

# 第 9 章

## 光电式与超声式传感器

### 光电式传感器

- 光电式传感器是以**光电器件**作为转换元件的传感器
- 工作原理：
  - 首先将被测量的变化转换成**光信号变化**
  - 然后通过**光电转换元件**转换成**电信号**
- 可用于检测直接引起光量变化的非电量，如：
  - 光强、光照度、辐射测温、气体成分分析等**
- 也可用于检验能转换成光量变化的其他非电量，如：
  - 零件直径、表面粗糙度、应变、位移、振动、速度、加速度、物体形状、工作状态识别等**

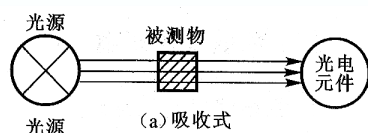
- 光电测量方法灵活多样，可测参数众多
- 优点：
  - 非接触、高精度、高分辨率、高可靠性和响应快**
- 种类：
  - 激光光源、光栅、光学码盘、CCD器件、光导纤维**
- 光电传感器在检测和控制领域应用广泛
- 光电传感器按接收状态可分为：
  - 模拟式光电传感器**
  - 脉冲式光电传感器**

### (1)模拟式光电传感器

- 工作原理是基于光电元件的光电特性
- 光通量随被测量而变，光电流就成为被测量的函数
  - 又称为**函数运用状态型**光电传感器

### (1)模拟式光电传感器

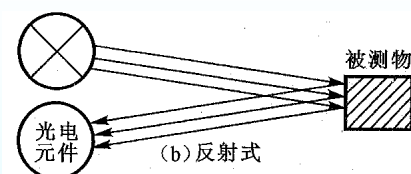
#### ①吸收式



- 被测物体位于恒定光源与光电元件之间
- 根据被测物的吸光程度或对其谱线的选择测定被测参数，如：
  - 测量液体、气体的透明度、混浊度**
  - 对气体进行成分分析**
  - 测定液体中某种物质的含量**

### (1)模拟式光电传感器

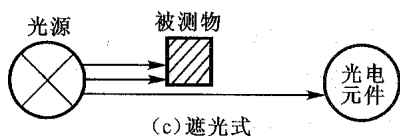
#### ②反射式



- 恒定光源发出的光投射到被测物体上
- 被测物体把部分光通量反射到光电元件上
- 根据反射的光通量多少测定被测物表面状态和性质，如：
  - 测量零件的表面粗糙度、表面缺陷、表面位移等**

## (1) 模拟式光电传感器

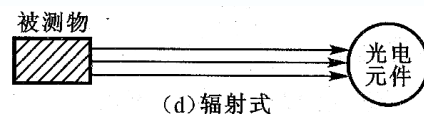
### ③ 遮光式



- 被测物体位于恒定光源与光电元件之间
- 光源发出的光通量经被测物遮去其一部分
  - 使作用在光电元件上的光通量减弱
  - 减弱的程度与被测物在光学通路中的位置有关
- 利用原理可以测量：长度、厚度、线位移、角位移、振动等

## (1) 模拟式光电传感器

### ④ 辐射式



- 被测物体本身就是辐射源
- 直接照射在光电元件上或经过一定光路后作用在光电元件上，如：
  - 光电高温计、比色高温计、红外侦察和红外遥感等
- 可以用于防火报警和制成光照度计等

## (2) 脉冲式光电传感器

- 其作用方式是光电元件的输出仅有两种稳定状态
  - “通”的开-关状态
  - 光电元件的开关运用状态
- 这类传感器要求光电元件灵敏度高，光电特性的线性要求不高
- 主要用在零件或产品的自动计数、光控开关、计算机的光电输入设备、光电编码器及光电报警装置等

## 9.1 光电器件

### 光电式传感器

- 光电传感器是将被测量的变化转换为光量变化的元件或装置。
- 可用于检测直接引起光量变化的非电量；
  - 光强、辐射测温、气体成分分析等。
- 也可用于能转换为光量变化的非电量；
  - 零件直径、表面粗糙度、应变、位移、振动、速度、加速度以及物体形状等。
- 光电器件：光电式传感器的主要部件，其基本工作原理是光电效应。
- 光电效应：物体吸收了光能后转换为物体中某些电子的能量而产生的电效应。光电效应可分为外光电效应和内光电效应两种。

## 9.1 光电器件

### 1. 外光电效应

- 光线作用下，物质内的电子逸出物体表面而向外发射的现象
  - 外光电效应
- 根据爱因斯坦假设，一个光子的能量只能给一个电子
- 电子从物质表面逸出，光子能量必须大于物质表面的逸出功  $A_0$
- 逸出表面的电子具有动能  $E_k$ ：

$$E_k = \frac{1}{2}mv_0^2 = h\nu - A_0 \quad (3-42)$$

式中： $m$ ——电子质量；

$v_0$ ——电子逸出时的初速度；

$h$ ——普朗克常数， $h=6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ；

$\nu$ ——光的频率。

$$E_k = \frac{1}{2}mv_0^2 = h\nu - A_0 \quad (3-42)$$

- 光电子逸出时的初始动能  $E_k$  与光的频率有关
  - 频率高，则动能大
- 逸出功因材料不同而异
- 材料都有一个频率限
  - 入射光的频率低于频率限，不论光强多大，也不能激发出电子
  - 入射光的频率高于频率限，光线微弱也会有光电子发射
  - 该频率限称为“红限频率”

- 外光电效应的光电发射型器件有：

光电管

光电倍增管

- 光电管有：

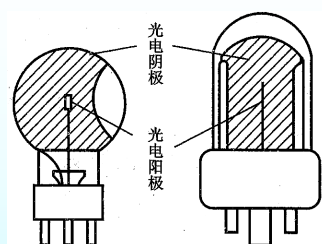
真空光电管

充气光电管

- 在真空玻璃泡内装有两个电极：

光电阴极

光电阳极



真空光电管结构

- 光电阴极通常采用逸出功小的光敏材料

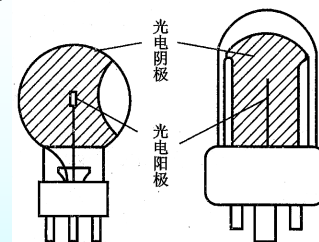
如：铯 (Cs)

- 光线照射到光敏材料上便有电子逸出

- 逸出电子被具有正电位的阳极所吸引

在光电管内形成空间电子流

在外电路中产生电流



真空光电管结构

- 若外电路串入电阻

- 电阻上的电压降或电路中的电流大小与光强成函数关系

——从而实现光电转换

## 9.1 光电器件

### 2. 内光电效应

#### 基本原理

- 受光照物体(通常为半导体材料)电导率发生变化

或产生光电动势的效应——称为内光电效应

- 内光电效应按工作原理分为两种：

光电导效应

光生伏特效应

### 2. 内光电效应

#### 1) 光电导效应

- 半导体材料受到光照会产生电子-空穴对，其导电性能增强

- 光线愈强，阻值愈低

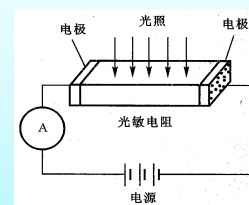
光照后电阻率发生变化的现象——称为光电导效应

- 光电导效应的光电器件有：

光敏电阻(光电导型)

反向工作的光敏二极管

光敏三极管(光电导型)



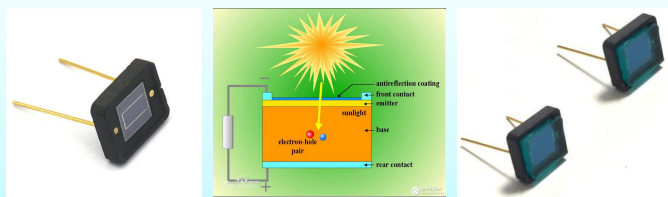
光敏电阻的工作原理图

### 2. 内光电效应

#### 2) 光生伏特效应

- 在光照时，能使物体产生一定方向的电动势的现象，

称为光生伏特效应。如：光电池等。



### 9.1.1 光敏电阻

#### 1. 光敏电阻原理与结构

- 光敏电阻又称光导管，由半导体材料制成，是纯电阻器件。

- 不受光照时，电阻值大而电流小；受一定波长光照射，阻值急剧减小。

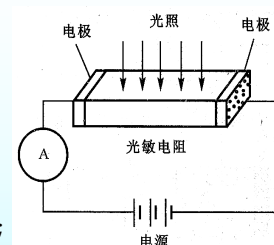
- 不受光照时的阻值为暗电阻——产生暗电流；

- 受光照时的电阻为亮电阻——产生亮电流；

- 亮电流与暗电流之差称为光电流；

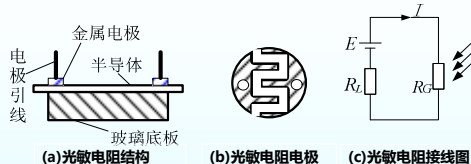
- 通常，暗电阻越大越好，亮电阻越小越好——光敏电阻的灵敏度高。

- 实际光敏电阻的暗电阻一般在兆欧级，亮电阻几千欧以下。



光敏电阻的工作原理图

## 1. 光敏电阻原理与结构



•图(a)：金属封装的硫化镉光敏电阻的结构图。玻璃底板上均匀涂附一层薄半导体物质，形成**光导层**；金属电极安装在半导体两端，由电极引线引出，形成光敏电阻；为防止周围介质影响，光导层上覆盖漆膜，但漆膜成分应保证在光敏层最敏感的波长范围内透射率最大。

•图(b)：光敏电阻电极的形式，为提高灵敏度，采用梳状电极。

•图(c)：光敏电阻接线简图。

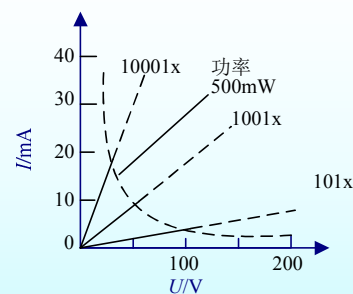
## 2. 光敏电阻基本特性

### 伏安特性

•伏安特性是指在一定照度下，光敏电阻两端的电压与电流的关系。

•右图曲线可见， $I-U$  曲线在一定的电压范围内呈直线。

•说明阻值与电压、电流无关，只与入射光量有关。



硫化镉光敏电阻的伏安特性曲线

## 2. 光敏电阻基本特性 (续1)

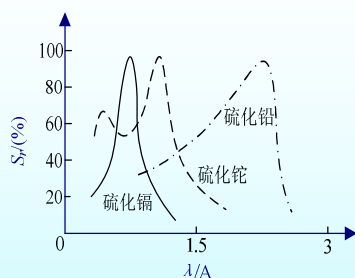
### 光谱特性

•即光谱响应，指光敏电阻的相对光敏灵敏度与入射波长的关系。

•右图可见：对不同波长，光敏电阻的灵敏度不同。

•硫化镉光敏电阻光谱响应峰值在可见光区域，常用于**照度计**光度测量；

•硫化铅光敏电阻响应于近红外和中红外区，常用于**火焰探测器**。



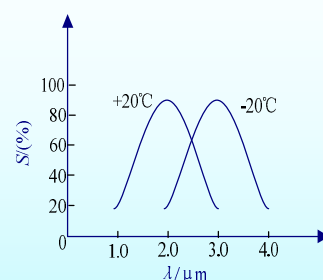
几种不同材料光敏电阻的光谱特性

## 2. 光敏电阻基本特性 (续2)

### 温度特性

•温度特性：温度变化对光敏电阻的光谱响应、光敏电阻的灵敏度、暗电阻的影响。

•右图可见，该光敏电阻受温度影响很大，其峰值随着温度上升向短波长方向移动，故该光敏电阻要在**低温、恒温**的条件下使用。



硫化铅光敏电阻的光谱温度特性曲线

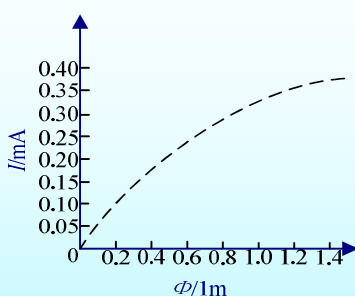
## 2. 光敏电阻基本特性 (续3)

### 光照特性

•光照特性：描述光电流和光照强度之间的关系。

•右图可见，光照特性曲线呈**非线性**，因此不宜作为测量元件，多用于开关信号传递。

•不同材料的光敏电阻光照特性不同。



硫化镉光敏电阻的光照温度特性曲线

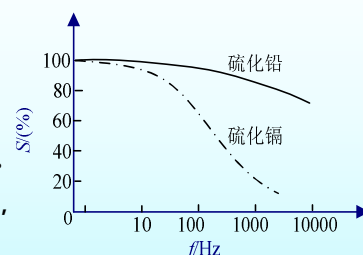
## 2. 光敏电阻基本特性 (续4)

### 频率特性

•多数光敏电阻的光电流不能随光强改变而立即变化，有一定惰性，即时间常数较大。

•不同材料的光敏电阻时间常数不同。

•右图可见，光敏电阻允许光电流大，光谱特性好，灵敏度高，但参数一致性差，光照特性呈非线性。



硫化镉和硫化铅光敏电阻频率特性曲线

## 9.1.2 光敏二极管和晶体管（内光电效应）

### 光敏二极管工作原理

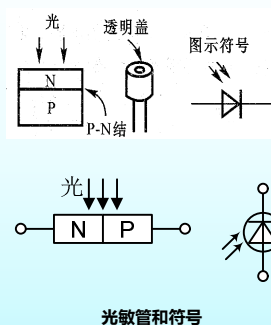
• 光敏管工作原理与光敏电阻相似

差别在于光照在半导体结上

• 光敏二极管的P-N结装在管的顶部

上面有一个透镜制成的窗口

以便入射光集中在P-N结上



### 光敏二极管工作原理

• 光敏二极管在电路中反向偏置

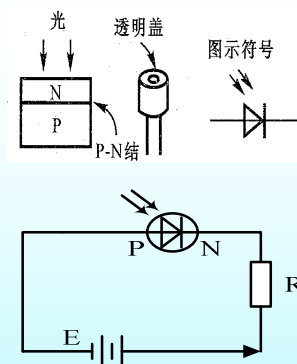
• 无光照时，流过的反向电流很小

• 光照射在P-N结上时

光照射在PN结上时，PN结附近产生  
光生电子和光生空穴对，在PN结内电场  
作用下作定向运动，形成光电流。光的  
照度越大，光电流越大。

• 特点：体积小，频率特性好，  
弱光下灵敏度低

在不受光照射时，处于截止状态，受光照射时，处于导通状态。



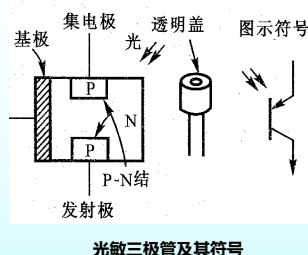
### 光敏晶体（三极）管

• 结构与光敏二极管相似

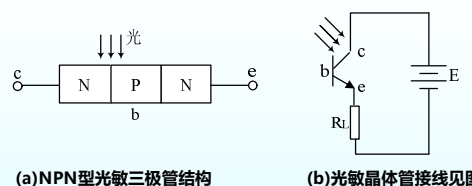
• 有两个P-N结

• 基极大多无引出线

• 仅有集电极和发射极两端引线



### 光敏晶体（三极）管工作机理



(a) NPN型光敏三极管结构

(b) 光敏晶体管接线见图

• 集电极上相对于发射极为正电压而不接基极时，基极-集电极的结反向偏置

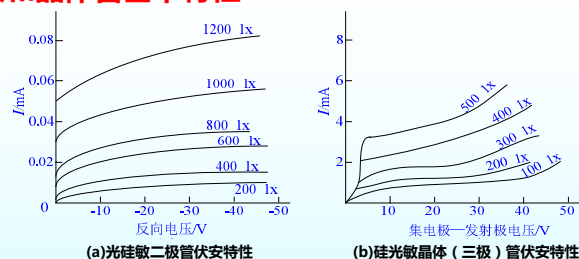
• 当光照射在基极-集电极结上时，在结附近产生电子-空穴对，形成光电流  
(约几  $\mu\text{A}$ )，输出到三极管基极

• 集电极电流是光生电流的  $\beta$  倍， $\beta$  是三极管的电流放大倍数

• 优点：光敏三极管具有放大作用电流灵敏度高

### 光敏二极和晶体管基本特性

#### 伏安特性



(a) 光硅敏二极管伏安特性

(b) 硅光敏晶体（三极）管伏安特性

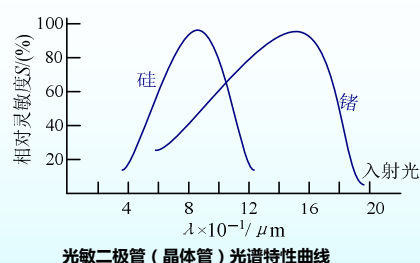
• 光敏三极管不同照度下的伏安特性，如同晶体管不同基极电流的输出特性。

• 图(a)：光敏二极管伏安特性。反向电流随光照强度的增大而增大，不同照度下，曲线几乎平行，不受偏压影响。

• 图(b)：硅光敏晶体管的伏安特性。和图(a)相比，由于晶体管放大作用，同样照度下，光敏晶体管输出的光电流比相同管型的二极管大上百倍。

### 光敏二极和晶体管基本特性 (续1)

#### 光谱特性



光敏二极管（晶体管）光谱特性曲线

• 如图所示，峰值处灵敏度最大。

• 硅的峰值波长约为  $0.9\mu\text{m}$ ，锗的峰值波长约为  $1.5\mu\text{m}$ ，都在近红外区域。

• 当入射光的波长增加或缩短时，相对灵敏度也下降。

• 实际应用时，可见光或赤热状态物体的探测，一般都用硅管；

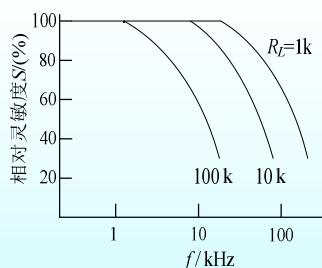
• 对红外光探测，锗管较适合。相对而言，锗管的暗电流较大，性能较差。



### 光敏二极管和晶体管基本特性 (续2)

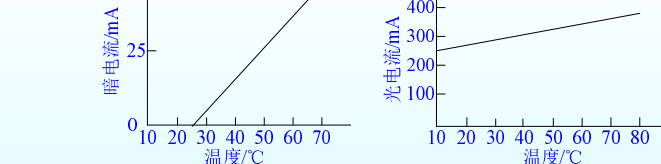
#### 频率特性

- 频率特性指光敏管输出的相对灵敏度或光电流随频率变化的关系；
- 如图可见，光敏晶体管的频率特性和负载电阻相关，减小负载电阻可提高频率响应范围，但输出电压响应亦减小。
- 光敏二极管在半导体光电器件中频率特性最好，普通的响应时间就可达 $10\mu\text{s}$ 。

光敏晶体管频率特性曲线 ( $k=k\Omega$ )

### 光敏二极管和晶体管基本特性 (续3)

#### 温度特性



光敏晶体管的温度特性

- 温度特性：光敏管的暗电流及光电流与温度的关系；
- 如图可见，温度变化对光电流影响很小，对暗电流影响很大。
- 在电子线路中应对暗电流进行温度补偿，否则将导致输出误差。

### 9.1.3 光电池 (内光电效应)

#### 光生伏特效应

- 半导体材料P-N结受到光照后产生一定方向的电动势的效应
- 光生伏特型光电器件是自发电式的有源器件
- 常用的光生伏特型器件：  
以可见光做光源的光电池
- 常用的光电池材料：  
硒、硅、锗

### 9.1.3 光电池 (内光电效应)

#### 光生伏特效应

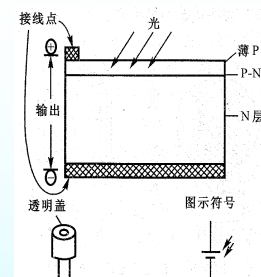
- 硅光电池也称硅太阳能电池

- 用单晶硅制成

在N型硅片上用扩散法掺入P型杂质

形成一个大面积的P-N结

P层做得很薄，使光线能穿透到P-N结上



硅光电池构造原理和图示符号

### 9.1.3 光电池 (内光电效应)

- 硅太阳能电池特点：

轻便、简单

不会产生气体或热污染

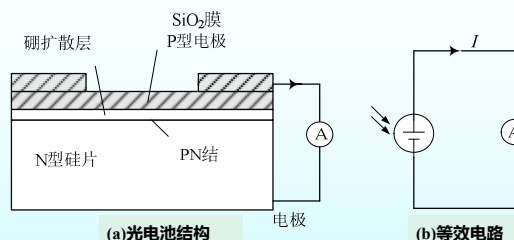
易于适应环境

- 凡是不能铺设电缆的地方都可采用太阳能电池

- 尤其适用于为航天飞行器仪表供电

### 9.1.3 光电池 (内光电效应)

#### 1. 光电池原理与结构



(a) 光电池结构

(b) 等效电路

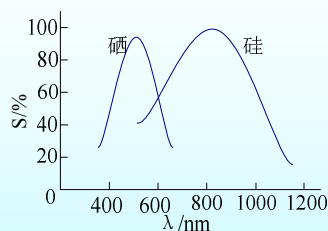
工作原理：当入射光照射PN结时，若光子能量大于半导体材料的禁带宽度，则可以在PN结内产生电子-空穴对，并从表面向内迅速扩散，在结电场的作用下，空穴移向P型区，电子移向N型区，最后建立一个与光照强度有关的电动势。

## 9.1.3 光电池（内光电效应）

### 2.光电池基本特性

#### 光谱特性

- 如图可见，不同材料的光电池，光谱响应峰值所对应的入射光波长不同，光谱响应波长范围不同。
- 硅光电池响应峰值在 $0.8\mu\text{m}$ 附近，硒光电池在 $0.5\mu\text{m}$ 附近；
- 硅光电池光谱响应波长范围 $0.4\sim 1.2\mu\text{m}$ ，硒光电池约 $0.38\sim 0.75\mu\text{m}$ ，硅光电池的响应范围较宽。



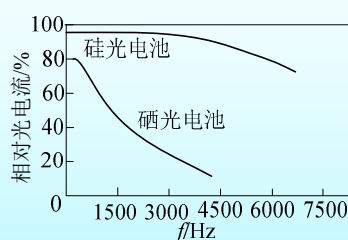
硅光电池和硒光电池的光谱特性曲线

## 9.1.3 光电池（内光电效应）

### 光电池基本特性（续2）

#### 频率特性

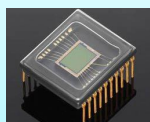
- 光电池的频率特性反映光的交变频率和光电池输出电流的关系。
- 如图所示。横坐标是光的调制频率，硅光电池有很高的频率响应，可用于高速计数等方面。



光电池的频率特性

## 9.1.4 电荷耦合器件

- 固态图像传感器是一种固态半导体集成元件
- 核心部分是**电荷耦合器件**(Charge Coupled Device, 简称**CCD**)
- CCD**由以阵列形式排列在衬底材料上的金属-氧化物-半导体(Metal Oxide Semiconductor, **MOS**)的电容器件组成
- 具有**光生电荷、积蓄和转移电荷**的功能
- 每个阵列单元电容排列整齐，尺寸与位置十分准确
- 具有光电转换与位置检测功能
- 20世纪70年代发展起来的一种新型光电元件

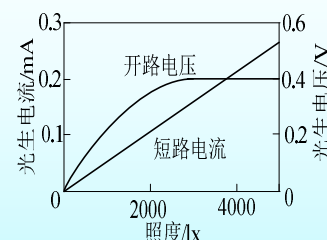


## 9.1.3 光电池（内光电效应）

### 2.光电池基本特性（续1）

#### 光照特性

- 光照特性：在不同光照度下，光电池的光电流和光生电动势之间的关系。
- 如图可见，短路电流在很大范围内与光照强度呈线性关系，但开路电压与光照强度呈非线性，且当照度在 $2000\text{lX}$ 时趋于饱和。
- 光电池作为测量元件时，应当作电流源，不宜作电压源。



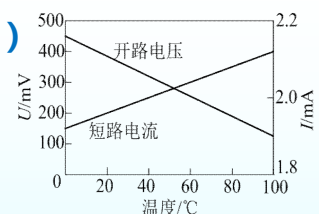
硅光电池开路电压、短路电流与光照的关系曲线

## 9.1.3 光电池（内光电效应）

### 光电池基本特性（续3）

#### 温度特性

- 温度特性主要描述光电池的开路电压和短路电流随温度变化情况；
- 如图可见，开路电压随温度升高而快速下降，而短路电流随温度升高而增加。
- 温度对光电池工作影响很大，作为测量器件应用时，与仪器设备的温度漂移、测量精度和控制精度有关，应保证温度恒定或采取温度补偿措施。
- 硅光电池最大开路电压约为 $600\text{mV}$ ；照度相等时，光敏面积越大，光电流输出也越大。
- 硅光电池性能稳定，光谱范围宽，频率特性好，转换效率高，耐高温辐射。

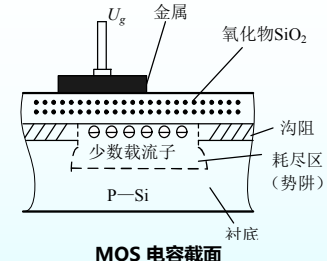


硅光电池的温度特性

## 9.1.4 电荷耦合器件

### CCD结构

- 电荷耦合器件（CCD）由若干电荷耦合单元组成
- 基本单元是MOS电容器，用来存储电荷。



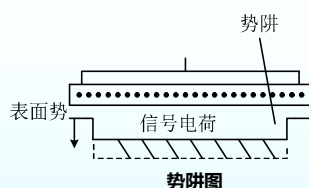
MOS 电容截面

以P型或N型半导体为衬底，其上覆盖约 $120\text{nm}$ 的 $\text{SiO}_2$ ，再在 $\text{SiO}_2$ 上沉积一层金属电极，即构成MOS电容转移器件，称为一个光敏元或一个像素。将一个MOS阵列加上输入输出结构即构成CCD器件。

## 9.1.4 电荷耦合器件

### 工作原理

#### 1) 表面势阱的形成



- 在金属电极上施加一个正电压  $U_g$  时，MOS电容器中P型硅的空穴被排斥，而电子被吸引到P型硅界面处，在电极下的界面附近形成一个带负电荷的耗尽层，即**表面势阱**。
- 对电子而言，耗尽层是低势能区域。

## 9.1.4 电荷耦合器件

### 工作原理

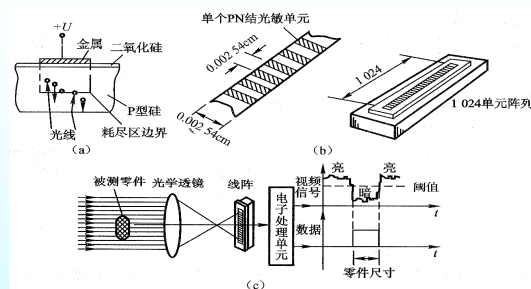


图 3-44 固态图像传感器工作原理  
(a) MOS 光敏单元; (b) 1024 单元阵列; (c) 线阵式摄像机

- 在 P 型(或 N 型)硅单晶的衬底上生长出一层很薄的  $\text{SiO}_2$
- 再在其上沉积一层金属电极——形成了一个 **MOS 结构单元**

## 9.1.4 电荷耦合器件

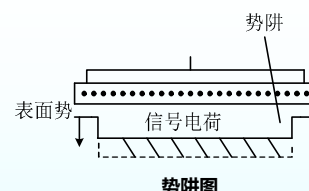
### 工作原理

- 1个MOS 结构元：1个MOS **光敏元**或**像素**；  
把1个势阱所俘获的若干光生电荷称为一个“**电荷包**”
- 光敏元阵列：**半导体硅片上几百或几千个相互独立、规则排列的 MOS 光敏元**
- 金属电极施加正偏压，半导体硅片上形成几百或几千个相互独立的势阱
- 电荷耦合摄像器件的基本原理：**照射在光敏元上形成的与光照强度对应的、明暗起伏的光生电荷图像**
- 由 CCD 组成的**线阵**和**面阵**摄像机能实现图像信息传输

## 9.1.4 电荷耦合器件

### 工作原理

#### 2) 势阱对电子的吸收



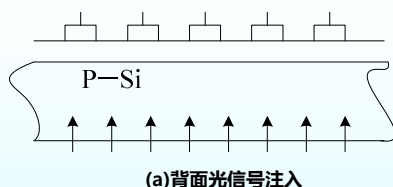
- 光照射硅片，产生电子-空穴对，光生电子被势阱吸收，所吸收的光生电子数量与入射光强成正比，存储了电荷的势阱称为**电荷包**，所产生的空穴被排出耗尽区。
- 一定条件下，正电压  $U_g$  越大，耗尽层越深，表面势阱越大，所能容纳的少数载流子电荷的量越大。

## 9.1.4 电荷耦合器件

### 工作原理

#### 信号电荷产生方法：

- 光信号注入
- 电信号注入



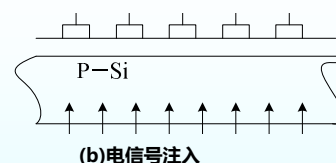
- 背面光注入方法：多用于固态图像传感器。光照射时，CCD器件在栅极附近的半导体内产生电子-空穴对，多数载流子被排斥到衬底，少数载流子被收集到势阱，形成电荷信号并存储。存储电荷的多少正比于入射光强，反映图像的明暗，实现光-电信号的转换。

## 9.1.4 电荷耦合器件

### 工作原理

#### 信号电荷产生方法：

- 光信号注入
- 电信号注入



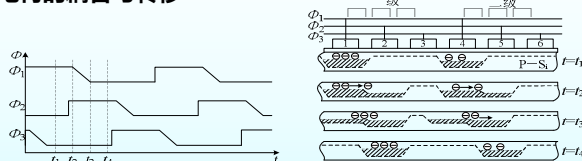
- 电信号注入是CCD通过输入结构对信号电流或电压采样，并转换成信号电荷。采用输入二极管实现电注入，二极管在输入栅IG的衬底上扩散形成。输入栅加上宽度为  $\Delta t$  的正脉冲，输入二极管PN结的少数载流子通过输入栅下的沟道注入  $\Phi 1$  电极下的势阱中，注入电荷量为  $Q = I_D \Delta t$



## 9.1.4 电荷耦合器件

### 工作原理

#### 2) 电荷的耦合与转移

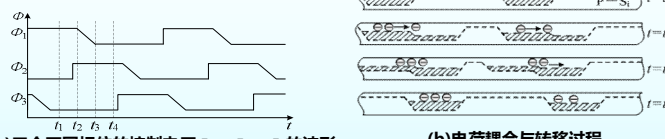


- CCD的最基本结构是一系列非常靠近的MOS电容器，电容器用同一半导体衬底制成，衬底上面涂覆一层氧化层，其上制作若干相应金属电极，各电极按三相（也有二相和四相）方式连接。电极间距离极小，以保证相邻势阱间的耦合及电荷转移。

## 9.1.4 电荷耦合器件

### 工作原理

#### 3) 电荷的耦合与转移

(a)三个不同相位的控制电压 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 、 $\phi_3$ 的波形

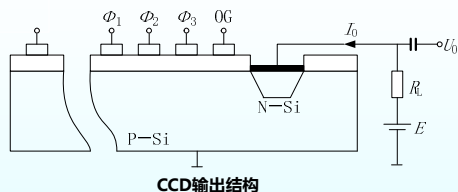
(b)电荷耦合与转移过程

- 当 $t=t_1$ 时， $\phi_1$ 高， $\phi_2$ 、 $\phi_3$ 低，电极1、4下面有势阱，存储电荷。
- 当 $t=t_2$ 时， $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 高， $\phi_3$ 低，电极2、5下面有势阱，相邻势阱耦合，电极1、4下的电荷向电极2、5下转移；随 $\phi_1$ 下降，1、4势阱变浅。
- 当 $t=t_3$ 时，更多电荷向电极2、5下转移。
- 当 $t=t_4$ 时， $\phi_1$ 、 $\phi_3$ 低， $\phi_2$ 高，电荷全部转移到电极2、5下。
- 依此类推，实现了电荷的耦合与转移。

## 9.1.4 电荷耦合器件

### 工作原理

#### 4) 信号的输出



- 如图所示。CCD末端的衬底上制作一个输出二极管，当二极管加反向偏压时，终端电荷在时钟脉冲的作用下，移向输出二极管，在负载 $R_L$ 上形成与电荷数成正比的脉冲电流 $I_0$ ，并由负载电阻 $R_L$ 转换为电压输出 $U_0$ 。

## 9.1.4 电荷耦合器件

### 工作原理

- CCD器件具有存储、转移电荷和逐一读出信号电荷的功能，在固态图像传感器中，可作为摄像或像敏的器件。CCD图像传感器主要用于摄像机、测试、传真和光学文字识别技术等方面。
- CCD固态图像传感器由两部分组成：感光部分，移位寄存器。感光部分是半导体衬底上的若干光敏单元，通常称像素，光敏单元将光图像转换成电信号，即将光强的空间分布转换为与光强成比例的电荷包空间分布；移位寄存器实现电信号传送和输出。

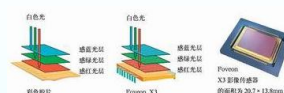
## 9.1.4 电荷耦合器件

### 工作原理

- 按照光敏元件的排列形式，CCD固态图像传感器分为两类：线型和面型。线型CCD只能直接将一维光信息转换为视频信号输出，若要采集二维图像信号，必须用扫描的方法实现。而面型可直接将二维图像转换为视频信号输出。

## 固态图像传感器工作原理

- 被测物光图像经透镜照射CCD上，排列在半导体衬底材料上的MOS单元上——每个单元称为一个像素点



- 采用时钟脉冲作控制信号提取光电信号
- CCD器件不同于一般光导摄像管，它不需要外加扫描电子束，而依靠自扫描(电荷转移)的方式获取与各像素点对应的电信号
- 按像素点排列的形式和传感器的构造方式，固态图像传感器一般分为：线阵和面阵型
- 线阵型一般有1024，1728，2048和4096个像素的传感器
- 面阵型的分辨力最高可达2048×2048个像素。

## 固态图像传感器原理特点

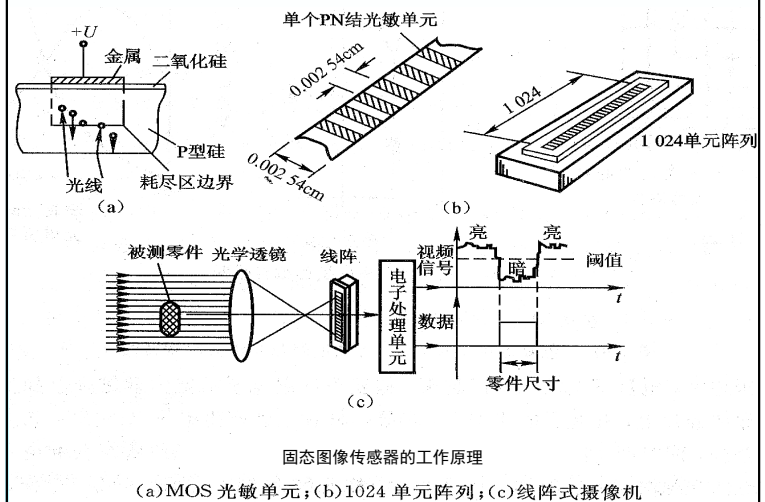
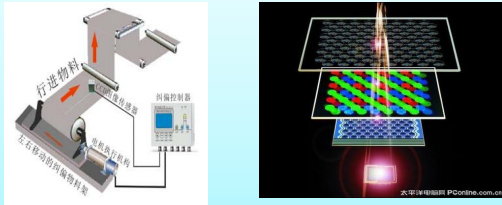
•小型、高速、高灵敏、高稳定性及非接触

•在测试与检测领域中被广泛采用：

测量物体的形貌、尺寸、位置以及事件的计数等

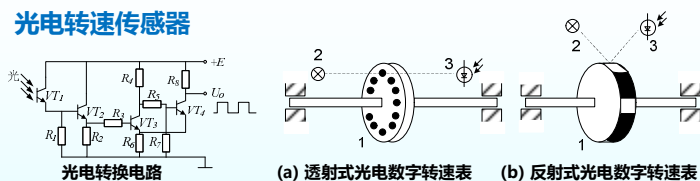
电视、传真、摄影、图像传输与处理

图像识别、自动监测和自动控制



## 9.1.5 光电传感器应用

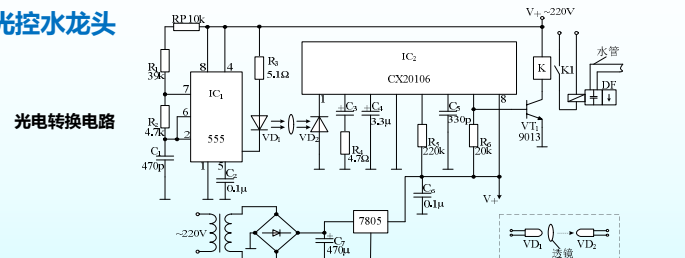
### 光电转速传感器



- 图(a)是透射式，在待测转速轴上固定一带孔圆盘1，白炽灯2产生恒定光，光敏二极管3通过圆孔接收光信号，输出脉冲放大整形后转换为方波，转速由脉冲频率决定。
- 图(b)是反射式。转速  $n$  与脉冲频率  $f$  的关系为：
$$n \approx 60 \frac{f}{N} (r/min)$$
式中， $N$  为孔数或黑白条纹数目。
- 光电转换电路如图所示。当光线照射  $VT_1$  时，使  $R_1$  上压降增大， $VT_2$  导通，触发由晶体管  $VT_3$  和  $VT_4$  组成的射极耦合触发器， $U_0$  为高。反之， $U_0$  为低，产生计数脉冲。

## 9.1.5 光电传感器应用

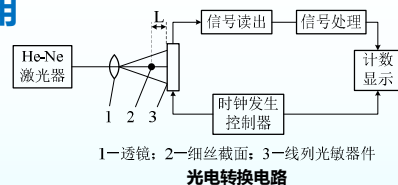
### 光控水龙头



- $IC_1$  组成的多谐振荡器驱动红外发光二极管  $VD_1$  发光，经凸透镜聚焦后由  $VD_2$  接收。
- $IC_2$  是专用红外线接收放大器，内含前置放大、滤波、积分检波、整形电路，并可为  $VD_2$  提供偏置电压。 $IC_2$  的中心频率由  $R_4$  确定，为 40kHz。
- 当  $VD_2$  接收红外调制光时， $IC_2$  第7脚变低电平， $VT_1$  截止，继电器  $K$  不工作，龙头关闭。
- 有人洗手时，手挡住  $VD_1$  发往  $VD_2$  的红外光， $IC_2$  第7脚由低变高， $VT_1$  导通，继电器  $K$  工作，触点闭合，电磁阀  $DF$  自动打开龙头。手离开后，电磁阀关闭。

## 9.1.5 光电传感器应用

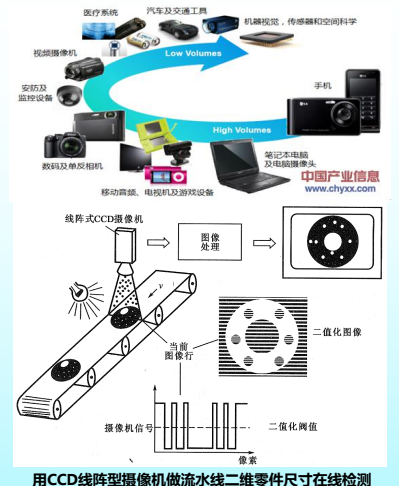
### CCD器件微小尺寸检测装置



- 对微小尺寸的检测一般采用激光衍射法。当激光照射细丝或小孔时，会产生衍射图像，用光电器件测出衍射图像暗纹的间距，即可计算出细丝或小孔的尺寸。
- 检测系统框图如图所示。衍射图像暗纹的间距  $d$  为：
$$d \approx \frac{L\lambda}{a}$$
式中： $L$ —细丝到接收光敏阵列器件的距离； $\lambda$ —入射激光波长； $a$ —被测细丝直径。
- 用线列光电器件将衍射光强信号转换为脉冲电信号，根据两个幅值为极小值之间的脉冲数  $N$  和线列光电器件单元的间距  $l$ ，即可算出衍射图像暗纹之间的间距  $d \approx Nl$
- 代入上式，被测细丝的直径  $a$  为：
$$a \approx \frac{L\lambda}{d} \approx \frac{L\lambda}{Nl}$$

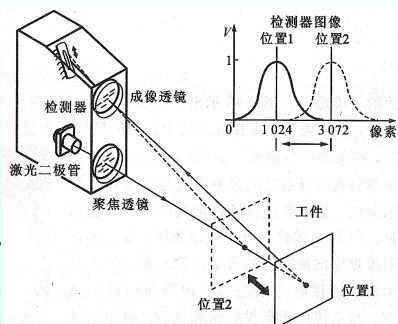
## 固态图像传感器应用

- 零件在生产线上依次经过 CCD 摄像机镜头
- CCD 传感器逐行扫描零件整个面积，将轮廓形状转换成逐行数据存储(黑白电平信号)
- 数据经处理，重构零件的轮廓形状，并计算出各部分尺寸
- 该方法的前提条件：  
传送带与零件(一般为金属)之间有明显的光照对比度  
——才能将零件轮廓从传送带背景图像中区分开来



## 固态图像传感器应用

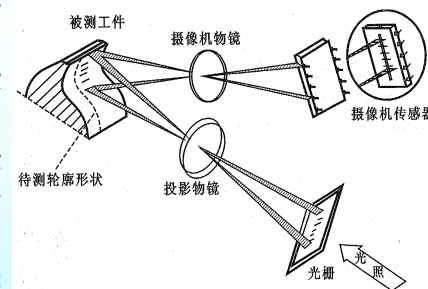
- 激光器光束经透镜聚集在被测工件上并在其表面形成**光斑**
- **光电检测器(线阵CCD摄像机)**与**激光束成一角度**
- 工件相对于光源运动时, 检测器接收到的**光斑图像位置发生移动**
- 测量移动量, 通过**三角解算关系**, 计算出工件的**移动距离**
- 若工件垂直于光源移动, 也可测出工件的**表面轮廓**



用摄像机做三角法测量物体位移及轮廓

## 固态图像传感器应用

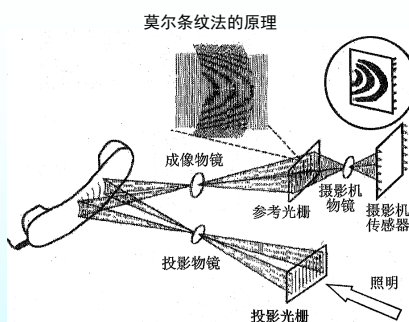
- 将一组**等间距条纹组成的光栅**投影到**被测工件表面**
- 投影线条经摄像机物镜被接收到**摄像机 CCD传感器上**
- 从成像方向观察该投影条纹发生**畸变**, 其中包含被测物表面轮廓形状的信息
- 投影条纹通过软件算法进行解算即可求得被测表面三维形貌



采用面阵式CCD摄像机利用投影法测量物体三维表面形貌实例

## 固态图像传感器应用

- 采用**投影光栅**和**参考光栅**各1块
- 参考光栅放在接收**光路上**
- 光栅样条被投射到被测物表面
- 由于表面轮廓的作用**线条会产生畸变**



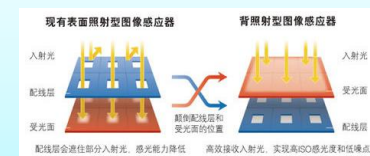
- “畸变”光栅条纹经被测物表面反射后, 经过参考光栅时, 产生**莫尔条纹**
- 包含了被测物的表面形貌信息
- CCD摄像机接收莫尔条纹, 通过解算, 重构被测物的表面三维形貌

## 固态图像传感器应用

- 通过改变**两栅间的夹角**  
改变莫尔条纹的疏密性
- 莫尔法  
条纹间距有放大作用  
可得到高条纹分辨力和测量精度



被接收的被测物表面形成的莫尔条纹



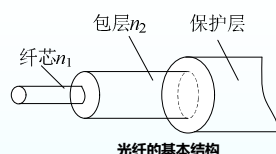
## 9.2 光纤

### 9.2.1 光纤结构和传光原理

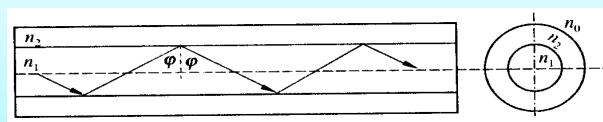
#### 1. 光纤的结构

光导纤维的简称, 结构如图所示。

- 纤芯: 中心的圆柱体; 掺杂的石英玻璃制成, 折射率  $n_1$  ( $n_1 > n_2$ )。
- 包层: 围绕纤芯的圆形外层, 不同掺杂的石英玻璃制成, 折射率  $n_2$ 。
- 保护套: 在包层外面的一层, 尼龙材料, 增加机械强度。

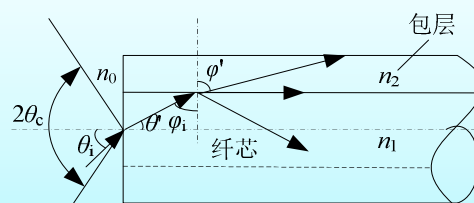


光纤的基本结构



#### 2. 光纤的传光原理

- 光纤的传输: 基于光的**全内反射**。
- 如图所示, 设有一段圆柱形光纤, 两个端面均为光滑的平面。
- 光线射入一个端面并与圆柱轴线成  $\theta_i$  角时, 在光纤内折射成  $\theta'$ , 然后以  $\phi_i$  角入射至纤芯与包层的界面, 部分光线透射到包层, 一部分反射回纤芯。
- 若要在界面上发生全反射, 则纤芯与界面的光线入射角  $\phi_i$  应大于临界角  $\phi_c$ 。



光纤的传光原理

- 根据斯涅耳光的折射定律： $n_0$ 为外界介质的折射率

$$n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r$$

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$$

- 若发生全反射： $\theta_i > \theta_c$  (临界折射角)

$$n_1 \sin \theta_i = n_1 \sin \left( \frac{\pi}{2} - \theta_c \right) = n_1 \cos \theta_c = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c} = n_1 \sqrt{1 - \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2}$$

当  $\theta_i = \theta_c$  时, 有

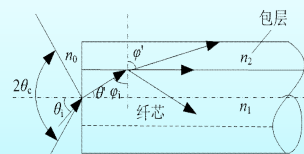
$$n_1 \sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

光纤端面的入射角  $\theta_i$  应满足:

$$\theta_i \leq \theta_c = \arcsin \left( \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right)$$

光纤处于空气中时,  $n_0 = 1$ , 有:

$$\theta_i \leq \theta_c = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



### 3. 光纤基本特性

#### 1) 数值孔径(NA)

定义为:

$$NA = \sin \theta_c = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

- 表征光纤的集光能力:

$NA$  越大, 集光能力越强, 耦合效率越高。

- 数值孔径  $NA$  过大, 会造成光信号畸变

通常, 石英的  $NA$  取  $0.2 \sim 0.4$ 。

### 3. 光纤基本特性

#### 2) 光纤模式

- 光纤模式指光波传播的途径和方式。

- 单模光纤

纤芯直径  $2 \sim 12 \mu\text{m}$ , 只能传输一种模式。畸变小, 线性好, 容量大, 灵敏度高; 但制造、连接、耦合困难。多用于相位调制型和偏振调制型的光纤传感器。

- 多模光纤

纤芯直径  $50 \sim 100 \mu\text{m}$ , 性能较差, 但易制造、连接、耦合。多用于光强度调制型或传光型光纤传感器。

### 3. 光纤基本特性

#### 3) 光纤传输损耗

- 损耗主要包括吸收损耗、散射损耗和光波导弯曲损耗。

- 吸收损耗

光纤材料中的杂质离子、原子的缺陷对光的吸收而产生的损耗。

- 散射损耗

光纤材料密度和浓度不均匀, 光纤和包层的界面不光滑、污染等产生的损耗。散射与波长的四次方成反比, 波长越短, 散射越严重。

- 光波导弯曲损耗

因使用时弯曲而产生的损耗。弯曲半径大于  $10\text{cm}$  时, 可忽略。

### 3. 光纤基本特性

- 光导纤维是近代光信息传输科学的巨大成果

- 光纤传送信息的特点:

低衰减、柔性好、信息量大、频带宽以及不受外界干扰

- 优点:

防水性、绝缘性、尺寸小、质量轻、节省贵重金属、成本低

- 用玻璃、石英、塑料等光透射率高的电介质制作的极细纤维

- 近红外线至可见光范围内传输损耗极小

——理想的传输线路

### 9.2.2 光导纤维传感器

#### 光纤传感元件分为两类

- 传输型光纤传感元件

利用光纤的低损耗传输功能

- 传感型光纤传感元件

利用光纤特性受被测参数影响发生变化而使通过光纤的光波

某些参数(如强度、相位、偏振面或频率)的变化制成的传感元件。



## 9.2.2 光导纤维传感器

### 工作原理

- 光纤传感元件是一种很有发展前途的新技术
- 目前实用化的光纤传感元件为数尚少
- 研究中的项目却数量甚多

如：传感温度、压力、振动、音响、射线、电、磁、电磁波以及光学等许多物理量的光纤传感器

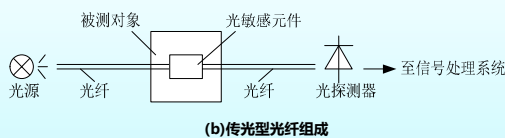
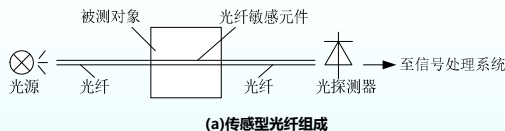
## 9.2.2 光导纤维传感器

### 工作原理

- 通过外界信号(温度、压力、应变、位移、振动、电场等)对光进行调制，引起光的强度、波长、频率、相位、偏振态等性质的变化，即光被外界参数调制的原理。
- 光纤传感器一般分两类  
功能型(传感型)传感器，非功能型(传光型)传感器。
- 功能型传感器  
又称为传感型传感器，利用光纤特性或功能把光纤作为敏感元件。被测量对光纤内传输的光进行调制，使光的强度、相位、频率或偏振态等特性改变，再对被调制信号进行解调，从而得出被测信号。
- 非功能型传感器  
又称为传光型传感器，利用其它敏感元件感受被测量的变化，光纤作为信息的传输介质。

## 9.2.2 光导纤维传感器

### 组成结构



- 光纤传感器由光源、敏感元件(光纤、非光纤)、光探测器、信号处理系统及光纤组成。

## 9.2.2 光导纤维传感器

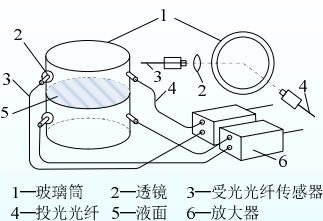
### 工作过程

- 光源发出的光，通过源光纤传到敏感元件；
- 被测参数作用于敏感元件，在光的调制区内，光的某一性质受到被测量的调制；
- 调制后的光经接收光纤耦合到光探测器，将光信号转换为电信号，进行相应的信号处理后得到被测量值。

## 9.2.2 光导纤维传感器

### 光纤传感器应用

#### —光纤传感器的液位检测



液位检测原理图

- 系统采用二组光纤传感器，一组完成液面上限控制，另一组完成液面下限控制，分别按某一角度装在玻璃罐的两侧。
- 当在投光光纤与光纤传感器之间有液体时，由于液体对光的折射，光纤传感器接收到光信号，并由放大器内的光敏元件转换成电信号输出。
- 无液体时，光纤传感器接收不到投光光纤发出的光。液面的控制精度可达 $\pm 1\text{mm}$ 。

## 9.2.2 光导纤维传感器

### 光纤传感器应用

#### —光纤传感器的流量检测

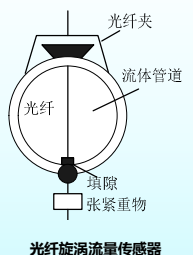
- 传感器组成结构示意图如图所示。将一根多模光纤垂直装入流管，当液体或气体流经与其垂直的光纤时，流体流动受到光纤阻碍，根据流体力学原理，光纤的下游两侧产生有规则的旋涡，旋涡的频率 $f$ 近似与流体的流速成正比，即

$$f \propto S_t \frac{v}{d}$$

式中： $v$ —流速；

$d$ —流体中物体的横向尺寸大小；

$S_t$ —斯特罗哈尔(Strouhal)系数，无量纲常数。





## 9.2.2 光导纤维传感器

### 光纤传感器应用

- 在多模光纤的输出端，各模式的光形成干涉光斑，没有外界扰动时干涉图样是稳定，受到外界扰动时，干涉图样的明暗相间的斑纹或斑点会发生随着振动周期而变化的移动，测得相应的频率信号  $f$ ，可推算流体的流速。
- 光纤旋涡流量传感器可测量液体和气体的流量，没有活动部件，测量可靠，对流体流动不产生阻碍作用，压力损耗非常小。

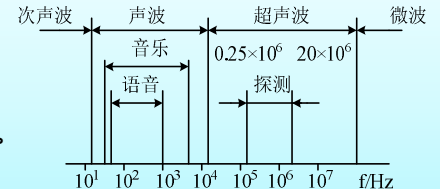
## 9.3 超声波传感器

### 1. 定义与分类

- 波：振动在弹性介质内的传播称为机械波；
- 超声波：能为人耳所闻的机械波

16Hz~20kHz，声波；

- 次声波： $\leq 16\text{Hz}$
- 超声波： $\geq 20 \times 10^3\text{Hz}$
- 微波： $3 \times 10^8 \sim 3 \times 10^{11}\text{Hz}$ 。



## 9.3 超声波传感器

### 1. 定义与分类

#### 按振动强度分

- 检测超声：振动强度较低，用来探测信息；
- 功率超声：振动强度高，用以改变传声媒质的状态、性质及结构，也称高能超声。
- 超声波由一种介质入射到另一种介质时，因在两种介质中传播速度不同，在介质分界面上产生**反射**、**折射**和**波型转换**等现象。

### 2. 超声波基本特性

- (1) 束射特性：波长短，发散性能较弱，可近似集中成一束射线；
- (2) 吸收特性：在空气、液体和固体中均会被吸收，空气中吸收特性最强，固体中最弱；
- (3) 高功率性：因超声波频率高，其功率比声波大得多，可使所通过的介质产生急速运动，甚至分子结构产生变化；
- (4) 声压作用：超声波振动使物质分子产生压缩和稀疏作用，这种由于声波振动引起附加压力作用的现象称为**声压作用**。

## 3. 超声波的波型及其传播速度

### (1) 波型

在介质中，声源施力方向与波传播方向不同，声波波型不同。通常有：

- 纵波：质点振动方向与波传播方向一致，能在固、液和气介质中传播；
- 横波：质点振动方向与波的传播方向垂直，只能在固体介质中传播；
- 表面波：质点振动介于横波与纵波之间，轨迹是椭圆形，椭圆长轴垂直于传播方向，短轴平行于传播方向，只沿着介质表面传播，其振幅随深度增加而迅速衰减。

## 3. 超声波的波型及其传播速度 (续)

### (2) 波型转换

当纵波以某一角度入射到第二固体介质的界面上时，除有纵波的反射、折射外，还发生横波的反射、折射，有些情况下还能产生表面波。

$$c \propto \sqrt{\frac{1}{\rho B_a}}$$

式中： $\rho$ ——介质的密度；

$B_a$ ——绝对压缩系数。

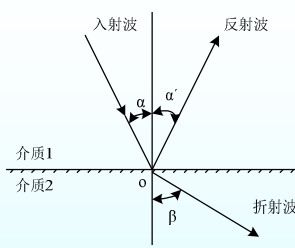
$\rho$ 、 $B_a$ 是温度函数，超声波在介质中传播速度随温度变化而变化。

在固体中，纵波、横波及其表面波的速度相互关联：

横波速度为纵波的50%，表面波速度为横波速度的90%。气体中纵波速度为344 m/s，液体中纵波速度为900 ~ 1900 m/s。

#### 4. 超声波的反射和折射

- 声波从一种介质传播到另一种介质，在两个介质的分界面上一部分声波发生反射，另一部分发生折射，透射过界面，在另一种介质内部继续传播。



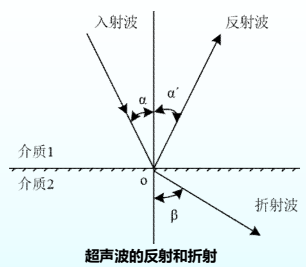
- 依物理学理论，波反射时，入射角  $\alpha$  与反射角  $\alpha'$  的正弦之比等于波速之比；折射时，入射角  $\alpha$  与折射角  $\beta$  的正弦之比，等于入射波波速  $c_1$  与折射波波速  $c_2$  之比，即

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

#### 4. 超声波的反射和折射

$$\text{声波反射系数 } R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{\cos^2 \alpha - \frac{c_2}{c_1}}{\cos^2 \alpha + \frac{c_2}{c_1}}$$

$$\text{声波透射系数 } T = \frac{I_t}{I_0} = \frac{4 \frac{c_1}{c_2} \cos \alpha \cos \beta}{(\frac{c_1}{c_2} \cos \alpha + \cos \beta)^2}$$



式中：

$I_0, I_r, I_t$  分别为入射波、反射波、透射波的声强；

$\alpha, \beta$  分别为声波的入射角和折射角；

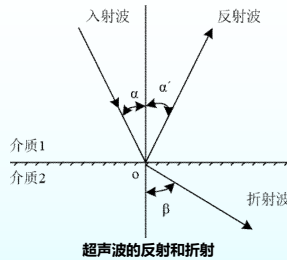
$c_1, c_2$  分别为入射波和折射波的速度；

$\frac{c_1}{c_2}, \frac{c_2}{c_1}$  分别为两介质的声阻抗。

#### 4. 超声波的反射和折射

$$\text{声波反射系数 } R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{\cos^2 \alpha - \frac{c_2}{c_1}}{\cos^2 \alpha + \frac{c_2}{c_1}}$$

$$\text{声波透射系数 } T = \frac{I_t}{I_0} = \frac{4 \frac{c_1}{c_2} \cos \alpha \cos \beta}{(\frac{c_1}{c_2} \cos \alpha + \cos \beta)^2}$$



超声波的反射和折射

- 若  $\rho_2 c_2 \approx \rho_1 c_1$ ，反射系数  $R \approx 0$ ，透射系数  $T \approx 1$ ，声波几乎全透射；
- 若  $\rho_2 c_2 \gg \rho_1 c_1$ ，反射系数  $R \approx 1$ ，声波在界面上几乎全反射；
- 若  $\rho_1 c_1 \gg \rho_2 c_2$ ，反射系数  $R \approx 1$ ，声波在界面上几乎全反射。

#### 5. 超声波的衰减

声波在介质中传播时，随着传播距离的增加，能量逐渐衰减，声压和声强的衰减规律为

$$P_x = P_0 e^{-\alpha x} \quad I_x = I_0 e^{-2\alpha x}$$

式中： $P_x, I_x$ ——距声源  $x$  处的声压和声强；

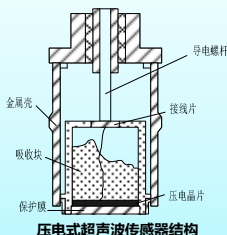
$x$ ——声波与声源间的距离；

$\alpha$ ——衰减系数，单位为 Np/cm (奈培/厘米)。

- 声波在介质中传播时，能量衰减程度与声波扩散、散射及吸收等因素有关。
- 扩散衰减：指因声波传播距离的增加而引起的声能减弱；
- 散射衰减：指固体介质中的颗粒界面或流体介质中的悬浮粒子，改变了部分声能的传播方向而造成能量损耗；
- 吸收衰减：由于介质粘滞性，使超声波传输时引起质点间的摩擦，一部分声能转换成热能，导致损耗。
- 理想介质中，声波衰减仅来自于声波扩散。

#### 6. 超声波换能器结构

- 超声波换能器（探测器）：利用超声波在超声场中的物理特性而实现信息转换的装置。分为：压电式（最常用）、磁致伸缩式、电磁式等；
- 发射探头：利用逆压电效应，将高频电振动转换成高频机械振动，形成超声波发射；
- 接收探头：利用正压电效应，将超声波振动转换成电信号，即接收超声波。
- 单向敏感元件：只能发射或接收；
- 可逆敏感元件：既可发射又可接收；
- 压电式超声波探头结构：由压电晶片、吸收块（阻尼块）、保护膜、引线等组成。
- 超声波频率  $f$  与压电晶片厚度  $\delta$  成反比，阻尼块用于吸收声能量，提高分辨率。

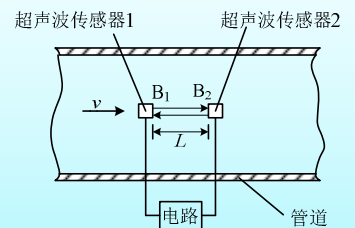


#### 7. 超声波流量检测

- 利用超声波在静止流体和流动流体中的传播速度的不同检测流体速度，再根据管道流体的截面积，计算流体流量。
- 在流体中相距  $L$  处各设置一个超声波传感器，既可以发射也可以接收超声波。设：顺、逆流方向的传播时间分别为  $t_1, t_2$ ，流体静止时的超声波传播速度为  $c$ ，流体流动速度为  $v$ ，则

$$t_1 = \frac{L}{c + v}$$

$$t_2 = \frac{L}{c - v}$$



## 7. 超声波流量检测 (续)

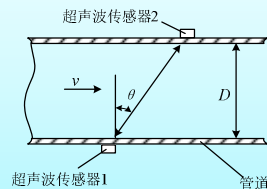
超声波传播时间差为： $\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2Lv}{c^2 - v^2}$

由于流体的流速远小于超声波在流体中的传播速度，即  $c \gg v$ ，则得到流

体的流速为： $v = \frac{c^2}{2L} \Delta t$

实际应用时，超声波传感器安装在管道外部，超声波的传输时间为：

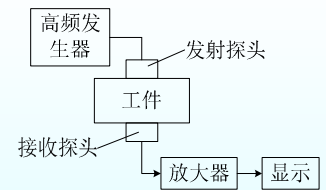
$$t_2 = \frac{D}{c \cos \theta} \quad t_1 = \frac{D}{c \sin \theta}$$



## 8. 超声波探伤

### (1) 透射式

- 根据超声波穿透工件后能量的变化判断工件内部质量。两探头置于工件相对两面，一个发射，一个接收。发射波可连续，也可能是脉冲。



- 工件内无缺陷时：接收能量大，输出电压大；
- 工件内有缺陷时：因部分能量被反射，接收能量小，输出电压小。

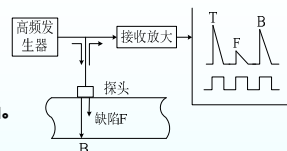
由此可判断有无缺陷。

- 特点：灵敏度较低，无法识别小缺陷，无法定位，对两探头的相对距离和位置要求较高。

## 8. 超声波探伤 (续)

### (2) 反射式

- 以声波在工件中反射后能量的不同探测缺陷。
- 高频脉冲发生器通过探头产生超声波，向工件内部传播，一部分被缺陷F反射，另一部分传至工件底面B也被反射，探头接收后变为电压脉冲。
- 发射波T、缺陷波F及底波B被放大显示，水平亮线为扫描线（时间基准），其长度与时间成正比。
- 根据发射波、缺陷波及底波在扫描线上的位置，可求出缺陷位置。
- 由缺陷波的幅值，可判断缺陷大小。
- 当缺陷截面积大于声束面时，声波全部由缺陷处反射，荧光屏上只有T波、F波，没有B波。
- 当工件无缺陷时，荧光屏上只有T、B波，没有F波



# The End