

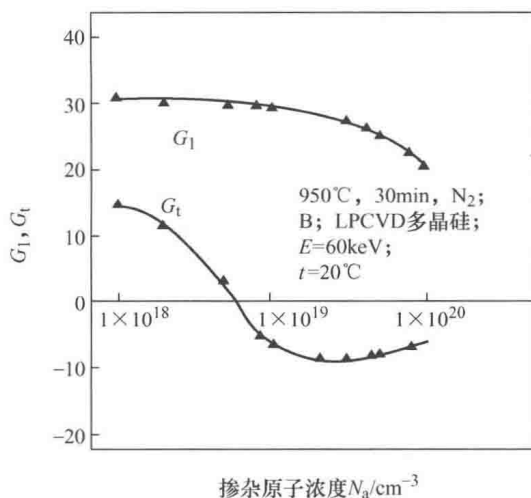


图 1-5 多晶硅电阻应变灵敏系数与掺杂原子浓度的关系

此外，与单晶硅压阻膜相比，多晶硅压阻膜可在不同的材料衬底上制备，其制备工艺与常规半导体工艺兼容，且无 PN 结隔离问题，因而适合更高的工作温度场合。在相同温度下，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，有利于长期稳定的工作。

1.1.2 硅化合物

硅的化合物在微系统中常用的有二氧化硅、氮化硅、碳化硅几种。由于二氧化硅和氮化硅在工艺课中已经做了介绍，故这里仅对碳化硅进行讨论。

(1) 碳化硅 它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，便可以获得优质的立方晶体结构的碳化硅。随着掺杂浓度的差异，得到的晶体结构不同，可以表示为 β -SiC， β 表示不同形态的晶体结构。

用离子注入法得到的 SiC 材料自身的物理、化学及电学特性优异，表现出强度高、刚度大、内部的残余应力低、化学惰性强、较宽的禁带宽度（是硅的 1~2 倍）及较高的压阻系数等特性，因此 SiC 材料能在高温下耐腐蚀、抗辐射，并具有稳定的电学性质，非常适合在高温、恶劣环境下工作的微系统选择使用。

由于 SiC 单晶材料成本高、硬度大、加工难度大，所以以硅单晶片为衬底的 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 SiC 薄膜制作在 Si 衬底上，供设计者使用。例如，航空发动机、火箭、导弹、卫星等耐热腔体及表面部位的压力测量，便可选用绝缘衬底的 SiC 薄膜作为感压膜片，并制成高温压力传感器，测量压力时的工作温度可达 600°C 以上。

除 SiC 单晶薄膜以外，在微系统中还可选用 SiC 多晶薄膜。与单晶 SiC 薄膜相比，多晶 SiC 的适应性更广。它可以在多种衬底上采用 PECVD、物理溅射、LPCVD 及电子束放射等技术制成薄膜，供不同场合选择使用。

总之，SiC 是一种具有优良性质的材料，这些优良特性使 SiC 材料适合制造高温、高功率及高频电子器件，也适合在制造高温压力传感器时选用。

(2) 硅-蓝宝石 硅-蓝宝石材料是通过外延生长技术将硅单晶生长在蓝宝石 ($\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$) 衬底上形成的, 二者构成硅-蓝宝石 SOS (Silicon on Sapphire) 晶片。蓝宝石为绝缘体, 在其上淀积的每一个电阻, 其电性能是完全独立的。这不仅能消除因 PN 结漏电而产生的漂移, 还能提供高的应变效应和高温环境下的工作稳定性。蓝宝石材料的迟滞和蠕变小到可以忽略不计的程度, 因而具有极好的重复性。蓝宝石又是一种惰性材料, 其化学稳定性好、耐腐蚀、抗辐射性能强、机械强度高。由此可见, 利用蓝宝石可以制造出具有耐高温、耐腐蚀、抗辐射等优越性能传感器和电路。但要获得精度高、稳定可靠的指标, 还必须解决好整体结构中材料之间的热匹配, 否则难以达到预期的目标。

1.1.3 化合物半导体材料

硅是制造微系统的主要材料。有时为了提高器件和系统的性能以及扩大应用范围, 往往使用一些化合物半导体材料。如在红外、可见光及紫外光波段的成像器和探测器中, PbSe、LnAs、 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x$ (x 代表 Cd 的百分比) 等材料。以红外探测器为例, 利用红外辐射与物质作用产生的各种效应发展起来的、实用的光敏探测器, 主要是针对红外辐射在大气传输中投射率最为清晰的 3 个波段 ($1\sim 3\mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\mu\text{m}$ 、 $8\sim 14\mu\text{m}$) 研制的。对于 $1\sim 3\mu\text{m}$ 波长敏感的探测器有 PbSe、LnAs 及 $\text{Hg}_{0.61}\text{Cd}_{0.39}\text{Te}$; 对于 $3\sim 5\mu\text{m}$ 敏感的探测器有 LnAs、PbSe、 $\text{Hg}_{0.73}\text{Cd}_{0.27}\text{Te}$; 对于 $8\sim 14\mu\text{m}$ 敏感的探测器则有 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ 、 $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ 及非本征半导体 Ge : Hg、Si : Ga 及 Si : Al 等, 其中三元合金可以通过调整比例得到不同禁带宽度的材料, 从而调整接收波长, 见表 1-1。

表 1-1 几种化合物半导体材料特性

半导体材料	禁带宽度 E_g/eV	最高灵敏度对应 波长 $\lambda/\mu\text{m}$	相应时间 τ/s	光谱探测率 $/\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$
PbSe	0.42	2.9	$(1\sim 4) \times 10^{-4}$	5×10^{10}
LnAs	0.39	3.2	5×10^{-3}	3×10^{11}
LnSb	0.23	5.4	5×10^{-6}	$(6\sim 10) \times 10^{10}$
$\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$	0.1	12	$< 10^{-6}$	10^{10}
$\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$	0.1	12	1.2×10^{-6}	1.7×10^{10}
Ge : Au (非本征)	0.15	8.3	3×10^{-8}	$(3\sim 10) \times 10^9$
Ge : Hg (非本征)	0.09	14	10^{-9}	4×10^{10}
Si : Al (非本征)	0.0685	18	—	—
Si : Ga (非本征)	0.0723	17	—	—

由接收波长与禁带宽度的关系 $\lambda = \frac{1.24}{E_g}$ 可知, 欲得到长波段的灵敏度, 需要窄禁带宽度的材料。上式中, λ 的单位为 μm , E_g 的单位为 eV。根据表 1-1, 非本征材料具有更低的禁带宽度, 所以要使光谱特性扩展到长波段需使用掺杂半导体。需要指出的是, 上述材料需要在低温下 (如 77K) 工作, 因为在室温下, 由于晶格振动能量与杂质能量的相互作用, 使热激励的载流子数增加, 而激发的载流子数明显减少, 降低了探测灵敏度。

1.2 压电材料

1.2.1 压电效应

压电材料的主要属性是其弹性效应和电激化效应在机械应力或电场作用下将发生相互耦合，其耦合关系可表达为 $d_{ij} = \left(\frac{\partial D}{\partial \sigma} \right)_E = \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial E} \right)_\sigma$ 。

该式表明了应力-应变-电压之间的内在联系。式中， d_{ij} 、 D 、 E 、 ϵ 、 σ 分别代表压电常数、电位移矢量、电场强度、应变、应力； $\left(\frac{\partial D}{\partial \sigma} \right)_E$ 、 $\left(\frac{\partial \epsilon}{\partial E} \right)_\sigma$ 分别表示正压电效应和逆压电效应，其中下脚标为恒定不变的参数。实际上往往以外电路短路和压电体不受机械约束的自由状态来满足恒定条件，下标 i 、 j 分别表示电场方向和应力方向。

所谓正压电效应，指在机械应力作用下，将机械能转变为电能；逆压电效应，指在电压作用下，将电能转变为机械能。

反映压电材料能量转换效率的系数叫作机电耦合系数，用 k_{ij} 来表示： $k_{ij} = \text{由正压电效应转换为电能} / \text{输入机械能} = \text{由逆压电效应转换为机械能} / \text{输入电能}$ 。

利用正压电效应可制成机械能的敏感器；利用逆压电效应可制成制动器（执行器）。可见，压电材料是一种双向功能材料，在微系统中得到广泛应用。下面介绍几种常用的压电材料。

1.2.2 石英晶体

石英的化学组成为 SiO_2 ， SiO_2 的晶态形式即是石英晶体。石英晶体的理想形状为图 1-6 所示的六角锥体，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）。

石英晶体是各向异性材料，不同晶向具有不同的物理特性。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

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

式中， d_{ij} 是压电常数。

由图 1-7 可以看出，下标 1~6 与 3 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。对于正压电效应有 $\text{dim}d_{ij} = \frac{\text{C}/\text{m}^2}{\text{N}/\text{m}^2} = \text{CN}^{-1}$ ，即每单位力输入时的电荷输出。

对于逆压电效应，则有 $\text{dim}d_{ij} = \frac{\text{m}/\text{m}}{\text{V}/\text{m}} = \text{m} \cdot \text{V}^{-1}$ ，即每单位场强作用下的应变。式中， m 、 V 、 N 及 C 分别代表米、伏特、牛顿及库仑。

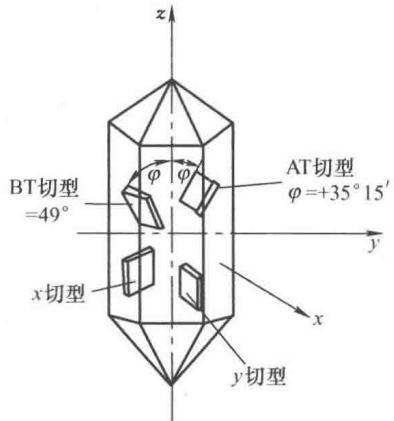


图 1-6 石英晶体的理想形状

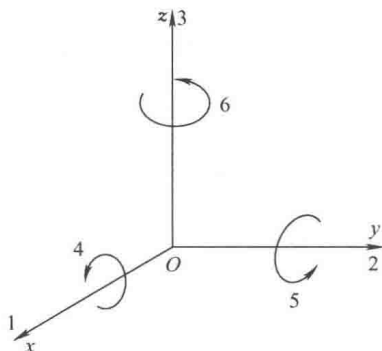


图 1-7 压电常数的轴向表示法

由 D 表达式可知，虽然压电矩阵有 18 项，但石英对称条件要求其中 13 项为 0，并要求其他项之间有一定关系，即 $d_{12} = -d_{11}$ 、 $d_{25} = -d_{14}$ 、 $d_{26} = -d_{11}$ 。这样，最后只剩下两项 d_{11} 和 d_{14} ，其数值分别是 $d_{11} = 2.3 \times 10^{-12} \text{C} \cdot \text{N}^{-1}$ 、 $d_{14} = -0.67 \times 10^{-12} \text{C} \cdot \text{N}^{-1}$ 。

石英晶体与硅晶体一样，具有优良的机械物理性能和化学性能，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；材质轻，其密度为 2.65g/cm^3 ，是不锈钢的 $1/3$ ，而弯曲强度是不锈钢的 4 倍；其实际工作温度不应超过 250°C 。石英作为压电材料主要用于制造压电振子和换能器。

1.2.3 压电陶瓷

陶瓷材料是以化学合成物质为原料，经过精密地成形烧结而成。烧结前，严格控制合成物的成分比，便可研制成适合多种用途的功能陶瓷，如压电陶瓷、半导体陶瓷、导电陶瓷、磁性陶瓷、多孔陶瓷。压电陶瓷是陶瓷经过电极化之后形成的，如图 1-8 所示。电极化后的压电陶瓷为各向异性的多晶体。

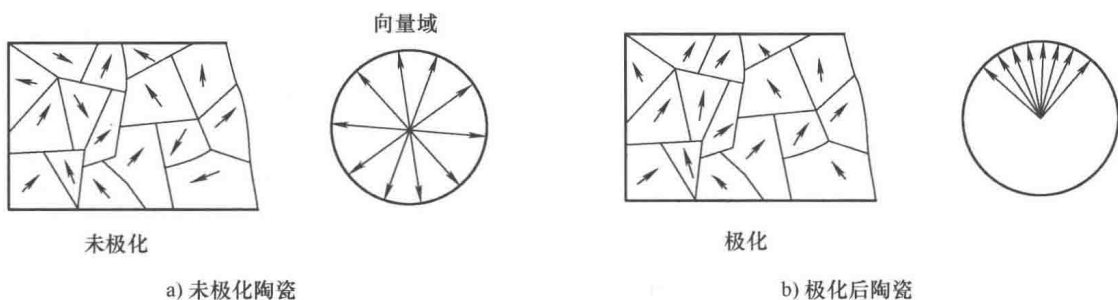


图 1-8 电极化处理的陶瓷

压电陶瓷的弹性效应和电极化效应具有耦合性，耦合关系同前。压电常数矩阵为

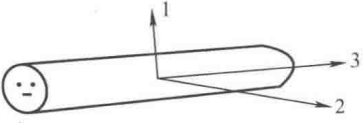


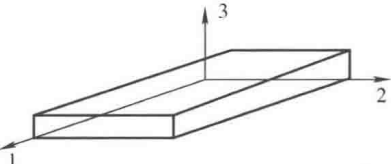


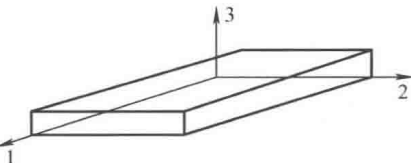

$$D = (d_{ij}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1-3)$$

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

由此可见，压电陶瓷有 3 个独立的压电常数，其中 d_{31} 代表横向伸缩模式， d_{33} 代表纵向

伸缩模式， d_{15} 代表剪切模式，见表 1-2。

表 1-2 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}

注：表中 1、2、3 表示晶向。

压电陶瓷材料有多种，最早的是钛酸钡 (BaTiO_3)，现在最常用的是锆钛酸铅 ($\text{PbZrO}_3-\text{PbTiO}_3$)，简称 PZT。PZT 系列良好的压电性成为它用途广泛的重要基础。基于材料化学组分控制和掺杂技术，在 PZT 陶瓷中掺入铌镁酸铅 [$\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$] 研制成三元系压电陶瓷，简称 PCM，比 PZT 陶瓷更易烧结，压电性能也有所改善；在 PZT 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，并可做成各种光阀和光闸。压电陶瓷的一些主要性能见表 1-3。

表 1-3 几种压电陶瓷的物理性能

物理参数	PZT-4	PZT-5A	PZT-7A	PZT-8	PCM-5A
压电常数/ $\times 10^{-12}\text{C} \cdot \text{N}^{-1}$					
d_{11}	-123	-171	-60	-97	-186
d_{33}	289	374	150	225	—
d_{15}	—	—	—	—	579
压电电压常数/ $\times 10^{-3}\text{V} \cdot \text{m} \cdot \text{N}^{-1}$					
g_{31}	-10.6	-11.4	—	-10.9	-12.3
g_{33}	24.9	24.8	—	25.4	—
g_{15}	—	—	—	—	33.9
机电耦合常数					
K_{31}	0.33	0.34	—	0.30	0.30
K_{33}	0.70	0.705	0.66	0.30	—
K_{15}	—	—	—	-0.64	0.70
K_t (厚度伸缩)	0.51	0.486	0.50	0.48	—
K_p (径向伸缩)	0.58	0.60	0.51	0.51	0.60