

测试与传感技术

侯国章 编著
赵学增 主审

哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨

内 容 提 要

本书中以新型传感器材料——半导体敏感材料、陶瓷敏感材料和有机敏感材料为基础,以集成化物性型传感器为重点,详细介绍各类物理量测试系统,包括传感器、信号处理及微机控制等内容。书中内容体现了基础知识与科研新成果及发展新动向间的密切结合,测试系统的器件集成化、信息数字化和测试智能化内容贯穿全书。

本书是国家“九五”重点图书——《机电一体化》丛书中的一种,是高等院校机械电子工程专业的专业课教材。本书文字简洁、图表清晰,便于阅读,因此也可作为有关专业人员自学与参考。

测 试 与 传 感 技 术

Ceshi yu Chuangan Jishu

侯国章 编著

赵学增 主审

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 字数 380 千字

1998年12月第1版 1998年12月第1次印刷

印数 1~5 000

ISBN 7-5603-1361-2/TP·116 定价 21.00 元

前 言

机械电子工程专业是为适应机电一体化技术发展而设置的。机电一体化技术,特别是微型机电一体化技术(含亚微米、纳米技术)的迅速发展,急需新型的机械技术、电子技术、计算机应用技术复合型人才。为培养具有理论基础扎实,工程实践能力强的从事机电一体化产品设计、系统研究和制造技术的专门人才,需要开设精密机械、自动控制技术、测试与传感技术和计算机应用技术等多学科交叉、知识面广的专业课程。

测试与传感技术是机电一体化技术的重要组成部分,是机械、电子、计算机有机结合的中间环节。对于机械动作和加工过程准确无误地控制,需要对有关参数准确、快速、可靠地测试,并由计算机系统自动调控。为此,开设测试与传感技术这门课程十分必要。本课程是以数、理、化为基础,集机、电、光知识于一体的一门综合性应用技术。本课程的教学对培养学生的实践能力十分重要。

本书共十一章,分成三部分。第一章叙述新型敏感材料——半导体敏感材料、陶瓷敏感材料和有机敏感材料的特性及转换功能。第二至第八章以工作原理为主线分别介绍电阻、电容、电感、压电、磁电、光电和温度(热电)传感器。每种传感器又分成结构型和物性型两大类,结构型传感器是传统的,物性型传感器体现了新型敏感材料的应用。第九至第十一章介绍信号处理技术,包括放大、滤波、采样/保持、模拟开关等信号处理电路,以及各种转换电路。

全书由博士生导师赵学增教授审定;所有图表由罗建伟高级工程师整理绘制;书中第九章至第十一章由侯佳同志收集资料并完成初稿。在此,对以上同志的指导和支持表示诚挚的谢意。同时,对本书参考文献作者致以衷心的感谢。

本书是结合教学和科研编写的,水平有限,疏漏难免,恳请关心和阅读本书的所有人士批评指正。

编 者

1998.10

目 录

绪论	1
第一章 敏感材料	3
第一节 敏感材料转换功能	3
第二节 半导体敏感材料	9
第三节 陶瓷敏感材料	13
第四节 有机敏感材料	18
复习题	22
第二章 电阻式传感器	23
第一节 金属应变片	23
第二节 应变式力传感器	30
第三节 压阻式传感器	37
复习题	48
第三章 电容式传感器	49
第一节 电容式传感器	49
第二节 电容式传感器输出电路	55
第三节 电容式压力传感器	62
复习题	67
第四章 电感式传感器	68
第一节 自感式传感器	68
第二节 差动变压器式传感器	76
第三节 感应同步器	79
第四节 压磁式传感器	82
复习题	85
第五章 压电式传感器	86
第一节 压电转换器件	86
第二节 压电式传感器输出电路	93
第三节 压电式力学量传感器	100
复习题	107
第六章 磁电式传感器	108
第一节 磁电感应式传感器	108
第二节 强磁性金属磁敏器件	113
第三节 磁头与磁栅	116

第四节	霍尔传感器	118
第五节	半导体磁阻器件	127
复习题		130
第七章	光传感器	131
第一节	内光电效应器件	131
第二节	光量子型红外传感器	139
第三节	电荷耦合器件(CCD)	141
第四节	光栅	146
第五节	光电码盘	154
第六节	光导纤维	157
复习题		165
第八章	温度传感器	166
第一节	热电偶	166
第二节	热敏电阻	170
第三节	半导体温度传感器	182
第四节	热电型红外传感器	189
复习题		192
第九章	信号放大电路	194
第一节	基本放大电路	194
第二节	测量放大器	199
第三节	程控增益放大器	202
第四节	隔离放大器	207
复习题		211
第十章	信号处理电路	212
第一节	滤波电路	212
第二节	采样/保持电路	220
第三节	多路模拟开关	229
复习题		236
第十一章	信号转换电路	237
第一节	A/D 转换器	237
第二节	U/F 转换器	246
第三节	D/A 转换器	251
第四节	频率-电压转换	256
第五节	逻辑电平转换	258
第六节	电压-电流转换	261
复习题		262
参考书目		263

绪 论

测试与传感技术是一门学科交叉和知识密集的应用技术。该技术要求人们熟悉被测量的特性,掌握所用传感器件的材料敏感性能及转换方法,正确处理输出信号的传输、放大、转换、显示、记录及反馈等各个环节。测试与传感的全过程相当于人通过五官接收外界信号,并将信号传给大脑;经大脑分析思考,驱使肌体完成相应的动作,对接收的信号作出恰当准确的反应。传统的机械量测试是利用位移、伸缩等几何尺寸或位置的变化把被测量的变化转换成电磁量的变化;输出信号经放大、滤波、整流及转换等处理电路送入仪器中记录或显示。这种由分立元件组成的分散测试系统已不适应技术发展的需要。新型的测试系统应该是器件集成化、信息数字化和控制智能化的全面自动化系统。

80年代初,大规模集成电路技术的飞速发展,使微型计算机的应用迅速推向军事技术、工业自动化、企业管理及办公自动化等各个领域,尤其是在生产过程自动控制及自动检测方面发展很快,推动了测试与传感技术的进步。

(1)半导体器件集成电路的微细加工技术用于以半导体硅为代表的新型半导体敏感材料加工,将敏感器件与其信号处理电路制作在一块芯片上,实现了敏感器件集成化。

(2)大量小尺寸、高精度和低成本的集成化敏感器件与微型计算机配合,广泛用于生产自动线、数控机床和机器人等自动控制与自动检测系统。

(3)以半导体敏感材料、陶瓷敏感材料和有机敏感材料为代表的新型敏感材料应用于传感器件中,改变了以传统的结构型传感器为主的局面;大量物性型传感器被采用,成为主流。目前,生物传感器和化学传感器面世,使测试与传感技术从物理领域向生物和化学领域延伸。

(4)光导纤维的出现引起信息传递技术发生变革。高速、可靠、低损耗和大量信息的光导纤维传输冲击了传统的电信号导线传输方式。光纤走进测试与传感系统,是敏感器件集成化后又一次革命。

从图 0-1 所示的测试系统的结构框图可以看出其发展过程及今后的动向。

图 0-1(a)所示是一个被测量转换成电信号的测试系统——由传感器、电信号处理电路、电信号转换成数字量及由微机控制等四个部分组成。也可视为由敏感器件芯片、集成电路芯片、A/D 芯片及单片机组成。

图 0-1(b)所示是由两块芯片组成的系统。第一块芯片为敏感器件及输出电路,如图 0-2(a)所示,为集成化硅压力传感器。将硅单晶腐蚀成膜片作为压力敏感元件,在膜片上镀电极,对面为固定电极,构成一个压力敏感电容器。压力作用使电容变化,在同一硅片上制作出输出信号放大电路,如图 0-2(b)所示。以上构成敏感元件与信号处理电路为一体的集成敏感器件。第二块芯片是带 A/D 转换的微控制器。如 51 系列单片机中的 80C552 就是一个有 8 通道 10 位转换精度 A/D 转换的微控制器。

图 0-1(c)是包括上述功能的单一芯片测试系统,是今后的发展方向。

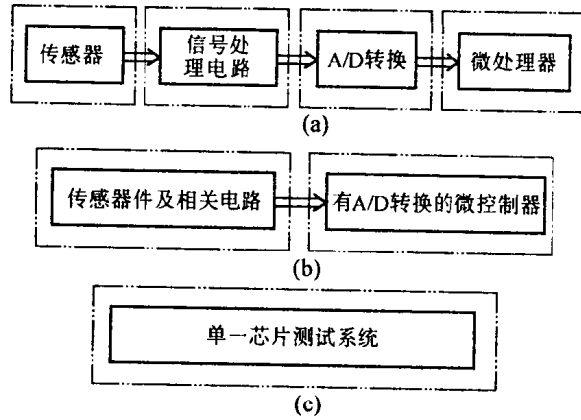


图 0-1 测试系统示意图

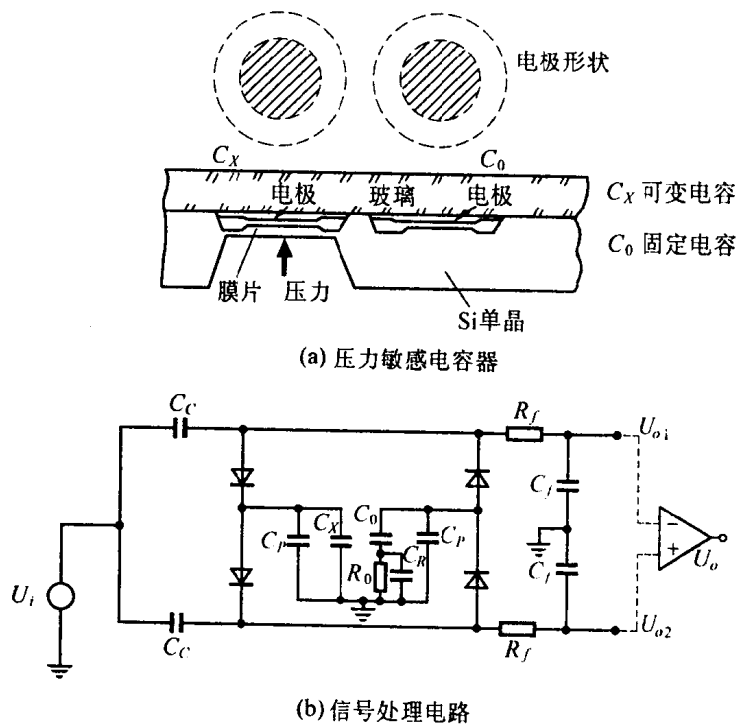


图 0-2 集成化硅压力传感器

第一章 敏感材料

相对金属材料而言,半导体材料、陶瓷材料和有机材料等称为新型敏感材料。新型敏感材料的开发是发展测试与传感技术的关键。作为传感器用敏感材料,其灵敏特性是最基本的特性。之所以采用半导体材料、陶瓷材料和有机材料等作为敏感材料,是因为它们具有对外界条件变化特别敏感的特性。例如,金属材料应变片的灵敏系数为 2 左右,而半导体硅应变片的灵敏系数达 100 以上,约为前者的 30~70 倍。

除最基本的敏感特性外,敏感材料还应具有工作可靠性、可加工性和经济性几个方面的特性。下面列出了敏感材料应具备的基本特性。



用上述基本特性衡量,各种敏感材料各有长短。其中,敏感特性是首先应考虑,其次再根据工作条件考虑其它特性。

第一节 敏感材料转换功能

一、晶向表示法

目前,已知 32 种晶体点阵。不论属于哪种晶系的晶体,其物理特性均与晶向有关。不单为研究方便,选用晶体切片也必须先确定晶向。这就需要在晶体内选定参考方向,即晶体轴。晶体轴是晶体的一个方向,并非一条直线。晶向是指晶面的法线方向。为了表示晶向要建立一个空间直角坐标系,找出晶面法线方向与其几何关系,晶向也就表示出来了,即晶向表示法。

一种是截距表示法。如图 1-1 所示,设单晶体的晶轴坐标系为 $Oxyz$ 。晶体的某一晶面在三坐标轴上截距分别为 r, s, t ; 三截距的最小公倍数为 M 。分别有 $M = a \cdot r, M = b \cdot s, M = c \cdot t$ 。三截距的倒数为 $1/r, 1/s, 1/t$, 与最小公倍数 M 之积分别为 a, b, c 。这三个没

有公约数的整数称做密勒指数,用以表示晶面的法线方向,记作 $\langle abc \rangle$ 。例如某晶面的晶向为 $\langle 111 \rangle$,表示 $a = b = c = 1$,显然 $r = s = t = 1$,晶面与三坐标轴等截距。又如晶向为 $\langle 100 \rangle$,表示 $a = 1, b = c = 0$,则 $r = 1, s = t = \infty$,晶面仅与 x 轴垂直,与另两坐标轴平行。再如晶向为 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$,表示 $a = 1, b = -1, c = 0$ 。 $b = -1$ 表示在 y 轴反方向取截距 $s = -1$,该晶面与 z 轴平行,与其余两坐标轴相交。

另一种是法线表示法。仍如图 1-1 所示,过坐标原点 O 做平面 rst 的法线 OP ,取 $OP = 1$; OP 与三坐标轴夹角分别为 α, β, γ 。以 OP 在三坐标面投影为边长做一长方形,与三坐标轴交点分别为 L, M, N 。用所得到的法线方向余弦 $\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$ 表示该法线方向,因取 $OP = 1$,有

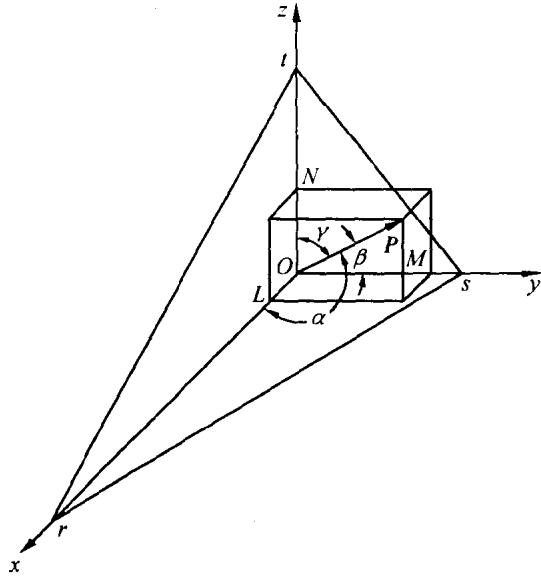


图 1-1 晶向表示法

为 L, M, N 。用所得到的法线方向余弦 $\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$ 表示该法线方向,因取 $OP = 1$,有 $OL = l = \cos\alpha, OM = m = \cos\beta, ON = n = \cos\gamma$,即也可用 l, m, n 表示该法线的方向余弦。显然,方向余弦与密勒指数所表示的晶向本质是一样的。可以证明

$$\cos\alpha : \cos\beta : \cos\gamma = a : b : c \quad (1-1)$$

$$l = \cos\alpha = a / \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \quad (1-2)$$

$$m = \cos\beta = b / \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \quad (1-3)$$

$$n = \cos\gamma = c / \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \quad (1-4)$$

二、晶体对称性与电介质极化

物质在外电场作用下,其中的电荷载体(电子和空穴、阴离子和阳离子等)有两种运动状态。一种是电荷载体受到电场力的作用宏观移动,并伴有电流产生的导电状态。另一种是受到电场力的作用电荷载体产生短暂的微观移动;电场力消失,电荷载体又被重新束缚在确定位置上。电荷载体的微观移动使正电荷的重心位置与负电荷的重心位置分开,这种现象叫电介质的极化。产生电介质极化的机理有:(1)电子极化——电子与原子核相对位置变化;(2)离子极化——离子性化合物的正、负离子重心偏移;(3)取向极化——偶极子对瞬间电场取稳定方向的极化;(4)空间电荷(电场)极化——在多晶体等非均匀介质中,由于电荷载体聚集在特定空间或界面产生的极化。

电介质的极化现象与晶体结构密切相关。电介质材料遍及已知的 32 种晶体点阵中,所有电介质晶体都可以外加电场诱发极化。具体地说,其中 11 种晶体点阵有对称中心,另 1 种无对称中心;这 12 种电介质晶体,只有外加电场作用才产生极化,称做介电体。介电体这种外加电场作用产生极化的性质叫介电性。

其余 20 种无对称中心的晶体点阵,在外力作用应变时,会在相应的晶面上产生正、负电荷重心偏移。这种由应力作用的极化叫压电性。这类晶体叫压电晶体。可见压电性与晶体点阵无对称中心密切相关。图 1-2(a)所示无对称中心(几何上点对称)的晶体不受外力时,正负电荷重心重合,表示极化强度的电偶极矩为零。在外力作用下晶体变形,正负电荷重心不重合,总电偶极矩不为零,晶体对外呈现极性,即极化。图 1-2(b)中,由于晶体点阵有对称中心(几何上轴对称),无论有无外力作用,晶体中正负电荷重心总是重合的,不产生极化现象。可见,晶体点阵无对称中心是产生压电性的必要条件。

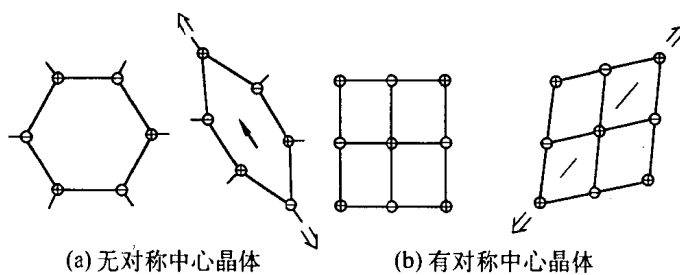


图 1-2 晶体压电性

在具有压电性的 20 种压电晶体中,还有点对称性较低的 10 种晶体点阵,在既无外加电场也无外力作用的状态下,晶体也能产生自发极化。但由于大气中浮游电荷在晶面上吸附,通常并不显现自发极化。当温度变化时,由于晶体的热膨胀和热振动状态发生变化,从而使自发极化发生变化,在晶面上产生电荷,表现出极化现象。此现象叫热释电性。

热释电晶体中,有的晶体可由外加电场使自发极化的方向反转,这种性质称铁电性或强介电性。可见,铁电体必然有热释电性和压电性。上述电介质极化的各种性质及与晶体对称性的关系如图 1-3 所示。

热释电晶体中,有的晶体可由外加电场使自发极化的方向反转,这种性质称铁电性或强介电性。可见,铁电体必然有热释电性和压电性。上述电介质极化的各种性质及与晶体对称性的关系如图 1-3 所示。

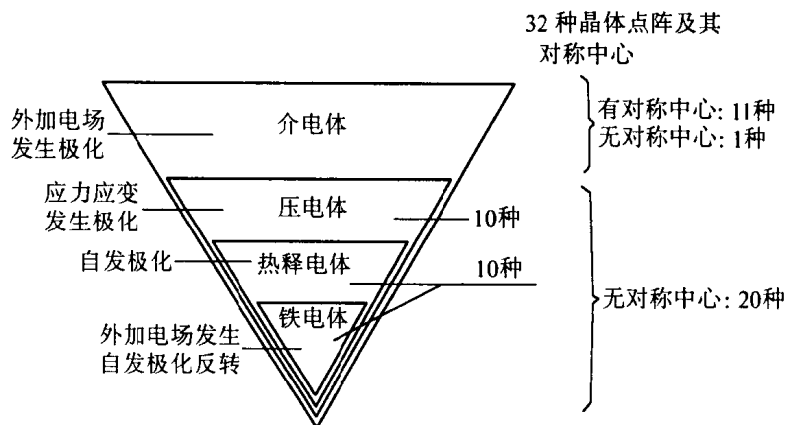


图 1-3 晶体对称性和电介质极化

三、敏感材料的转换功能

敏感器件,通常理解为将被测(物理)量转换为电学量的器件。这样的转换功能是利用敏感材料的固有特性实现各种物理效应完成的。主要转换功能有:压-电转换,磁-电转换,光-电转换,热-电转换等。

1. 压-电转换功能

给晶体施加外力(压力或拉力),晶体表面产生正比于外力大小的电势差现象,称做正

压电效应;如果电场加于压电材料上,材料产生正比于电场强度的机械变形现象,称做逆压电效应或电致伸缩现象。正压电效应是机械能转换成电能;逆压电效应是电能转换成机械能。压电效应是晶体的物理现象,它具有方向性。当外力方向与生成的电势差方向一致时称做纵向压电效应;如果外力方向与生成的电势差方向垂直时称做横向压电效应。

已知的 32 种晶体点阵中有 12 种在应力作用下只产生应变,其余 20 种无对称中心的电介质晶体,应力作用除产生应变外,还有极化现象,即压电效应。

2. 磁-电转换功能

利用磁-电转换功能的敏感器件有霍尔器件和磁阻器件等。

(1) 霍尔效应(Hall effect)

金属或半导体薄片置于磁场中,当有电流流过时,在垂直于电流方向和磁场方向上将产生电动势,这叫霍尔效应。具有霍尔效应的器件称为霍尔器件。由于金属材料的自由电子浓度 n 很高,其霍尔系数 R_H 很小,则产生电动势极小,不宜作霍尔器件。半导体材料适合作霍尔器件。又因霍尔系数 R_H 与载流子迁移率有关,而一般情况下电子迁移率大于空穴迁移率,故多选用 N 型半导体材料。霍尔器件的灵敏系数 K_H 与霍尔器件厚度 d 有关。厚度 d 值越小,灵敏系数 K_H 值越高。薄膜霍尔器件,厚度只有 $1\mu\text{m}$ 。

(2) 磁阻效应

当霍尔器件受到与电流方向垂直的磁场作用时,不仅产生霍尔效应,还会出现半导体电阻率增大的物理现象,这种现象叫磁阻效应。产生的原因是由于磁场作用时,磁场力作用使载流子移动方向弯曲,即外加电场方向的电流分量减小,显示电阻增大。霍尔器件内阻随磁场强度增加而增加的磁阻效应降低霍尔电势的输出。当半导体中仅存在一种载流子(电子或空穴)时,磁阻效应几乎可以忽略。若两种载流子都存在,磁阻效应则很强,这种半导体作磁阻器件用。

3. 光-电转换功能

入射光子使物质吸收光能,可以使物质表面发射电子,称做外光电效应;也可以激发载流子(电子或空穴),但仍在内部,称做内光电效应。这种光能转换成电能的物理现象叫做光电效应。内光电效应又分成光导效应和光伏效应。应该指出,由于光与半导体材料间的作用比与导体及绝缘体强,通常用半导体材料作光敏器件。

(1) 外光电效应

入射光子能使吸收光能的物质表面发射电子,即电子逸出物质表面。如果要使电子从表面逸出,照射光子所具有的能量 E 必须大于电子逸出表面所需的逸出功 A_0 。这种外光电效应又叫做光电发射效应。

(2) 光导效应

入射半导体的光子有大于半导体禁带宽度的能量,则被吸收使半导体中电子从价带激发到导带。光照射引起载流子增加,从而使半导体的电导率增加的现象称做光导效应或光电导效应。

(3) 光伏效应

如果光照在 PN 结附近,同光导效应相同产生电子-空穴对,电子向 N 区扩散,空穴向 P 区扩散,在 PN 结两端产生电动势,这种现象称做光伏效应。

光伏效应与光导效应的区别在于:前者由于电子-空穴对生成后电子与空穴分离产生电动势,不必外加电源,这种形式的敏感器件有光电二极管、光电三极管;而后者是电导率发生变化,这种形式的敏感器件为光敏电阻。

4. 热-电转换功能

热能及与之相关的温度是与人类生活最密切相关的物理量。金属的热膨胀现象,可用来制成热膨胀系数不同的双金属片敏感器件。金属的电阻率随温度变化,半导体材料也一样。温度变化影响载流子浓度和迁移率的变化,即导电率的变化。可利用半导体这一电阻温度特性制成热敏电阻器件。由于半导体的热敏特性比金属显著,灵敏系数高,因此,半导体材料更广泛用于温度传感器。另一方面,由于热膨胀系数和电阻温度系数的影响,对应用其它物理特性的传感器,温度误差是很重要的影响因素,这又是不利的一面。

作为热-电转换功能的主要物理现象有热释电效应和热电效应等。

(1) 热释电效应

前面提到的晶体结构与电介质极化关系中的热释电体,由于温度变化产生自发极化现象,叫热释电效应。通常,极化电荷被附着在物质表面的离子中和。温度变化,其表面感应出极化正电荷,对应表面感应出极化负电荷。两极间接电流计,有电流通过。电流为

$$I = P \frac{dT}{dt} \quad (1-5)$$

式中, P 为热释电系数,单位为 $C/(m^2 \cdot K)$; dT/dt 为温度对时间的变化率。

热释电效应产生的电荷会很快被空气中的各种离子中和。要保证电荷连续出现,就要有周期性变化的温度源。如制成光敏器件,就要有周期性变化的人射光源。

(2) 热电效应

导体或半导体两端温度不等,高温端自由电子受热而具有较大动能向低温端扩散形成电子流。高温端失去电子带正电,低温端获得电子带负电,这种由温差引起的电势差称做热电(动)势。这种物理现象叫热电效应。利用热电效应把两种不同的导体或半导体连接起来,当接点温度变化时,就会在相应的电路中产生热电势。随着电路形式不同又有不同的热电效应。

(a) 塞贝克效应(Seebeck effect)

两种不同导体或半导体 a 和 b 的热端(温度 T_1) 连接在一起,和冷端(温度 T_2) 之间存在温差($\Delta T = T_1 - T_2$)。冷端开路,在冷端会产生开路电压 ΔU ,此现象称为塞贝克效应(见图 1-4),可用下式表示

$$\Delta U = \alpha_s \cdot \Delta T \quad (1-6)$$

式中, α_s 称塞贝克系数,单位为 $\mu V/K$ 。

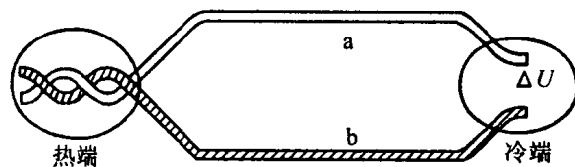


图 1-4 塞贝克效应

(b) 珀尔帖效应(Peltier effect)

若两种不同导体或半导体连接成一闭合回路,闭合电路中流过电流 I ,则在一个接点处产生热量 W ,而另一接点处吸收热量 W' ,此现象为珀尔帖效应,有 $W = W'$ 。产生的热量与回路电流的关系表示为

$$W = \Pi_{ab} \cdot I \quad (1-7)$$

式中, Π_{ab} 称珀尔帖系数, 单位为 μV 。

Π_{ab} 大小取决于材料组合和环境温度。它与塞贝克系数 α_s 之间有如下关系

$$\Pi_{ab} = \alpha_s \cdot T \quad (1-8)$$

式中, T 为环境温度。

(c) 汤姆逊效应 (Thomson effect)

在同一种导体或半导体中, 位置不同、温度不同, 此时有电流 I 流过, 此现象称为汤姆逊效应。其单位长度、单位时间产生的热量 dQ/dx 与电流 I 的大小和该处的温度变化率 dT/dx 成正比, 形式为

$$dQ/dx = \tau_T \cdot I \cdot dT/dx \quad (1-9)$$

式中, τ_T 称汤姆逊系数, 单位为 $\mu V/K$ 。

上述三种热电效应相近或相逆, 较易混淆。归纳起来, 塞贝克效应是热能转换成电能; 而珀尔帖效应是电能转换成热能, 它是塞贝克效应的逆效应; 汤姆逊效应与珀尔帖效应相近, 前者是同一种导体或半导体的组合。为了清楚起见, 表 1-1 给出三种效应的比较, 表 1-2 给出典型组合物的珀尔帖系数和金属铜 (Cu) 和铂 (Pt) 在不同温度的汤姆逊系数大小。

表 1-1 三种热电效应的比较

效 应	材 料	加热情况	外电源	所呈现的效应	
塞 贝 克	金属的	两种金属	两端保持不同温度	无	冷端产生热电势
	半导体的	两种半导体	两端保持不同温度	无	冷端产生热电势
珀 尔 帖	金属的	两种金属	整体为某温度	加	接触处产生焦耳热以外的吸、发热
	半导体的	两种半导体	整体为某温度	加	接触处产生焦耳热以外的吸、发热
汤 姆 逊	金属的	两条相同金属丝	两条金属丝各保持不同温度	加	温度转折处吸热或发热
	半导体的	同种半导体	两端保持不同温度	加	整体升温或降温

表 1-2 几种金属的热电系数

典型组合的珀尔帖系数				汤姆逊系数		
相接触的物质 a — b	温 度 ($^{\circ}C$)	珀尔帖系数 $\Pi_{ab}(\mu V)$	物质	温 度 ($^{\circ}C$)	汤姆逊系数 $\tau(\mu V/K)$	
Ag — Cu	0	+ 480	Cu	- 133	+ 0.06	
Bi (\perp) — Cu	19.75	- 14 120		0	+ 1.6	
Bi (//) — Cu	20.5	- 21 060		500	+ 2.6	
Bi (45°) — Cu	19.5	- 23 300	Pt	- 50	- 9.4	
Sb — Cu	0	+ 5 640		0	- 9.1	
Cu — 康铜	15.5	+ 10 200		100	- 9.1	

第二节 半导体敏感材料

一、半导体的电子特性

半导体内载流子(电子和空穴)的浓度可以在很宽范围内变化。外部作用能改变载流子的浓度和迁移率,即能控制电导率的变化,也就是半导体内阻的变化。半导体这种电子特性,就是半导体敏感器件物理特性的基础。

理想半导体在绝对零度时,其价(电子)带完全被电子占满,且电子不移动,即不能被激发到更高的能级。若温度升高或掺杂使部分电子吸收足够的能量被激发到导带,则这些电子可以自由移动,成为载流子。价带中没有被电子占有的量子能级可看作带正电荷的粒子,称其为空穴。跃迁电子与空穴形成电子-空穴对。图 1-5 表示这些粒子在空间的情况。横向为空间坐标,纵向为电子能量的能带图。(a)是光照吸收的能带图;(b)是掺杂的能带图。由图可知,在价带与导带之间存在有限能隙,即半导体内在价带和导带之间不存在有能量的电子。价带和导带的间隔为禁带,其大小用带隙能量 E_g 表示。 $h\nu$ 表示光子能量。

均匀半导体晶体电阻率为 ρ ,其倒数为电导率 σ 。如果用电流密度 $J(\text{A}/\text{cm}^2)$ 代替电流

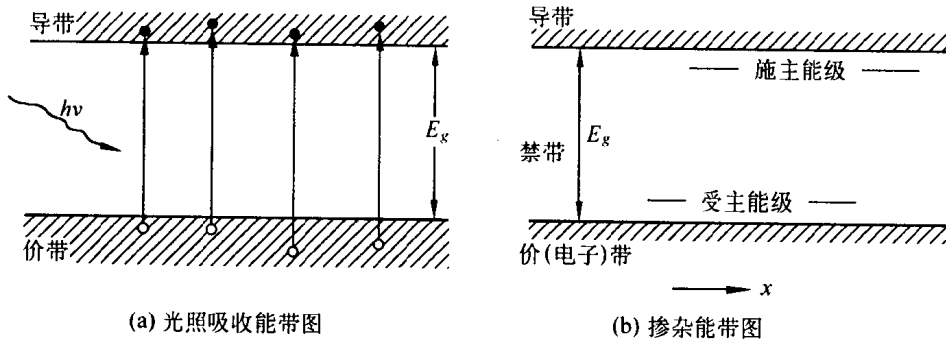


图 1-5 能带图

I ,用电场强度 $E(\text{V}/\text{cm})$ 代替电压 U ,则欧姆定律可表示为

$$J = \sigma \cdot E \quad (1-10)$$

设电子电荷量为 q_0 ($q_0 = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$),传导电子浓度为 n ,传导电子速度为 v_n ,空穴浓度为 p ,空穴速度为 v_p ,则

$$J = n \cdot (-q_0) \cdot (-v_n) + p \cdot q_0 v_p = q_0(nv_n + pv_p) \quad (1-11)$$

电压不太高时,漂移速度与电场强度成正比,其系数称做迁移率。设电子和空穴的迁移率分别为 μ_n 和 μ_p ,则

$$|v_n| = \mu_n E \quad (1-12)$$

$$|v_p| = \mu_p E \quad (1-13)$$

从上述各公式可导出外加恒电场时的电导率为

$$\sigma = q_0(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \quad (1-14)$$

结论是电导率 σ 的大小由电子浓度及电子迁移率和空穴浓度及空穴迁移率决定。电场恒定, 电流密度越大, 其电导率也越大。

影响载流子浓度及迁移率的因素主要有掺杂和温度。掺杂是半导体材料之本。自由载流子浓度决定于掺杂。温度升高提供能量, 载流子浓度和迁移率都依赖于温度变化。

二、外场对半导体物理性能的影响

电场、磁场、温度场、机械外力以及光照和放射线照射都会影响半导体的电子特性。

1. 电 场

电子迁移率一定, 电场增强, 使电子漂移速度加快。但电子加速到一定程度, 也加速了电子本身的无规则热运动, 即扩散运动, 出现了速度饱和, 这种现象称为热电子效应。若再增加电场强度, 则电子的动能超过带隙能量可能引起内部电子与原子的碰撞产生新的电子-空穴对, 出现“雪崩倍增”现象, 引起内阻急剧下降, 产生类似于气体绝缘被破坏时的放电现象或“击穿”现象。

2. 磁 场

上节已叙述过, 半导体在磁场中可以产生霍尔效应和磁阻效应, 可作霍尔器件和磁阻器件。反之, 在磁场中产生的现象也是研究半导体中载流子种类、浓度及迁移率的手段。

3. 温度场

半导体的电子特性对温度的依赖性很大, 也就是说, 温度变化是影响半导体电子特性的主要因素。从热 - 电转换功能可知不论是热释电效应还是热电效应, 对半导体材料, 温度变化影响电子和空穴的浓度和迁移率。公式(1-14) 中的 n, p, μ_n, μ_p 是依赖温度 T 的参数, 电导率 σ 是温度的函数。不同的半导体材料电阻随温度变化不仅有复杂的非线性关系, 还有在某一温度下, 阻值急剧增加或急剧减少, 甚至骤变的现象。据此, 有负温度系数 (negative temperature coefficient) 热敏电阻、正温度系数 (positive temperature coefficient) 热敏电阻和临界温度系数 (critical temperature coefficient) 热敏电阻。简称 NTC 热敏电阻、PTC 热敏电阻和 CTR 热敏电阻。

4. 机械外力

机械外力引起机械应变, 使原子间相对位置变化引起能带结构的变化, 从而改变载流子的浓度和迁移率, 最终表现为应变区域电阻值随晶体应力而变化, 这就是压阻效应。据此效应, 可制成半导体压力敏感器件。把这种半导体膜片作为电容器的一个极板, 膜片变形使极板间距变化, 引起电容器电容量变化, 可构成一个电容式压力传感器。这样把集成电路技术和膜片加工的各向异性腐蚀技术结合起来, 就可使转换电路和信号处理电路集成化。

5. 光和放射线照射

光和放射线照射使电子获得能量, 从而引起电子从价带到导带的跃迁, 使电子-空穴对增加。这就是光-电转换各种效应的产生原因。不论哪种效应均是光和放射线照射的外场效应所致, 则可制成输出特性受外场影响的光敏器件。

以硅片为代表的半导体材料是最为广泛应用的传感器敏感材料。这与半导体器件理

论的完善、集成电路技术的发展和半导体敏感器件制造的微细加工技术的应用密不可分。各种敏感器件使用的半导体材料,见表 1-3。

表 1-3 半导体材料

敏感器件	半导体材料
压力和位移敏感器件	Si, CdS, ZnO, Ge, InSb
磁敏器件	Si, InSb, InAs, Ge, GaAs
热敏器件	Si, Ge, GaAs, CdTe
光敏器件	Si, CdS, Se, GaAs, Ge, InSb, CdHgTe, PbS, PbSnTe
射线敏器件	Si, CdTe, HgI ₂ , GaAs, Ge

三、微细加工技术

微细加工是在硅半导体集成电路加工技术基础上发展起来的。可利用晶体生长技术、杂质扩散技术、腐蚀技术和薄膜技术等在半导体的硅片上加工出敏感器件。这样,利用微细加工技术,如图 0-2 所示将敏感器件、信号处理电路等制作在一块芯片上。下面就微细加工技术的各种工艺方法予以说明。

1. 各向异性腐蚀

各向异性腐蚀是利用腐蚀速度随硅片晶向不同而相差很大的特点及掺杂的杂质浓度不同可选择性地只对特定层腐蚀的技术。

图 1-6 是各向同性腐蚀和各向异性腐蚀的对比。对氧化膜(SiO₂)下面的硅片腐蚀。图(a)是采用 HF-HNO₃ 系水溶液的各向同性腐蚀,各向腐蚀速度相同与晶向无关。图(b)是采用碱系(KOH)或水合乙二胺系(EPW)水溶液的各向异性腐蚀。如用 EPW 腐蚀,在晶向 <111> 和晶向 <100> 上非键合数不同,腐蚀速度不同。在晶向 <111> 方向上腐蚀速度慢,两者腐蚀速度比为 1:35。

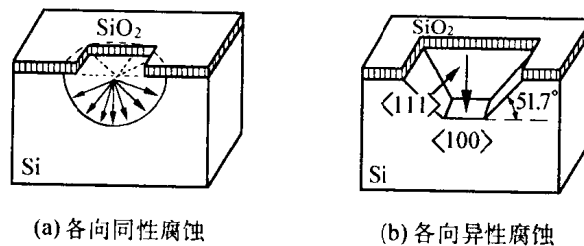


图 1-6 腐蚀的形状

另外,利用腐蚀速度对杂质浓度的依赖性可对特定层腐蚀。图 1-7 所示为利用晶向不同和杂质浓度不同得到悬臂敏感元件。(a)为如图 1-6(b)那样腐蚀出 V 型沟;(b)为对掺杂层的定向腐蚀;(c)为完成悬臂的加工。

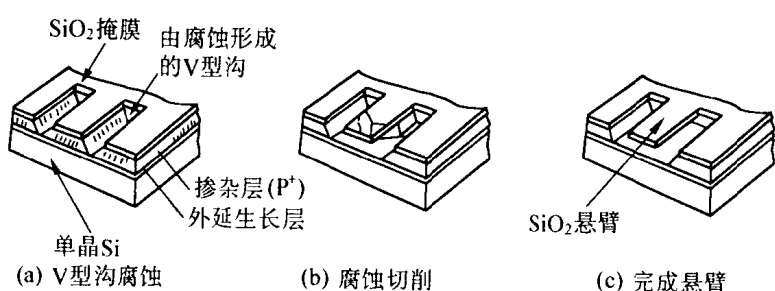


图 1-7 各向异性腐蚀悬臂加工过程

2. 氧化与掺杂

在硅片表面上制作 SiO₂ 氧化膜是对硅片平面加工的一项必需技术。制作氧化膜的方法有热氧化法、溅射法、化学蒸发沉积法(CVD)等。氧化膜的厚度由氧化条件、氧化时间决定。还受晶向、杂质表面浓度的影响。绝缘膜、金属膜(电极)、半导体膜等各类薄膜的制作方法同氧化膜的制作类似。

另一必需的技术是掺杂——杂质扩散。在硅片表面掺入杂质原子制成 P-N 结。掺杂技术有:(1)气相扩散;(2)固相间扩散;(3)离子注入等方法。

气相扩散法——以 POCl₃(三氯氧磷)为扩散源,氧气作载体向硅片表面扩散杂质。

固相间扩散法——BN(氮化硼)薄圆片与硅片对置,加热使之扩散。BN 在高温下表面氧化,形成 B₂O₃,经退火处理稳定化。

离子注入法——加电压使杂质离子获得能量,加速向硅片的扩散。这种方法能准确控制杂质注入量及杂质分布。

3. 键合技术

键合是将敏感器件与固定台利用固相键合的方法连接在一起。如图 1-8 所示,把压力敏感硅膜片与低熔点的晶化玻璃键合在一起。

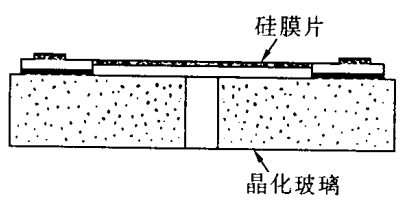


图 1-8 硅膜片型压力敏感器件

上述各种方法的综合利用称做平面电子工艺技术。如硅平面工艺是在有掩膜(SiO₂ 氧化膜)的硅单晶上进行有方向选择的杂质扩散和腐蚀加工。

在此基础上,平面工艺的组合成为立体加工。图 1-9 是 MOS 型霍尔集成电路的硅平面工艺原理图。在此将 MOS 型霍尔器件与差分放大器制作在同一硅片上。左边是 MOS 场效应管霍尔器件,右边是差分放大器。

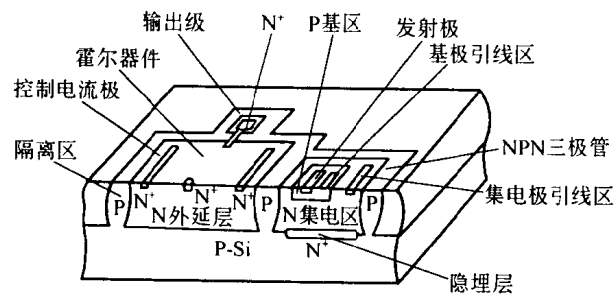


图 1-9 霍尔集成电路的结构原理图