

敏感器件及其应用

苏步霄 主编
周士钟

MINGANQIJIAN
JI QI YINGYONG

中国铁道出版社

73.738
336

敏感器件及其应用

苏步霄 主编
周士钟

中国铁道出版社

1987年·北京

内 容 简 介

本书共分八章，主要介绍几种常用的敏感器件，其中包括光敏器件、压敏电阻器、磁敏器件、热敏电阻器、湿敏电阻器、气敏电阻器及力敏器件等。对这些敏感器件的原理、结构、类型和主要技术特性参数做了较详细的叙述，同时还对它们的应用方法做了典型介绍。

本书可供从事有关专业的科研、设计、应用的工程技术人员及维修工作的工人阅读，也可供院校师生参考。

敏 感 器 件 及 其 应 用

苏步霄 主编
周士钟

中国铁道出版社出版

责任编辑 颜绍蓉 封面设计 翟 达

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/32 印张：10.625 字数：238 千

1984年8月第1版 第1次印刷

印数：0001—5,000册 定价：1.95元

前 言

敏感器(元)件是一种新型器件，在国内外已广泛应用到各个领域。随着科学技术的发展，在遥测、遥感及夜视技术等方面，更需要努力探索研制新型敏感器件。半导体敏感器件及传感器是提高经济效益、科学技术和生产技术水平的重要手段。科学技术界认为今后的发展第一位是敏感器件和传感器。我国在敏感器件的研制方面，近年来已取得了可喜的成果，并且在能源利用、海洋开发、环境保护、交通监控、气象预测、自动控制和家用电器，以及尖端科学技术领域方面都得到了推广使用。

本书主要介绍七种常用的敏感器件，其中包括光敏、压敏、磁敏、热敏、湿敏、气敏及力敏器件等。对这几种器件的原理、结构和应用的介绍，主要侧重于国内生产的产品，对国外发展概况只作了简单介绍。

本书第一章、第四章、第六章、第七章由苏步霄编写，第二章、第三章由周士钟编写，第五章由胡显国编写，第八章由于振民编写，在编写过程中王殿启同志提供了一些资料，特表感谢。由于水平有限，不妥之处，请读者批评指正。

1985年10月

目 录

第一章 概述	1
第一节 什么是敏感器件	1
第二节 种类及用途	3
第二章 光敏器件	6
第一节 半导体光电效应	7
第二节 半导体光谱特性	10
第三节 光敏电阻器	13
第四节 硅光敏晶体管	21
第五节 光伏型器件	36
第六节 半导体发光二极管	43
第七节 红外光敏器件 (红外探测器)	67
第八节 光敏器件的应用	81
第三章 压敏电阻器	104
第一节 压敏电阻器的主要特性	104
第二节 硅压敏电阻器	113
第三节 碳化硅压敏电阻器	114
第四节 氧化锌压敏电阻器	118
第五节 压敏电阻器的应用	137
第四章 磁敏器件	157
第一节 固体中电流的磁效应	158
第二节 霍尔器件	160
第三节 半导体磁敏电阻器	166
第四节 磁敏二极管	174
第五节 方向性磁敏器件	178

第六节	薄膜磁敏电阻器	180
第七节	磁敏器件的应用	187
第五章	热敏电阻器	196
第一节	基本特性、分类方法及型号命名	196
第二节	特性参数及测试方法	208
第三节	负温度系数热敏电阻器	219
第四节	正温度系数热敏电阻器	233
第五节	热敏电阻器的应用	242
第六章	湿敏电阻器	253
第一节	湿敏电阻器的工作原理	253
第二节	氯化锂、碳湿敏电阻器	255
第三节	陶瓷湿敏电阻器	257
第四节	湿敏电阻器的应用	265
第七章	气敏电阻器	268
第一节	气敏电阻器分类	268
第二节	二氧化锡烧结型气敏电阻器	270
第三节	氧化锌气敏电阻器	277
第四节	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 烧结型气敏电阻器	279
第五节	气敏电阻器的应用	282
第八章	力敏器件	286
第一节	压阻效应	287
第二节	半导体应变计	290
第三节	压阻式力学量传感器	301
第四节	压阻式力学量传感器的应用	327
参考文献		332

第一章 概 述

第一节 什么是敏感器件

人们对周围环境的感受，如气候、明暗、声音、气味和味道等，可以很快的辨别出来，这是因为在人体内有各种相应的感觉器官。但是，人类不可能对所有的自然现象都很敏感；相反，某些动物却在这方面具有奇特的本领，往往为人类所不及，例如，猫能在夜间捕捉老鼠，蝙蝠虽然视力很差，却能在夜晚自由飞行，并能灵活的躲避障碍物和捕食小虫，诸如此类的现象是很多的。随着科学技术的发展人们通过对动物的一些功能的研究，对自然界的认识愈加深入，并模仿生物的本领为人类服务，于是出现了仿生学。

仿生学主要研究生物的各种优异特征，如机体结构的精密、能量的转换、信息的传递、准确而协调的调节功能以及产生的原理。随着电子技术的发展，在此基础上，又采用模拟的方法研究制造出许多小巧可靠的敏感器件，结构严整的线路和高效率低消耗的有关器械，以及对外界信息锐敏的装置等。例如，在漆黑的夜晚，响尾蛇能迅速而准确的捕食小动物，是因为在它的头部有一对探测红外线的热敏器官，可以分辨出千分之一度的温度变化并能精确的定向。人类借鉴响尾蛇的这一特殊功能研制出了红外探测器及跟踪导弹。研究各种动物具有的独特本领，对人类探索和设计新的换能器件有很大的启示。仿生学为电子学的发展又提供了宝贵的资料和丰富的设计思想。

近年来，人们经过长期实践发现了固体，特别是半导体

8816089

对周围环境的物理、化学或生物的作用具有很敏感的特性。如某些半导体具有一定的电阻，而它的阻值容易受电压、光能、温度、磁场、湿度、气体、压力、电流、电场、以及声能、露点、酸度（pH值）或细菌等的作用而变化。根据半导体电参数受环境条件影响而改变的特性，研制出了相应的器件，我们称作敏感器件，也叫传感器或换能器。由于敏感器件的出现，因此遥测、遥感以及夜视技术等得到迅速的发展。

半导体敏感器件在国外已按系列进行生产，其应用相当广泛。由于敏感器件不同于一般元件，它在工作原理及特性方面比一般元件复杂，具有特殊的性质。如果不能很好的理解它的工作原理和掌握它的工作特性，就不能有效的利用它，以致不能充分发挥它的作用。我国虽然能够生产多种敏感器件，但对这些器件的工作原理及特性真正了解还不够，这就使敏感器件的应用受到了限制。

半导体敏感器件具有很高的转换效率，体积小而轻和结构简单等特点。因此，使许多复杂的仪器和庞大的设备的线路设计大大简化，提高了整机可靠性，显示了敏感器件的优越性和生命力。特别是有些敏感器件在军事上和现代科学技术方面占有极其重要的地位，例如红外探测器，是导弹的制导和引爆系统的核心，也是现代遥感技术和夜视技术的核心。因此，敏感器件的发展在各国引起了高度的重视。除已经普及应用的七类敏感器件外，许多国家还研究出流敏电阻器，场敏电阻器及力敏导电橡胶等各种新的敏感器件，目前研究工作还在继续不断的深入和发展。

敏感器件的基本材料主要是半导体（包括金属氧化物半导体），另外还使用一定结构的金属、合金及陶瓷等材料。制造敏感器件主要采用半导体工艺、薄膜蒸发工艺和陶瓷工

艺。随着半导体技术的发展，特别是半导体集成电路的出现，使部分敏感器件有可能采用集成技术直接制作在电路里，组成一个完整的器件，使应用更为方便。

总之，敏感器件具有广阔的发展前途，无论从人们日常生活到国民经济的各个领域，还是现代科学技术的发展都离不开它。因此，只要不断的研究它，掌握它的工作原理及特性，就能有效的利用它。

第二节 种类及用途

就目前常用的敏感器件，大致可以分为以下几类：

(1) 压敏电阻器，指电阻对电压变化的反应极为敏感的器件，即在给定某一电压以下时，通过电阻器的电流甚微，当超过该电压的界限时，电阻器的阻值显著的减小，通过电阻器的电流则急剧增加，因此对器件两端电压的增加起到了抑制作用，这与齐纳二极管的作用相同。已经得到广泛应用的压敏电阻器有：硅压敏电阻器、碳化硅压敏电阻器、氧化锌压敏电阻器及齐纳二极管等。

(2) 磁敏器件，这类器件的电参数都随外加磁场强度的改变而变化，也称磁电变换元件。磁敏器件包括霍尔器件、磁敏电阻器、薄膜磁敏电阻器、磁敏二极管、磁敏三极管、方向性磁敏器件和磁电抗器件等多种磁电变换元件。

(3) 光敏器件，也叫光敏电阻器或光电转换元件。它对于波长从紫外线到红外线范围的光能都非常敏感。对于不同波段的光，目前已研制出了相应的接收元件。例如，紫外光敏电阻器、可见光敏电阻器和红外光敏电阻器（红外探测器）等。就其工作原理来看，可分为光导型器件和光伏型器件。它们分别是按照光电导效应和光生伏特效应原理制造出来的。常用的光敏器件有硫化镉（CdS）光敏电阻器、硒化

镉(CdSe)光敏电阻器、硫化铅光敏电阻器、铟化铟(InSb)光敏电阻器、碲镉汞(Hg·Cd·Te)元件、硅光敏二极管、硒光电池及硅光电池等。

(4) 热敏电阻器, 这种器件的电阻值受环境温度的影响, 或在一定范围对热辐射很敏感。就其温度特性而言, 有正温度系数和负温度系数热敏电阻器。从应用性能来说, 有关键型、补偿型、高温热敏电阻器和低温热敏电阻器, 以及特殊用途的热敏电阻器等。

(5) 湿敏电阻器, 指器件在一定的湿度范围内, 它的电阻值对温度的变化有显著的依赖性。常用的湿敏电阻器有碳湿敏、氯化锂湿敏、金属氧化物湿敏和半导体湿敏电阻器等。

(6) 气敏电阻器, 它对不同气体及含量不同很敏感, 通常检测对象是氢气、一氧化碳和碳氢化合物等还原性气体。应用较为普遍的是金属氧化物气敏电阻器。

(7) 力敏器件, 又叫压力传感器, 是一种对于压力变化反应敏感的器件。已经得到应用的主要是利用单晶硅制作的力敏器件, 如硅力敏电阻器和力敏应变片等, 以及采用其它半导体材料制作的力敏器件。

半导体敏感器件的基本用途是作为相应物理量的检测、转换及自动控制。按照敏感器件各自的不同特点, 主要应用在电力系统和铁路自动闭塞系统的防雷保护, 各种半导体器件及电子设备的瞬态过电压保护, 半导体电路的温度补偿, 波形变换及非线性补偿, 各种非电量的转换及测量, 自动化技术, 夜视技术, 无接点开关, 无接点电位器, 稳压、调制、放大器及绝缘耦合器等方面。下面把它们各自的具体用途分别列于表 1—1 中。

目前, 对于各种半导体敏感器件的研究工作仍在不断深

入和发展之中。有些器件已成为某些尖端科学技术的核心部分。人造卫星成功地为遥感技术提供了方便，通过人造卫星传来的信息，为人们展示了地面上的复杂情况，如地形、山脉河流、植物情况、矿藏分布、森林火灾等各种真实的情报资料，而这些情报资料的获得要靠能够工作在整个光谱范围的探测器来完成，因此各种高灵敏度的光和热探测器就成为遥感技术的核心器件。

敏 感 器 件 用 途 表 1—1

类 别	测 量 技 术	控 制 技 术	计 算 技 术	其 它
压电阻敏器		过电压吸收、电路保护、自动控制、非线性补偿、温度补偿、稳压、防雷	函数变换、平方器、立方器、开方器	
磁敏器件	磁场及方向的测定、探伤、位移测量、角度测量、电流及功率测量、转速测量、重量测量	无触点开关、非接触电位器、调制器、解调器、倍频器、直流无刷马达、可控温度补偿	函数发生器、乘除法器、平方器、立方器、开方器	绝缘耦合器、放大器
光敏器件	非接触式测温、气体分析、火源探测报警、列车热轴探测、癌症诊断、防范报警	自动控制、导弹制导、无触点开关、非接触电位器		激光通讯、遥感技术、夜视技术、摄像技术、绝缘耦合器
热电阻敏器	温度测量、热辐射测温、微波功率测量、流量及风速测量	自动控制及保护、限流、温度补偿、无触点开关、变阻器		遥感及摄像
湿电阻敏器	湿度测量、湿度计、粮食水分测量	湿度控制与调节、食品加工、烟草烘烤		植物培育研究
气电阻敏器	气体检测、气体分析、气体检漏	气体监控及报警、瓦斯及火灾报警		
力器敏件	液压计、应变测量、转矩、加速度、张力测量	压力控制与调节		微音器、医用诊断器械

第二章 光 敏 器 件

光敏器件又叫光电传感器，它与测量其他物理量的传感器相比较，有较长的历史。光敏器件的种类很多，从紫外线到远红外线各个波段都有相应的元件。光电传感器不仅可以测量光信号，而且还可以进行以光作为媒质的非接触式和非破坏性的物理量的测量，并能实现光电自动控制。近年来随着尖端技术、光通信、生产自动化和微处理机的发展，光电传感器在各个领域中得到了广泛的应用。

近年来由于电子技术的发展，信息技术将普遍应用，光电传感器是信息输入环节的重要元件。在这种情况下，光电传感器的发展，已经不是单纯的作为光电转换元件，而是作为具有多功能集成化器件，并正在迅速的发展。目前光电传感器大致分为分立传感器、集成传感器和红外传感器等。

分立光电传感器向高速宽波长范围发展，由于光伏型元件响应速度快，信噪比 S/N 优越，因此它成为主要的高速光电传感器。

集成化光电传感器随着半导体集成电路技术的发展，在国外，固体图像传感器的研究引起了广泛的注意，特别是线阵图像传感器的发展是惊人的，而且固体图像传感器向面阵发展已取代摄相管。

固体图像传感器从扫描方式可分为使用MOS移位寄存器的MOS型传感器和以CCD为代表的使用电荷耦合原理的传感器。在线阵传感器中CCD图像传感器正在发展。最能引起人们兴趣的面阵图像传感器以固体彩色摄相装置为目的也有所进展。

红外传感器的发展是很快，已经使用 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 用平面技术制作了线阵和面阵光二极管阵列，另外，制造的 HgCdTeCCD 的传输效率达 99.95%，与使用硅的 CCD 达到了同样的特性。使用 InSb 的 CCD 图传感器也收到了良好的效果。

第一节 半导体光电效应

有些物质受到光照射时会发生某些电学特性的变化，这一现象称为光电效应。光电效应主要可以分为光电导效应、光生伏特效应和光电子发射效应等三种形式。前两种形式的效应在物体内部产生，称为内光电效应，它一般发生在半导体中。光电子发射效应在物体表面产生，称为外光电效应，它多发生在金属中。这里只讨论半导体的内光电效应及其利用这一原理制造的器件。

一、半导体的光电导效应

光和一切形式的电磁辐射一样，都具有波动性质，它们是以速度为 $3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$ 传播的电磁波。光速 C 通常以频率 ν 和波长 λ 之积表示，即

$$\nu \lambda = C \quad (2-1)$$

光的波长常以单位埃 ($\text{\AA}$) 表示， $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$ ，或用纳诺 (n) 表示， $1 \text{ n} = 10^{-7} \text{ cm}$ 。

按照普朗克的量子理论，光表现出微粒或量子性质，这种量子称为光子。

光子可看作是很小的能量“细胞”。单个光子的能量 w 由下式表示

$$w = h \nu \quad (2-2)$$

式中 h —— 普朗克常数；

ν —— 光的频率。

普朗克常数 h 为 $6.56 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 或 $4.13 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}$ 。因为 h 很小, 所以单个光子的能量是相当小的。从式 (2-2) 中可以看出, 光子的能量随光的频率增高而增强。

功率为 1 W (或 $6 \times 10^{18} \text{eV/s}$) 的光, 人眼对最灵敏的波长为 $5070 \text{\AA}$, 大约能探测一百个光子, 而产生视觉的实际光子数只有十个左右, 约相当于 $4 \times 10^{-18} \text{J}$ 的能量。

在一般情况下, 半导体表面受到光照射时使它的载流子浓度增加而电导增大, 这种现象称为半导体的光电导效应。半导体光电导效应的实质是由于辐射的光子和半导体中的电子相遇时, 其能量传递给电子, 使电子获得了能量。当半导体中电子获得的能量大于它的禁带宽度时, 电子就可以跃迁到新的能级, 也就是从价带跃迁到导带中去, 这样就造成了半导体中载流子浓度的增加, 使电导率增大。

在本征半导体中, 这种电子的跃迁与吸收光子的能量有关。一定波长(能量)的光子可以使电子由价带越过禁带跃迁到导带, 产生自由电子-空穴对, 这样造成的光电导增加叫本征光电导效应。本征光电导效应不仅与光的强度有关, 而且还与光的波长有关。

在掺杂型半导体中, 杂质原子的能级离导带或价带边缘较近, 因此虽然入射光子的能量较小(波长较长)也能激发杂质原子, 使电子产生从禁带中的杂质能级向导带(N型半导体)或价带(P型半导体)的能级跃迁。这样引起光电导的增加叫非本征光电导效应或杂质光电导效应。

在半导体中, 本征光电导效应和非本征光电导效应可以同时存在。非本征光电导效应主要用于超过 $5 \mu\text{m}$ 的波段。本征光电导效应发生在杂质含量极少的本征半导体中, 主要用于检测可见光和近红外辐射。

半导体材料的禁带宽度愈宽, 最大光谱响应波长愈短,

因此根据用途可以灵活选择禁带宽度不同的半导体材料以适合制造各种不同波长的器件的需要。

并不是所有的半导体材料都具有光电导特性。在有些半导体中，由于被光激发的载流子容易被禁带中的能级俘获或复合，使载流子的寿命 τ 非常短而测不到光电效应。要增大光电效应，必须使载流子寿命比它在半导体的全长上移动的时间长得多。要增大 τ 可尽量选用复合中心的俘获截面和复合中心浓度都小的半导体。实用上多选用暗电阻大即暗电流小的半导体。为了获得长寿命的电子，以便得到高的灵敏度，往往要在光电导材料中掺入一些杂质以增加对空穴的俘获，把这个作用称为“敏化”。但敏化又使半导体的暗电阻减小，为了保持大的暗电阻，还必须加入一些补偿杂质。

半导体不是对所有的光都具有光电导特性。因为光子给予每个电子的能量的多少实际上决定于光波的波长或频率，而与光束的亮度无关。增加光束亮度实际上只增加了吸收光能的电子数目而已，每个电子所获得的能量没有改变。因此，即使光的强度很大，如果光波的频率太低时，光子具有的能量不足以使电子产生跃迁，所以这种光将对半导体不起任何作用，半导体也就不显示光电导特性。这说明了半导体的光电效应对于光的波长具有选择性，根据这种原理可以制造出工作于不同波段的光电元件。

二、半导体的光生伏特效应

如果以N型半导体为基片，在它的上面形成一层极薄的P型层。当光穿过P型层照射在半导体PN结的阻挡层上时，由于半导体原子中的电子接收了光子的能量被激发而与其他原子产生碰撞，使电子离开原来的位置变为自由电子，而原来位置则成了空穴，这样就形成了电子-空穴对。从而光能便以产生电子-空穴对的形式转换成了电能。

在半导体中，光生电子-空穴对在运动过程中一部分又被重新复合而损失掉，其余部分到达阻挡层的PN结附近时，由于受PN结内电场的作用，使光生空穴向P型区运动，这样P型区便显示正电性；光生电子向N型区运动，使N型区带负电性，这就在P型区和N型区之间的薄层两侧便产生了光生电动势。若给半导体阻挡层两端接一负载构成回路，则在回路中就有电流通过。其电压和电流的大小取决于光照射强度和PN结的特性。把半导体的这种光电效应称为阻挡层光电效应或光生伏特效应。

利用半导体的光伏效应原理不仅可以制造作为探测光信号的光电转换元件，更重要的是还可以制造作为能源(电源)应用的光电池——太阳能电池。这种电池是既经济又简单的永久性电源，它得到广泛的应用，引起人们普遍的重视。

第二节 半导体光谱特性

半导体材料是很多的，但可以用来制造光敏器件的却有限。某些半导体并不具有光电导特性和光伏特性，这是因为在这些半导体中被光激发的载流子其寿命是非常短的，因此得不到光电效应。目前实用的可以制造光敏器件的半导体及其化合物还比较少，而且每一种半导体在光谱中都有各自固定的响应波长，就是说它们对光波长的响应有选择性。这样，各种半导体在光谱中形成了不同的响应特性。

一、光 谱

自然界的一切物体在环境温度高于0 K以上时都会产生光波辐射。光波实际上就是波长从X射线到无线电波的电磁波，按波长分为X射线、紫外线、可见光、红外线和无线电波等几个波段，其波长范围如图2—1(a)所示，可见光的光谱区如图2—1(b)所示。可见光波长范围由 $3.8 \times$

10^{-5}cm (紫限) 到 $7.6 \times 10^{-5}\text{cm}$ (红限) 即 $3800 \sim 7600 \text{\AA}$ 。

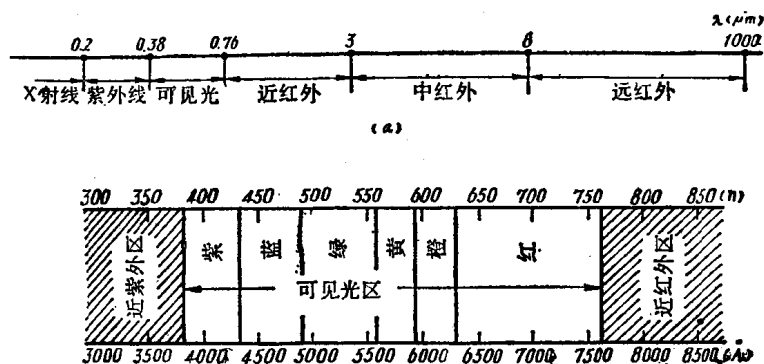


图 2-1 光谱范围

知道各种光的波长范围，就可以选用不同的半导体材料制造对于某种特定的光波长灵敏的传感器，利用它可以对自然界中各种物质的光辐射现象进行研究和利用。

二、半导体的光谱特性

由于各种半导体材料的禁带宽度不一样，所以用这些半导体材料制造的光传感器对于不同波长的光具有不同的灵敏度。禁带比较宽的半导体对波长较短的光灵敏，而禁带比较窄的半导体对波长较长的光灵敏。采用本征半导体时，当半导体禁带宽度能量为 E_g (单位为 eV) 时，其探测波长为 λ_{co} (单位为 μm) 可用下式表示

$$\lambda_{co} = 1.24 / E_g \quad (2-3)$$

λ_{co} 也称截止波长，它的定义为当半导体对光波响应峰值降至二分之一时所对应的波长。不同半导体制作的光传感器的光谱响应特性，如图 2-2 所示。图中表示出几种光导型和光伏型材料、光电子发射元件 (具有外光电效应的金属材料) 的光谱响应范围。