

高等学校教学用书

# 传感器原理与应用

方培生 编著

第 1 版

电子工业出版社

## 内 容 提 要

本书详细阐述了热、力、声、光、磁、半导体等各种传感器的基本理论、工作原理及制作技术。介绍了各种传感器在工农业生产、科学研究、国防工业、空间技术、医疗卫生、生物工程以及日常生活中的应用。全书共十四章内容丰富，既有理论分析、又有应用实例。

本书为高等院校理工科传感器电子学专业编写的教材，也可供从事传感器制作、研究的科技人员以及传感器应用者参考。

### 传感器原理与应用

方培生 编著

责任编辑 陈晓莉

电子工业出版社出版(北京海淀区万寿路)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

山东电子工业印刷厂印刷

(淄博市周村)

\*

开本: 850×1168毫米1/32 印张: 8.25 字数: 212千字

1991年3月第一版 1991年3月第一次印刷

印数: 1—4000册 定价: 2.70元

ISBN 7-5053-1197-2/TN·354

# 目 录

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| <b>第一章 传感器的基础</b> .....  | ( 1 )   |
| 1.1 测量和控制系统.....         | ( 1 )   |
| 1.2 传感器的定义及分类.....       | ( 2 )   |
| 1.3 传感器的转换原理.....        | ( 5 )   |
| 1.4 主要传感器.....           | ( 8 )   |
| <b>第二章 温度传感器</b> .....   | ( 14 )  |
| 2.1 温度传感器的基本原理.....      | ( 14 )  |
| 2.2 温度传感器.....           | ( 20 )  |
| 2.3 温度传感器的应用.....        | ( 30 )  |
| <b>第三章 磁传感器</b> .....    | ( 46 )  |
| 3.1 磁传感器的基本原理.....       | ( 46 )  |
| 3.2 磁传感器.....            | ( 55 )  |
| 3.3 磁传感器的应用.....         | ( 70 )  |
| <b>第四章 光电传感器</b> .....   | ( 78 )  |
| 4.1 光电传感器的基础理论.....      | ( 78 )  |
| 4.2 光电传感器.....           | ( 84 )  |
| 4.3 光电传感器的应用.....        | ( 101 ) |
| <b>第五章 压力传感器</b> .....   | ( 111 ) |
| 5.1 压力传感器的物理基础.....      | ( 111 ) |
| 5.2 压力传感器.....           | ( 116 ) |
| 5.3 压力传感器的应用.....        | ( 126 ) |
| <b>第六章 表面声波传感器</b> ..... | ( 132 ) |
| 6.1 SAW传感器的理论基础.....     | ( 132 ) |
| 6.2 钽酸锂表面波温度传感器.....     | ( 135 ) |

|             |               |              |
|-------------|---------------|--------------|
| 6.3         | SAW氢气传感器      | (136)        |
| 6.4         | SAW电力传感器      | (138)        |
| 6.5         | SAW压力传感器      | (139)        |
| 6.6         | SAW加速度传感器     | (140)        |
| <b>第七章</b>  | <b>光纤传感器</b>  | <b>(141)</b> |
| 7.1         | 光纤传感器工作原理     | (141)        |
| 7.2         | 传感型光纤传感器      | (144)        |
| 7.3         | 传光型光纤传感器      | (149)        |
| 7.4         | 光纤传感器的应用      | (150)        |
| <b>第八章</b>  | <b>半导体致冷器</b> | <b>(153)</b> |
| 8.1         | 半导体致冷器的基本理论   | (153)        |
| 8.2         | 半导体致冷器的工作原理   | (155)        |
| 8.3         | 半导体致冷器的设计与制造  | (159)        |
| 8.4         | 半导体致冷器的应用     | (165)        |
| <b>第九章</b>  | <b>压电传感器</b>  | <b>(168)</b> |
| 9.1         | 压电效应          | (168)        |
| 9.2         | 压电传感器与应用      | (176)        |
| <b>第十章</b>  | <b>流量传感器</b>  | <b>(182)</b> |
| 10.1        | 流量传感器的基本原理    | (182)        |
| 10.2        | 流量传感器         | (185)        |
| 10.3        | 集成流量传感器       | (187)        |
| <b>第十一章</b> | <b>气体传感器</b>  | <b>(190)</b> |
| 11.1        | 气体传感器的基本原理    | (190)        |
| 11.2        | 气体传感器         | (195)        |
| 11.3        | 气体传感器的应用      | (208)        |
| <b>第十二章</b> | <b>湿度传感器</b>  | <b>(214)</b> |
| 12.1        | 湿度传感器的基本概念    | (214)        |
| 12.2        | 湿度传感器         | (219)        |
| 12.3        | 湿度传感器的应用      | (228)        |

|                   |                           |         |
|-------------------|---------------------------|---------|
| <b>第十三章</b>       | <b>离子传感器</b> .....        | ( 232 ) |
| 13.1              | MOSFET的工作原理.....          | ( 232 ) |
| 13.2              | 离子传感器的工作原理.....           | ( 234 ) |
| 13.3              | 离子传感器.....                | ( 236 ) |
| 13.4              | 集成离子传感器.....              | ( 241 ) |
| <b>第十四章</b>       | <b>传感器在家用电器中的应用</b> ..... | ( 242 ) |
| 14.1              | 彩电消磁电阻.....               | ( 242 ) |
| 14.2              | 电冰箱无接点起动机.....            | ( 243 ) |
| 14.3              | PTC自动恒温电烙铁.....           | ( 244 ) |
| 14.4              | 风干器.....                  | ( 245 ) |
| 14.5              | 自动炒饭锅.....                | ( 245 ) |
| 14.6              | 家用煤气报警器.....              | ( 246 ) |
| 14.7              | 家庭火灾报警器.....              | ( 246 ) |
| 14.8              | 照像机.....                  | ( 247 ) |
| 14.9              | 温风式暖炉.....                | ( 249 ) |
| 14.10             | 吸尘器.....                  | ( 249 ) |
| <b>参考文献</b> ..... |                           | ( 251 ) |

# 第一章 传感器的基础

## 1.1 测量和控制系统

传感器是现代测控系统中不可缺少的元件。它连接被测对象和测试系统，提供系统进行处理和决策所必需的原始信息，而系统精确度关键在于传感器。

测控系统包括测量系统与控制系统。在测量系统中测定“量”或“性质”，并将测定的值显示出来。在控制系统中，将测量得到的量或性质的信息用于控制，以达到预期目的。

最简单的测量系统是直接显示所测得值的测量装置。基本测量系统包括四个方面，如图1.1所示。

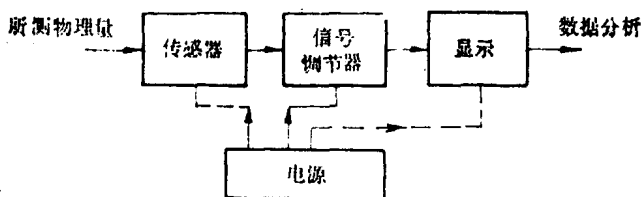


图1.1 测量系统

传感器是将所测物理量转换成可用的电学量。信号调节器将传感器输出的电学量转换为显示装置输入所需要的电学量。显示或读出装置，将显示关于被测对象的必要的信息。电源是提供传感器及信号调节器所需要的电源。

多数测量系统需要显示两个或更多个传感器的输出信号，采

用多路数据测量系统，如图 1.2 所示，可用旋转开关进行选择。

对于远距离测量系统，常用的遥测系统，如图 1.3 所示。将敏感器件的输出加到转换开关(多路转换器)，转换开关将它们组合成一个复合信号。将此信号送到高频发射机，对载波振荡器输

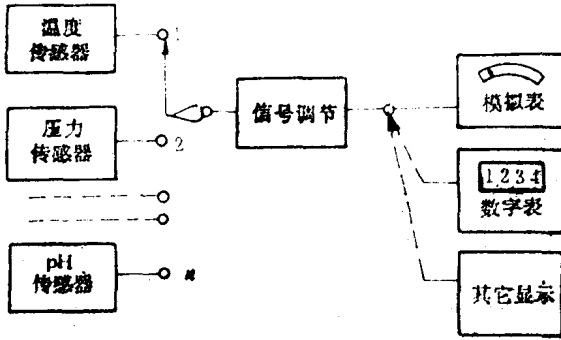


图1.2 多路数据测量系统

出的信号加以调制，被调制的载波经放大送到天线，接收天线将收到的信号经放大送到解调器。解调器从高频载波中分离出调制信号并恢复成复合信号。反转换器用来抽取信号，抽取信号与相应的敏感器件的输出信号相符，从而将每个测量值显示出来并逐个加以计算。

## 1.2 传感器的定义及分类

凡接受外界刺激并产生输出信号定义为传感器。传感器就是用来对所测的量产生响应并提供可用的电信号的器件，即把输入信号变成不同形式输出信号的装置，如麦克风、拾音器、扩音机、气压计、光电管、门铃等。传感器的作用是接受外界信息，并将其变为信号。按能量变换的功能可分为两大类：物理传感器（包括温度传感器、压力传感器、光电传感器、磁传感器、压电传感

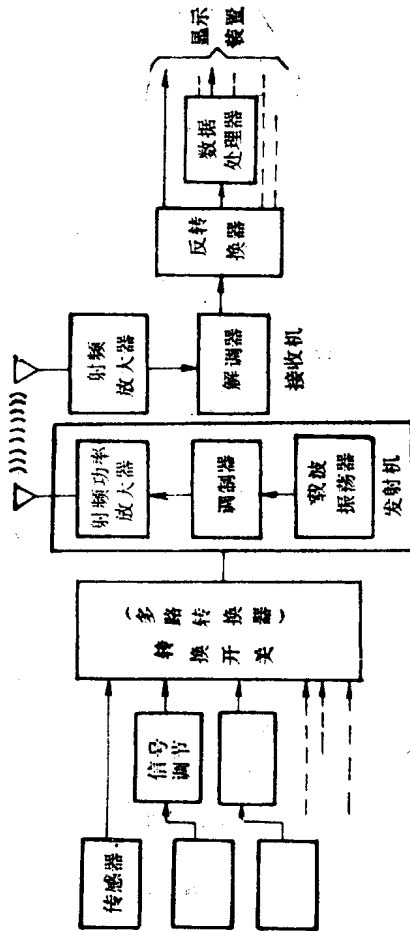


图1.3 遥测系统



器、光纤传感器、流量传感器、声表面波传感器、半导体致冷器)和化学传感器(包括气体传感器、湿度传感器、离子传感器)。

根据传感器的工作原理不同,一般又可以分为物性型传感器和结构型传感器两种。物性型传感器则是利用一些材料的物理特性的变化来实现检测的。物性型传感器又称为固体传感器。它具有体积小、反应速度快、寿命长等优点,目前利用半导体集成电路工艺技术,将敏感器件与外围电路集成在一起,构成所谓集成传感器,因此它是目前传感器研究开发最有前途的一种。结构型传感器是利用弹性管、双金属片、电感、电容器等结构元件进行测量的,如气压表头就是一种结构型传感器。

另外,根据传感器对信号的检测转换过程把传感器分为直接转换型和间接转换型两类。例如光敏三极管,cds光电导元件等属于直接转换型传感器。当cds受光照射时,两端之间的电阻发生变化,它直接把光转换成电信号输出。间接转换型传感器,是先将外界现象转换成别的现象,然后再转换成电信号,如图1.4所示。

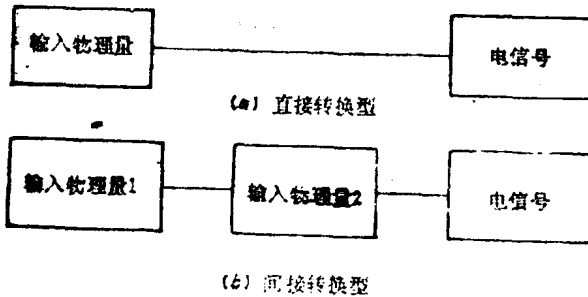


图1.4 传感器的两种类型

应变仪的负荷传感器是通过负荷→位移→电变化而转变成电信号,这种传感器称为间接转换型传感器。

## 1.3 传感器的转换原理

如前所述,传感器的作用是接受外界信息,并将其变成信号输出。因此,如果某种材料(半导体材料)受外界加热,致使这种材料性质发生变化(电阻、电导发生变化),通过检测电阻变化量,就可以知道对应的温度。也就是说,这种材料具有将热转换成电的功能,人们就利用这种热-电转换原理,制造热敏电阻传感器等。表1.1列出了比较常见几种现象之间相互转换原理,以供我们参考。并举例说明以上相互转换原理。

### (一) 光-电转换

入射光照射到 $pn$ 结上时,使 $pn$ 结的正向压降发生变化,利用这个特性制作光敏二极管,光敏三极管,使光转换为电压变量。同样,当光照射到半导体材料上时,使电阻发生变化,它将光转换为半导体材料的电阻(或电导)变量,如图1.5(a)(b)所示。

表1.1 物理现象及其转换

| 效应 现象  | 转 换       | 内 容   |
|--------|-----------|---|
| 光生伏特效应 | 光→电       | $pn$ 结部分的半导体用短波长的光照射发生电子和空穴并产生电动势的现象。       |
| 光电导效应  | 光→电阻      | 半导体用光照射时电阻发生变化的现象。                          |
| 热电效应   | 温→电       | 某些晶体温度升高时表面出现电荷的现象。                         |
| 汤姆逊效应  | 温度→热<br>电 | 使接成闭合环路的同一种金属具有不同的温度,当流过电流时在接合部分引起发热或吸热的现象。 |
| 压阻效应   | 力→电       | 外力作用在半导体材料上(金属材料),使材料的电阻发生变化现象。             |
| 压电效应   | 压力→电      | 强介质加压力时产生极化或电位差的现象。                         |
| 霍尔效应   | 磁<br>电→电  | 使电流流过固体并在与电流相同或垂直的方向加磁场时,在各个垂直方向产生电位差现象。    |
| 磁阻效应   | 磁<br>电→电阻 | 使电流流过固体并在与电流相同或垂直的方向加磁场时电阻增加的现象。            |

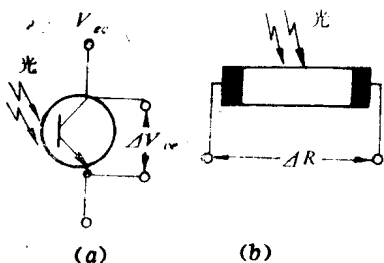


图1.5 (a)光电转换，  
(b)光电阻转换图

## (二) 热-电转换

将半导体材料或导体加热或冷却，使它的电阻发生变化，应用这个效应制作热敏电阻。它将热转换为电阻变量，如图1.6所示。

## (三) 力-电压转换

外力作用在电阻应变片上，组成电桥的四个电阻的阻值发生变化， $R_1$ 、 $R_2$ 电阻增大，而电阻 $R_3$ 、 $R_4$ 阻值减少，使电桥失去平衡，有信号输出。输出电压与压力呈线性关系。应用力-电压转换原理制作压力传感器。其线路图如图1-7所示。

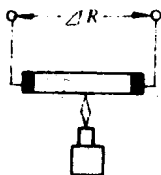


图1.6 热电阻转换

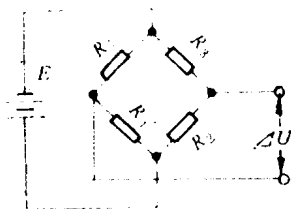


图1.7 力-电压转换

## (四) 力-电荷转换

外力或应力作用在压电晶体(铌酸锂，石英晶体等)上时，使其表面产生电荷或电压变化。根据这个原理制作压电传感器，它将应力转换为电荷 $Q$ 或电压 $U$ 变量，如图1.8所示。

## (五) 磁-电转换

线圈内磁芯作上下移动，磁路中磁阻发生变化，利用这个效应制作磁阻传感器。它将磁转换为交流电压的变化，如图1.9所示。

电容传感器是由介

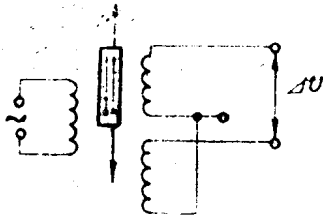


图1.9 磁阻转换

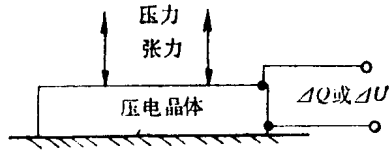


图1.8 压电转换

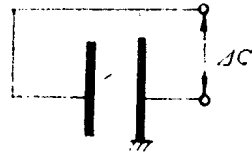


图1.10 电容转换

质及被介质所分开的两个电极组成的。变化电极间的距离或者改变两极间的介质都可引起电容量的变化。电容传感器将所测变量转换为电容变量，如图1.10所示。

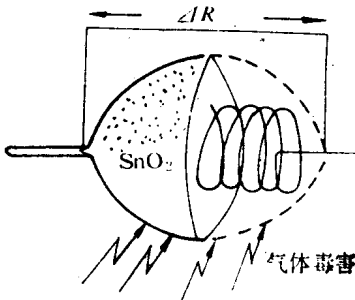


图1.11 气体-电阻转换

## (六) 气体-电阻转换

氧化物半导体材料，如  $\text{SnO}_2$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等。当它接触气体时，使其表面（或体内）电阻变化，如图1.11所示。利用这种特性制

造各种气体传感器，检测一些气体，广泛用于矿井、工业、环保等领域。它将气体转换为电信号输出，实现了气-电转换。

### (七) 湿度-电阻转换

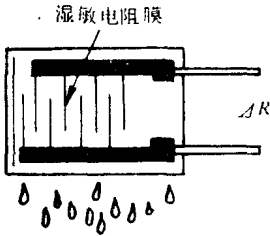


图1.12 湿度-电阻转换

半导体陶瓷( $MgCr_2O_4-TiO_2$ )材料或多孔性绝缘薄膜 $Al_3O_3(SiO_2)$ ，制作在衬底材料上，如图1.12所示。当它接触湿度环境时，吸附水汽，使其电阻发生变化。利用这种特性制作湿度传感器。它将湿度转化为电信号输出，实现了湿度-电阻转换。

## 1.4 主要传感器

传感器种类繁多，在此仅举几种主要传感器说明其工作原理，详细见后面章节介绍。

### (一) 光传感器

根据光生伏特效应，制造光敏二极管、光敏三极管、太阳能电池、电荷耦合器件等。当光敏二极管受光照时，在pn结两端产生电子空穴，在外部获得电流输出。图1.13表示光生伏特效应的工作原理和电压-电流特性。

### (二) 温度传感器

利用半导体材料的热敏特性制造热敏电阻，热敏电阻分为三

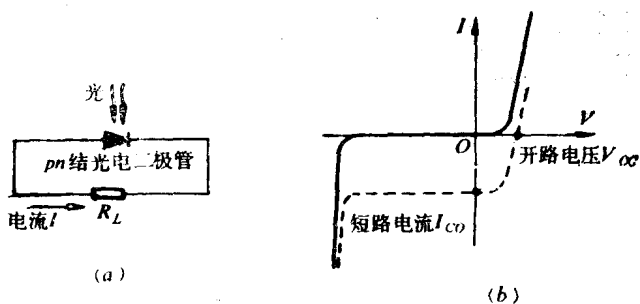


图1.13 电流-电压特性

种：电阻随温度升高而减小的负特性热敏电阻(NTC)，电阻随温度升高而增大的正特性热敏电阻(PTC)以及达到某一阈值温度时电阻急剧变化的临界特性热敏电阻(CTR)。图1.14表示各种热敏电阻的电阻-温度特性。一般热敏电阻的阻值随温度变化曲线是非线性的，要使其线性化，可以串并联外接固定电阻进行折线近似。最近，利用硅pn结的正向压降随温度变化特性，制造温敏二极管，温敏三极管，温控晶闸管，集成化温度传感器等，其性能超过热敏电阻，它已广泛应用在各个领域。

### (三) 压力传感器

压力传感器目前采用半导体平面工艺技术，在n型硅(100)面的晶体衬底进行抛光等薄片加工，制作图形膜片。在圆形膜片内制作四个扩散电阻，组成惠斯登电桥，如图1.15所示。当在膜片上加压力时， $R_1$ 、 $R_2$ 电

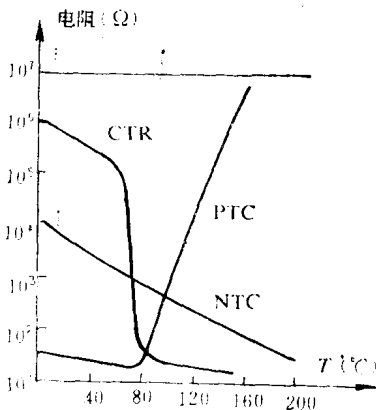


图1.14 各种热敏电阻的电阻-温度特性

阻值增大，而 $R_3$ 、 $R_4$ 阻值减小，使电桥失去平衡，有信号输出。半导体扩散型压力传感器可用于电子血压计，汽车电子设备和各种压缩机控制等。

#### (四) 磁传感器

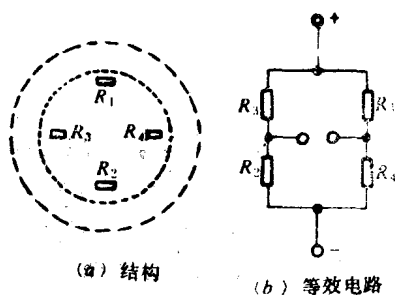


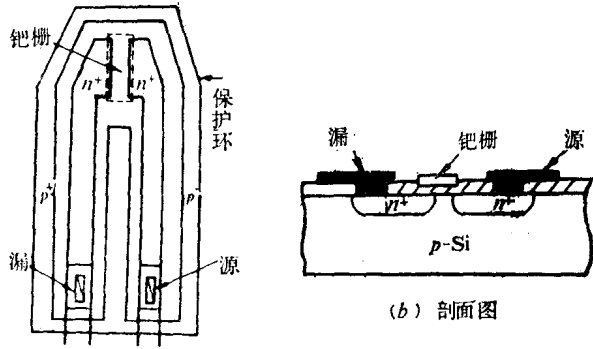
图1.15 压力传感器

目前利用半导体集成电路工艺技术，根据霍尔效应制作集成化霍尔器件及MOSFET霍尔器件，已应用在汽车点火装置及无电刷电机上。利用在磁场中，载流子受磁场的洛伦兹力作用而发生偏转现象，制造出磁敏二极管和磁敏三极管等。

#### (五) 气体传感器

人们在生活中，接触到各种气体。有些气体对人体有益，有些气体对人体有害，必须加以控制。以前利用 $\text{SnO}_2$ 、 $\text{ZnO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 烧结型气体传感器，检测 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ 、甲烷、丙烷、异丁烷等气体。图1.16是利用半导体材料制造的，具有一个 $n$ 沟氢敏钼栅MOSFET传感器设计图形和剖面结构。氢气钼栅MOSFET传感器是利用氢气引起金属钼功函数的改变，进而改变MOSFET器件的阈值电压效应而作成的传感器。

金属的功函数除了影响MOSFET器件的阈值之外，也决定金属-半导体接触构成的肖特基二极管的接触势垒的高度。因此也可以利用金属钼和 $\text{cds}$ 和半导体接触二极管来作成气体传感器。一个实验的氢敏 $\text{Pd-cds}$ 肖特基器件，采用掺 $\text{In}$ 的 $n$ 型 $\text{cds}$ 作为衬



(a) 版图

图1.16 n沟钯栅MOSFET氢气传感器

底材料，它的电阻率为  $5\Omega\text{cm}$ 。用电子束蒸发在它上面形成一层厚为  $800\text{\AA}$  的钯层。测得金属-半导体接触器件的势垒高度约  $0.53\text{eV}$ 。该器件在接触氢气之后，使其势垒高度变化。可以检测氢气浓度范围为  $500\sim 5000\text{ppm}$ ，如图 1-17 所示。另一种，在硅片上生长一层约  $30\text{\AA}$   $\text{SiO}_2$ ，再淀积上金属钯，形成 Pd-MIS 氢气传感器其结构如图 1.18 所示。

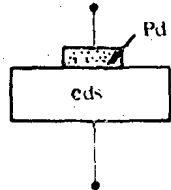


图1.17 pd-cds肖特基二极管氢敏器件

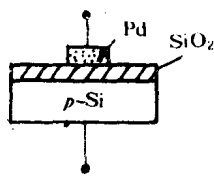


图1.18 氢敏pd-MIS器件

## (六) 湿度传感器

湿度是与人们的生活密切相关的物理现象。以前采用人的头发和马尾在湿度环境中引起伸缩作用制作湿度传感器。最近研制



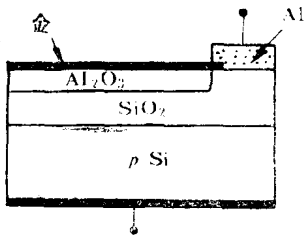


图1.19  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜湿度传感器

了采用陶瓷和固体电介质制作湿度传感器。图1.19是利用多孔 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜制作湿度传感器。湿度传感器不仅用于各种空调机，在电子灶的自动烹调及露点检测中，也得到非常广泛的应用。

### (七) 热电传感器

当某种物质的温度发生变化时，表面产生和温度高低相应的电荷现象，这种现象称为热电效应。利用这种效应制造热电传感器，如图1.20所示。

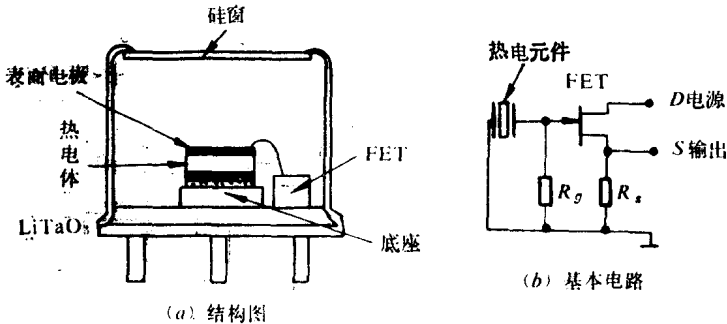


图1.20 热电型红外传感器(日本三洋TTS-1020)

具有这种效应的材料有 $\text{LiTaO}_3$ 、 $\text{PbTiO}_3$ 、 $\text{BaTiO}_3$ 等强介电材料。内接场效应晶体管FET是因为热电元件感应电荷量比较小，采用FET以实现在高阻抗与接收，而最后在适当的阻抗输出。目前使用最多是红外传感器。