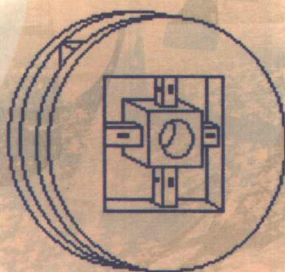
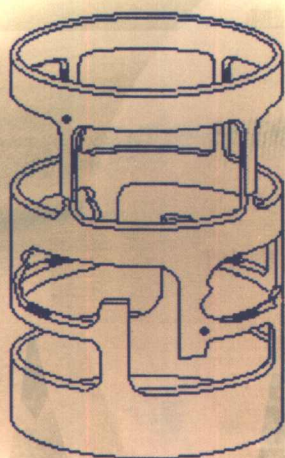


新型传感器

原理及应用

Principles and Applications
of New Type Sensor

王元庆 编著



机械工业出版社
China Machine Press



新型传感器原理及应用

王元庆 编著



机械工业出版社

本书介绍了新型传感效应, 新型敏感材料, 新加工工艺, 固态光电传感器, 电荷耦合器件 (CCD), 光纤传感器, 集成传感器, 化学传感器, 机器人传感器和薄膜传感器等新型传感器的工作原理、结构、特性等基本知识, 并在此基础上进一步介绍了各类传感器的典型外围电路, 传感器信号的引出、放大、补偿等应用类知识。

本书对各类传感器列举了大量应用实例, 对具体的应用问题进行了详尽的分析, 并对新型传感器在几何量测量方面的应用进行了专题介绍, 书中提供了大量的实用电路以及详细的电路分析。

本书是在立足基本理论、面向应用技术的指导思想下编著的, 理论与实践相结合, 具有很强的实用性。本书可作为电子与信息工程、检测技术与仪器、工业自动化、电子与光学仪器等专业的大学本科教材, 并可供从事同类专业的科技工作者作参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

新型传感器原理及应用/王元庆编著. —北京: 机械工业出版社, 2002.4

ISBN 7-111-09929-X

I. 新… II. 王… III. 传感器-基本知识 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 013225 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 韩雪清 卢若薇 版式设计: 霍永明 责任校对: 樊钟英

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 付方敏

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm × 1400mmB5·8.25 印张·320 千字

0 001—4 000 册

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677—2527

封面无防伪标均为盗版

前 言

作为信息获取的重要手段之一，传感器是将电子系统无法处理的外界物理量或者化学量转换为电信号的主要器件。对于测量与控制系统而言，传感器是构成对外界物理量或者化学量加以检测的前端器件；对于包括机器人在内的智能化系统而言，传感器是系统感知外界信息的“五官”和系统内部工作状态的“神经”。传感器是实现信息化的基础技术之一，在当代科学技术领域中占有十分重要的地位。

传感器已广泛应用于包括国防、环保、工业、农业、交通运输、日常生活等所有领域，并伴随着现代科学技术的进步而不断发展。信息获取技术正向多元、快捷、大容量、非接触等方向发展，因此，对传感器不断提出新的要求；与此同时，材料技术、新加工工艺的不断发展也为改进和开发新型传感器打下坚实的基础。从20世纪80年代起，基于新型传感效应、新型敏感材料、新加工工艺的新型传感器的开发研究迅速兴起，各类实用化的敏感器件也不断涌现并逐步完善、成熟。应用新型传感器进行信息获取和转换的应用技术方兴未艾，带有新型传感器的仪器、设备和处理系统越来越多，新型传感器已经成为当今信息技术中信息获取的重要器件。

作者注意到以上现状和趋势，在参阅有关文献、汲取其精华的基础上，综合近年来的教学和科研成果，编著了本书。

本书以介绍传感器的原理为基础，侧重于应用，理论与实践相结合，注重应用技术的介绍，力图在传感器应用方面使读者有所启发。

本书第一章介绍与新型传感器有关的新效应、新材料、新工艺，对于读者理解和掌握传感器的工作原理、结构特点等十分有益。

本书第二~八章分别介绍固态光电传感器、电荷耦合器件、光纤传感器、集成传感器、化学型传感器、机器人传感器、薄膜传感器等新型传感器的原理、结构和性能参数。由于传感器不是一个孤立的器件，它必须与信号处理电路相结合，因此，在每介绍一类传感器之后都相应地介绍其典型外围电路。为了帮助读者理解和掌握所学的基本知识，书中列举和分析了大量的应用实例。在每一章的最后，用一节的篇幅列举该类传感器的应用实例，对应用背景、结构设计、电路设计等加以详尽的介绍，并对传感器的应用电路进行详细的分析。

本书第九章介绍传感器的信号引出、放大、补偿等常用技术。第十章对新型传感器在几何量测量方面的应用作了专题介绍，详细分析了每一课题的背景知

IV

识、系统设计、传感器及其应用电路、信号处理等。

本书可作为光电子技术、电子信息技术、自动化、仪器仪表等专业的大学本科教材，也可作为有关技术工作者的参考书。

由于编者水平有限，编写时间又仓促，出现错误在所难免，恳切希望读者批评指正。

王元庆

目 录

前言

第一章 新型传感器综述	1
第一节 新型传感效应	1
第二节 新型敏感材料	9
第三节 新加工工艺	18
第二章 新型固态光电传感器	32
第一节 普通光敏器件阵列	32
第二节 自扫描光电二极管阵列 (SSPD)	36
第三节 光电位置传感器 (PSD)	43
第四节 输液监测中的光电传感器	47
第三章 电荷耦合器件 (CCD)	52
第一节 CCD 的物理基础	52
第二节 CCD 的工作原理	56
第三节 CCD 器件	63
第四节 CCD 在测量中的应用	69
第四章 光纤传感器	77
第一节 光纤传感原理	77
第二节 常见光纤传感器	88
第三节 光纤传感器的应用	97
第五章 集成传感器	104
第一节 集成压敏传感器	104
第二节 集成温敏传感器	111
第三节 集成磁敏传感器	116
第四节 集成传感器应用实例	122
第六章 化学传感器	131
第一节 离子敏传感器	131
第二节 气敏传感器	135
第三节 湿敏传感器	142
第四节 工业废水排放的自动监测	148
第七章 机器人传感器	154

第一节	机器人传感器的功能与分类	154
第二节	机器人视觉传感器	156
第三节	机器人触觉传感器	167
第四节	机器人接近觉传感器	174
第八章	薄膜传感器	178
第一节	薄膜热传感器	178
第二节	薄膜应变片	183
第三节	薄膜气敏传感器	187
第四节	薄膜传感器的应用	191
第九章	传感器的信号处理	197
第一节	信号处理概述	197
第二节	传感器的信号引出	200
第三节	信号补偿电路	208
第四节	精密放大电路	214
第十章	新型传感器在几何量测量中的应用	224
第一节	光学透镜中心偏差的测量	224
第二节	超光滑表面微观轮廓的测量	232
第三节	光学表面疵病度的测量	236
附 录		241
附录 A	光度学的基本物理单位	241
附录 B	电磁波谱与可见光	242
附录 C	远心光路	243
附录 D	常见的几种光纤干涉仪	244
附录 E	声光调制器	245
附录 F	波片	246
附录 G	光源的驱动	246
附录 H	国外常见机型中的有源矩阵液晶显示器	249
附录 I	机器人视觉计算理论简介	250
附录 J	军用加固型液晶显示器相关资料	252
参考文献		256

第一章 新型传感器综述

所谓新型传感器是指最近十几年内研究开发出来的、已经或正在走向实用化的传感器，相对于传统的结构型传感器而言，新型传感器大部分属于物性型传感器。

随着现代科学技术的迅猛发展，许多新效应、新材料不断被发现，新的加工工艺不断发展和完善，这些都进一步促进了新型传感器的研究开发工作。了解这方面的知识，对于学习和理解新型传感器十分有益，因此，本章将对一些新效应、新材料以及新的加工工艺作概要性地介绍。

第一节 新型传感效应

按引起传感效应的物理量来区分，新型传感效应可分为光效应、磁效应、力效应、化学效应、生物效应等等，本节将按此分类逐一介绍。

一、光效应

与光有关的新效应：光电导效应、光伏效应等光电效应，克尔（Kerr）效应、光弹效应等电光效应，以及光的多普勒效应等。

1. 光电导效应

在光辐射作用下，材料的电导率发生变化，这种变化与光辐射强度呈稳定的对应关系，这种现象就是光电导效应，光电导效应属于内光电效应。

如图 1-1 所示，如果在材质均匀的光电材料两端加上一定电压，当光照射到材料上时，由光照产生的光生载流子在外加电场作用下沿一定方向运动，在回路中产生电流 I_p ，电流的大小受光照强度的控制，用这种光电导效应制作的典型器件就是光敏电阻。

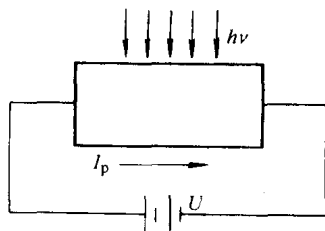


图 1-1 光电导效应

光电导材料有两种类型，即本征型和掺杂型，本征型光电导材料只有当入射光子能量 $h\nu$ 等于或大于半导体材料的禁带宽度 E_g 时才激发一个电子-空穴对，在外加电场作用下形成光电流，能带图如图 1-2a 所示。掺杂型光电导材料如图 1-2b 所示，是 N 型半导体，光子的能量 $h\nu$ 只要等于或大于杂质电离能 ΔE 时，就能把施主能级上的电子激发到导带而形成导电电子，在外加电场作用下形成电流。

光电导器件（如光敏电阻）的光电流与入射光通量之间存在着一定的关系

(称光电特性), 当器件两电极间加定值电压 u 时, 光电流和照度关系曲线如图 1-3 所示。光照度在 $10^{-1} \sim 10^4 \text{lx}$ 范围内, 光电流 I_p 为

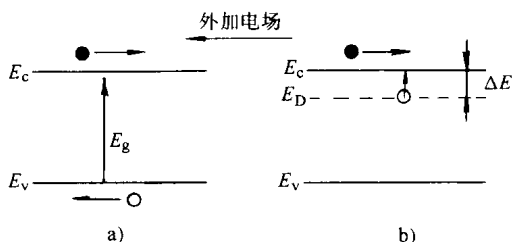


图 1-2 两种类型光敏电阻能带图

a) 本征型光电导材料 b) 掺杂型光电导材料

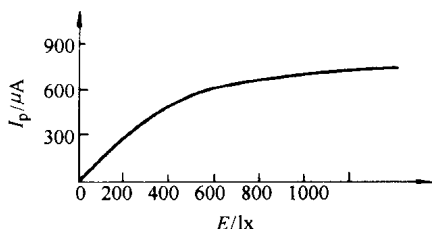


图 1-3 光电流-照度特性曲线

$$I_p = S_g U E = g_p U \quad (1-1)$$

式中, E 为入射光的光照度; g_p 称为光敏电阻的光电导; S_g 为光电导灵敏度。

若考虑暗电导 g_d 产生的暗电流 I_d 时, 则流过光电导器件的电流 I 为

$$I = I_p + I_d = g_p U + g_d U \quad (1-2)$$

电导的单位为“西门子”, 简称“西”, 符号为 S。光电导灵敏度 S_g 用光度量单位时, 其单位为西/流明 (S/lm) 或西/勒克斯 (S/lx)。若用辐射度量单位时, 其单位为西/微瓦 ($\text{S}/\mu\text{W}$) 或西/(微瓦·厘米 $^{-2}$ 即 ($\text{S}/(\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$)。光度量单位的基本概念参见附录 A。

基于光电导效应的典型器件是光敏电阻, 如 GeAs 等, 它们具有与人眼十分相近的光谱响应特征 (光学波段与可见光光谱知识见附录 B)。在可见光亮度测量中广泛采用光敏电阻, 例如照相机自动曝光系统中的亮度测量等。

2. P-N 结光伏效应及其元件

当光照射 P-N 结时, 只要入射光子能量大于材料禁带宽度, 就会在结区产生电子-空穴对。这些非平衡载流子在内建电场的作用下, 按一定方向运动, 在开路状态下形成电荷积累, 产生了一个与内建电场方向相反的光生电场, 即光生电压 U_{oc} , 这就是所谓的光生伏特效应。只要光照不停止, 这个光生电压将永远存在。光生电压 U_{oc} 的大小与 P-N 结的性质及光照度有关。

若 P-N 结两边外接一负载电阻 R_L , 如图 1-4a 所示, 此时在 P-N 结内出现两种方向相反的电流: 一种是光激发产生的电子-空穴对, 在内建电场作用下, 形成的光生电流 I_p , 它与光照有关, 其方向与 P-N 结反向饱和电流相同; 另一种是光生电流 I_p 流过负载电阻 R_L 产生电压降, 相当于在 P-N 结施加正向偏置电压, 从而产生的正向电流 I_D 。图 1-4b 为 P-N 结在光伏工作模式下的等效电路, 图中, I_p 为光生电流, I_D 为流过 P-N 结的正向电流, C_j 为结电容, R_s 表示串

联电阻（引线电阻、接触电阻等之和，其值一般很小，可忽略）， R_{sh} 为 P-N 结的漏电阻又称动态电阻或结电阻，它比 P-N 结的正向电阻大得多，故流过电流很小，往往可略去。这样，流过负载 R_L 的总电流 $I_L = I_D - I_p$ 。因为 I_D 与施加在 P-N 结两端的正向电压 $U = I_L (R_L + R_S)$ 有关，即

$$I_D = I_0 (e^{qU/(kT)} - 1) \quad (1-3)$$

式中， I_0 为反向饱和电流； T 为热力学温度； k 为玻耳兹曼常数； q 为电子电荷数。

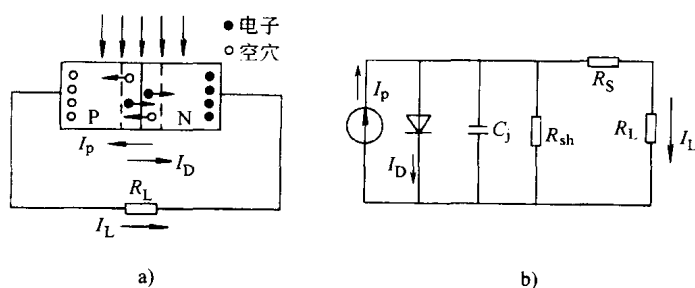


图 1-4 光照 P-N 结原理及其等效电路

a) 工作原理 b) 等效电路

负载电流 I_L 为

$$I_L = I_p - I_D = I_p - I_0 (e^{qU/(kT)} - 1) = S_E [E - I_0 (e^{qU/(kT)} - 1)] \quad (1-4)$$

式中， S_E 为光电灵敏度（也称光照灵敏度），并且

$$S_E = q\eta A / (h\nu)$$

其中， q 为电子电荷数； η 为材料的量子效率； A 为受光面积； $h\nu$ 为光子的能量。

结型光电器件用作探测器时，有两种工作模式，即工作在反偏置的光电导工作模式或零偏置的光伏工作模式。

当负载电阻 R_L 断开 ($I_L = 0$) 时，P-N 结两端的电压称为开路电压，用 U_{∞} 表示，则

$$U_{\infty} = \frac{kT}{q} \ln \left(1 + \frac{I_p}{I_0} \right) \approx \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{S_E E}{I_0} \right) \quad (1-5)$$

当负载电阻短路（即 $R_L = 0$ ）时，光生电压接近于零，流过器件的电流叫短路电流 I_{sc} ，其方向从 P-N 结内部看是从 N 区指向 P 区，这时光生载流子不再积累于 P-N 结两侧，所以 P-N 结又恢复到平衡状态，费米能级被拉平而势垒高度恢复到无光照时的水平，短路电流

$$I_{sc} = I_p = S_E E \quad (1-6)$$

这时 P-N 结光电器件的短路光电流 I_{sc} 与光照度 E 成正比。

如果给 P-N 结加上一个反向偏置电压 U_b ，外加电压所建的电场方向与 P-N 结内建电场方向相同，P-N 结的势垒高度增加，使光照产生的电子空穴对在强电场作用下更容易产生漂移运动，提高了器件的频率特性。

基于光伏效应的 P-N 结光电器件有三种：光敏二极管、光敏三极管和硅光电池。光敏二极管和硅光电池的伏安特性一致，只不过是工作于不同的偏置下；光电三极管则可以看作作用光电二极管注入基极电流的普通三极管，其伏安特性与普通三极管相同，只不过其曲线中的基极电流为光生电流。

P-N 结光电器件在不同照度下的伏安特性曲线如图 1-5a 所示。无光照时，伏安特性曲线与一般二极管的伏安特性曲线相同，受光照后，光生电子空穴对在电场作用下形成大于反向饱和导通电流 I_0 的光电流，曲线沿电流轴（图中 I 轴）向下平移，平移的幅度与光照度的变化成正比，即 $I_p = S_E E$ 。当 P-N 结上加有反偏压时，暗电流随反向偏压的增大有所增大，最后等于反向饱和电流 I_0 ，而光电流 I_p 几乎与反向电压的高低无关。图 1-5b 为光敏三极管的伏安特性曲线。图 1-5c 为硅光电池的伏安特性曲线

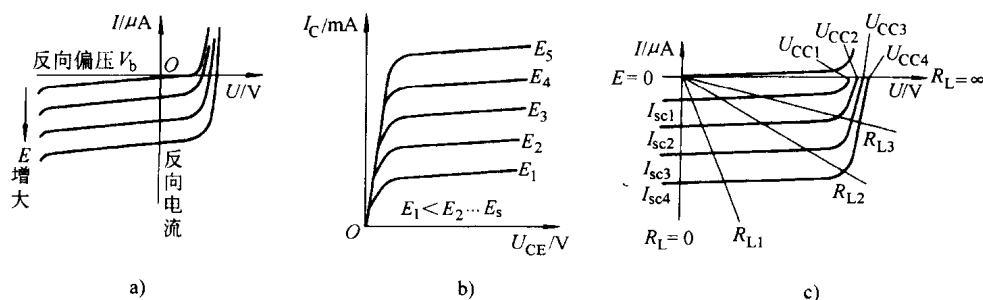


图 1-5 三种光电管的伏安特性

a) 负载 P-N 结伏安特性 b) 光敏三极管伏安特性 c) 硅光电池

3. 科顿 (Cotton) 效应

能使左、右旋圆偏振光传输速度相异的旋光性物质（或称光学活性物质，如芳香族化合物），在直线偏振光入射并透过时，会产生 α 角的偏转现象称为科顿效应。

由于直线偏振光是左、右旋圆偏振光的合成，因此当它入射于旋光性物质时，左、右旋偏振光因传播速度不同而使其折射率各不相同。又因圆偏振光每前进一个波长距离就有一次旋转，所以，左、右旋偏振光透过厚度为 d 的旋光性物质后，旋转的角度分别为 $\phi_l = 2\pi d / \lambda_l = 2\pi d n_l / \lambda$ ， $\phi_r = 2\pi d / \lambda_r = 2\pi d n_r / \lambda$ ，其中 λ 为入射光波长， n_l 、 n_r 分别为左、右旋偏振光在媒质中的折射率。透过的合成直线偏振光偏转的角度 α 则为：

$$\alpha = \frac{\phi_l - \phi_r}{2} = \frac{\pi d (n_l - n_r)}{\lambda} \quad (1-7)$$

二、磁效应

与磁有关的效应有：法拉第效应、克尔效应等磁光效应；霍耳（Hall）效应、磁阻效应等磁电效应；磁致伸缩、威德曼效应等压磁效应，以及约瑟夫效应、核磁共振等。

1. 法拉第效应

法拉第效应又称磁致旋光效应，如图 1-6 所示。当线偏振光通过处于磁场下的透明介质时，光线的偏振面（光矢量振动方向）将发生偏转，其偏转角 θ 与磁感应强度 B 以及介质的长度 L 成如下比例关系

$$\theta = KBL \quad (1-8)$$

式中， K 是物质的特性常数，即所谓维尔德（Verdet）常数，其数值与光波波长和温度有关。例如稀土玻璃的维尔德常数是 $0.13' \sim 0.27' / (\text{Gs} \cdot \text{cm})$ ($1\text{Gs} = 10^{-4}\text{T}$)，那么处于 0.1T (10^3Gs) 磁场下长 10cm 的稀土玻璃棒可使偏振光的光矢量偏转 $22^\circ \sim 45^\circ$ 。

2. 霍耳效应

霍耳效应实际上是基于洛伦兹力的效应，当电流通过半导体薄片时，垂直于电流方向的磁场 B 使电子向薄片的一侧偏转，从而使薄片的两侧产生电位差 U_H ，如图 1-7 所示。所产生的电位差称作霍耳电势，霍耳电势与激励电流 I_B 的关系为

$$U_H = K_H I_B B \quad (1-9)$$

式中， K_H 为霍耳常数。上述的薄片习惯上称作霍耳元件。

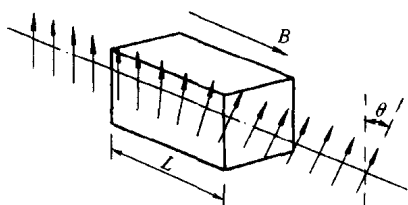


图 1-6 法拉第效应

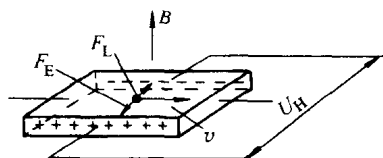


图 1-7 霍耳效应

由于材料及制作工艺的原因，霍耳元件存在温度效应和不等位电势的问题，因此，在实际应用中，还必须考虑霍耳元件的温度和不等位电势的补偿问题。

所谓不等位电势是指霍耳元件在激励电流的激励下，即使外界磁感应强度 B 为零，霍耳元件仍然有输出的电势。造成不等位电势的原因主要有：元件两侧焊接的电极不对称、元件厚度不均匀、材料的电阻率不均匀等。

三、力效应

与力有关的效应有：压电效应、磁致伸缩、电致伸缩、压阻效应等等。

1. 压电效应

当具有压电效应的材料受到沿一定方向的外力作用而变形时,在其某两个表面上将产生极性相反的电荷。常见的压电材料有石英晶体(又称水晶)、铌酸锂(LiNbO_3)、镓酸锂(LiGaO_3)、锗酸铋($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$)等单晶和经极化处理后的多晶体如钛酸钡、锆钛酸铅压电陶瓷(PZT),此外还有高分子压电薄膜如聚偏二氟乙烯(PVDF)、压电半导体(如 ZnO 、 CdS)等。

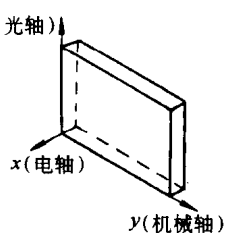


图 1-8 石英晶体切片

图 1-8 所示为石英晶体切片,图中 x 为晶体的电轴方向、 y 为机械轴方向、 z 为光轴方向。当沿电轴 x 方向施加作用力 F 时,在与电轴垂直的平面上产生电荷 Q ,并且

$$Q = d_{ij}F \quad (1-10)$$

式中, d 为压电系数 (C/N); i 表示晶体的极化方向,即产生电荷的表面垂直于 x 轴 (y 轴或 z 轴), i 取值 1、2、3; j 表示作用力的方向,即沿 x 轴、 y 轴、 z 轴单向力以及垂直于 x 轴、 y 轴、 z 轴的剪切力,相应的 j 取值 1、2、3、4、5、6; d_{ij} 为压电常数,用矩阵表达为

$$d = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \quad (1-11)$$

例如石英晶体的 X_0° 切片, $d_{11} = -d_{12} = 2.31 \times 10^{-12} \text{C/N}$, $d_{14} = -d_{25} = 0.727 \times 10^{-12} \text{C/N}$, $d_{26} = -2d_{11}$, 其余全为零。

2. 磁致伸缩效应

某些铁磁体及其合金以及某些铁氧体在磁场作用下将产生机械变形,其尺寸、大小会作相应的伸缩,这种现象称为磁致伸缩效应或称焦耳效应。

磁致伸缩效应与磁性物质内部的磁畴变化有关,无外磁场作用时,磁性物质体内的磁畴排列杂乱无章,磁化均衡;当受到外磁场作用时,体内各磁畴转动并使它们的磁化方向尽量与外磁场相一致,导致磁性体沿外磁场方向的长度发生约 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级的变化。从宏观的角度理解,磁性材料产生的长度变化可以看作磁性材料在外磁场作用下产生了自由应变 ϵ_0 。根据亚里夫 (A. Yariv) 的理

$$\epsilon_0 = CH^{1/2} \quad (1-12)$$

式中,常数 C 可以这样确定:磁性材料(如金属玻璃带)在饱和场强 $H_S = 2000\text{Oe}$ ($1\text{Oe} = 79.5775\text{A/m}$) 下,测得的饱和磁致伸缩系数 $\lambda_S = 30 \times 10^{-6}$,此时

$$C = \lambda_S H_S^{-1/2} = 2.1 \times 10^{-6} (1/\text{Oe}^{1/2}) \quad (1-13)$$

3. 饱和效应

在分子核磁共振吸收过程中，随入射电磁波振幅的增加，分子吸收电磁波能量逐渐减少的现象称为饱和效应。

饱和效应是由于分子的核自旋吸收能量较多时，来不及转移而产生的。核自旋因磁场作用而能级分离，当它吸收外加电磁波能量使其能级上升发生核磁共振时，其吸收的能量一方面通过各个核自旋的相互作用而扩散为均一能量状态，另一方面向晶格转移，使核自旋能连续吸收电磁波能量。但能量的转移是需要一定时间的，当外加电磁波的振幅较大时，核自旋吸收的能量也较多，但由于转移不及，而使继续吸收的能量减少，产生饱和效应。

四、化学效应

化学效应有：表面吸附效应、可顿效应、饱和效应、电泳效应、彼德效应等等。

1. 吸附效应

利用吸附效应可制成气敏传感器。

诸如 SnO_2 、 ZnO 等金属氧化物的半导体陶瓷材料接触气体时，在特定温度下，材料会吸附气体分子，其分子表面和气体分子之间发生电子交换，使得半导体材料的表面电位、功函数及电导率发生变化，这种现象称为吸附效应。

吸附效应产生的机理是复杂的，解释吸附效应机理的理论也较多，我们仅以吸附能级理论为例略作介绍。

SnO_2 、 ZnO 等材料吸附气体分子时，气体分子在材料表面自由扩散形成物理吸附，同时，被部分蒸发后的残留分子产生热分解而固定在吸附处形成化学吸附。这时，如果半导体的功函数小于吸附分子的电子亲和力，则吸附分子将从半导体中夺取电子而变成负离子吸附，并将空穴给予半导体，使得半导体的导带电子数目减少或空穴数目增多。具有这种吸附的气体称为氧化型气体或电子接收性气体，如 O_2 、 NO_x 。如果半导体的功函数大于吸附气体分子的离解能，则吸附分子将向半导体释放其电子而成为正离子吸附，进入到半导体内的电子，将束缚 N 型半导体的少数载流子，使其导带上参与导电的自由电子复合几率减小，即导电电子数目增加，半导体电阻值减小。对于 P 型半导体，进入的电子将与其空穴复合，即导带空穴数减少，因而半导体阻值增大。具有正离子吸附的气体称为还原型气体或电子供给性气体，如 CO 、 H_2 、碳氢化合物、酒精等。

综上所述，氧化型气体吸附到 N 型半导体上，或还原型气体吸附到 P 型半导体上，将使其载流子减小，电阻增大。反之，还原型气体吸附到 N 型半导体上，或氧化型气体吸附到 P 型半导体上，则其载流子增多，电阻减小。

2. 半导体表面场效应

利用电压所产生的电场控制半导体表面电流的效应称为半导体表面场效应。

它是绝缘栅场效应晶体管（如 MOS 场效应管）基本的工作原理。如果这种控制作用随环境气体、溶液离子浓度等化学物质而变化，则可构成气敏、离子敏、生物敏等半导体场效应化学传感器。

将绝缘栅场效应晶体管的金属栅用具有离子选择性的敏感膜如硅酸铝（ $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ）代替，则构成离子敏场效应晶体管（ISFET）。如果用过渡金属（如 Pd、Pt、Ni）做 MOSFET 的金属栅（厚度约 10nm），则构成气敏场效应晶体管。它们都是通过改变 MOSFET 的阈值电压而使其漏源电流变化，输出电信号的。

例如离子敏场效应晶体管就是在绝缘栅上制作一层敏感膜，用离子敏感膜代替普通 MOS 场效应晶体管的栅极，利用敏感膜与化学物质的电化作用产生的电位控制 MOSFET 的电流输出。当然，不同的敏感膜所检测的离子种类也不同，所以离子敏场效应晶体管具有离子选择性。

3. 中性盐效应

在化学反应系统中加入中性盐（其水溶液既非酸性又非碱性的盐类）后，系统的离子强度将发生变化，从而影响其反应速度，这种现象称为中性盐效应。

中性盐效应包括有一次和二次效应。一次中性盐效应是指反应系统离子强度变化改变反应离子的活化系数，从而影响反应速度的效应。二次中性盐效应则为活化系数的变化影响反应系统的离解平衡，进而改变反应离子的浓度，引起中性盐本身反应速度改变的效应。

4. 电泳效应

当水溶液（如食盐）电解时，溶液中的离子向电极方向移动（称为电泳），因溶液流动阻碍离子移动而减小其迁移率的现象称为电泳效应。

离子的迁移率与溶液中电解质浓度、种类、颗粒形状及大小有关。利用电泳效应可以分析蛋白质。

五、多普勒效应

具有一定频率 f_0 的信号源（如光源）与传感器之间以速度 v 相对运动，传感器所接受的信号频率 f 将与信号源的自身频率 f_0 不相同，并且，若两者相对运动，则 $f > f_0$ ，若两者相向运动，则 $f < f_0$ ，这种现象被称作多普勒效应。

以光波为例，设光波与传感器之间相对运动的方向在同一条直线上，光波源的频率为 f_0 ，当两者以速度 v 相对于光源运动，在光速为 c （ $c \gg v$ ）的情况下，传感器所接受到的光波信号频率为 f ，则

$$f = f_0 \left[1 - \left(\frac{\pm v}{c} \cos \theta \right) \right] \quad (1-14)$$

式中， $\pm$ 表示传感器与光源之间相对运动的方向，相向运动取“+”号，相反运动取“-”号； θ 为光源与传感器两者相对运动方向之间的夹角。

在有些特定的场合, 会存在所谓双重多普勒频移效应。如图 1-9 所示, 其中 S 为光源, P 为运动物体, Q 为传感器。若物体 P 的运动速度为 v , 运动方向与 PS 及 PQ 的夹角分别为 θ_1 、 θ_2 , 从光源 S 发出的频率为 f 的光经过运动物体 P 散射后, 再被传感器 Q 所接受。

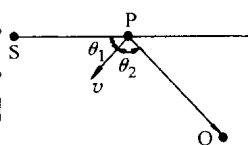


图 1-9 多普勒效应

物体 P 相对于光源 S 运动时, 在 P 点所观察到的光频率 f_1 为

$$f_1 = f_0 \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta_1 \right) \quad (1-15)$$

频率 f_1 的光通过物体 P 产生散射发出, 在 Q 处所观察到的光频率 f_2 由下式表示

$$f_2 = f_1 \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta_2 \right) \quad (1-16)$$

考虑到 $v \gg c$, 可以近似地把双重多普勒频移方程式表示为

$$f_2 = f_0 \left[1 - \frac{v}{c} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \right] \quad (1-17)$$

第二节 新型敏感材料

传感器的敏感材料是指能利用物理效应或化学、生物反应原理做成敏感元件的基体材料。按结晶状态可分为单晶、多晶、非晶和微晶等类; 按电子结构和化学键可分为金属、陶瓷和聚合物等; 按物理性质可分为超导体、导体、半导体、介电体、铁电体、压电体、铁磁体、铁弹体、磁弹体等; 按形态分有掺杂、微粉、薄膜、块状、纤维等; 按功能可分为力敏、压敏、光敏、色敏、声敏、磁敏、气敏、湿敏等。

由于近年来半导体材料、加工等技术的飞速发展, 半导体敏感材料的应用最为广泛, 纤维、高分子材料在传感器技术中的应用也越来越多。像光电耦合器件、光纤传感器、生物传感器、化学传感器等基本上都使用上述材料。本节将对半导体敏感材料、光导纤维、非晶态合金加以简单介绍。

一、半导体敏感材料

半导体材料可以将多种非电量转换为电量, 无论是光、声、热、磁、气、湿等都可以利用相应的半导体材料进行传感, 其中基于半导体材料硅的传感器无论是种类还是性能都是十分突出的, 这是由于硅的加工工艺十分成熟, 很容易将传感器微型化、集成化、多功能和智能化。

表 1-1 将半导体材料加以分类, 列出了各种材料的性能和传感对象, 供读者参考。

表 1-1 半导体敏感材料分类

材料类型	典型材料	可测物理量	备 注
单晶	Si、Ge	力、光、磁	
多晶	Si	光、压、热	可制成薄膜
非晶态	a-Si: H	热、应变、光	制作成薄膜
异质结外延	Si	加速度、压力、酶	在蓝宝石 ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) 上定向外延的单晶膜
化合物	GaAs、InSb、ZnS、CdS、 TeCdHg、PbS	力、磁、光、紫外、红外、 超声	

用半导体材料制作传感器是与半导体材料的加工技术分不开的,例如采用常压化学气相沉积工艺制作的多晶硅薄膜,可制成价格便宜、光电转换特性好的光敏传感器,以及压阻系数可达 40 的压敏传感器和塞贝尔系数达 480 的热敏传感器。利用分子束外延的方法可以制作高灵敏度、能检测极微量物理量的高灵敏度光、磁或超声等传感器。

传感器的敏感材料有多种,如物理材料(无机材料)、化学材料(有机材料)和生物材料等。性能优良的敏感材料是研制先进传感器的基础,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

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。单晶硅是大部分固态传感器的敏感材料。

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、压阻效应等等。单晶硅具有很好的热导性,而热膨胀系数却不大。

作为半导体材料,单晶硅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

$$\pi_{ij} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{11} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \quad (1-18)$$

式中, π_{11} 为纵向压阻系数; π_{12} 为横向压阻系数; π_{44} 为剪切压阻系数。

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。硅传感器与信