

## 第4章 光伏探测器

### 4.0 本章知识要点

#### 1. 光伏探测器的工作原理及特性:

温度特性、信噪比、光谱特性、响应时间、频率特性

#### 2. 几种光伏器件的基本结构及基本特性:

硅光电池、硅光电二极管、硅光电三极管、PIN 光电二极管、雪崩光电二极管、紫外光电二极管、红外光电二极管

#### 3. 几种光伏探测器组合器件的结构原理:

半导体色敏感器件、阵列式光电器件、象限式光电器件、光电位置探测器、光电耦合器

#### 4. 光伏探测器偏置电路的特征及分类:

自偏置电路、零伏偏置电路、反向偏置电路

## 第4章 光伏探测器

### 4.1 光伏探测器的工作原理及特性

#### 4.1.1 光伏探测器的工作原理

##### 1. 光伏探测器的定义

**光伏探测器** 利用半导体的光伏效应制成的器件，简称PV（Photovoltaic）探测器。

##### 2. 光照下的PN结电流方程

当光伏探测器受光照时，流经PN结外电路的总电流为暗电流与光电流之差，用下式表示为：

$$I = I_0 \left( e^{eU/kT} - 1 \right) - I_p = I_d - I_p \quad (4-1)$$

##### 3. 光伏探测器的工作模式：

- 光电导模式——PN结外加反向偏压，如光电二极管大多工作于此模式。
- 光伏模式——PN结无外加偏压，也称为自偏压，如光电池工作于此模式。

光伏效应 PN结受到光照时，可在PN结的两端产生电势差，这种现象则称为光伏效应。

暗电流 无光照时流过PN结的电流， $I_d = I_0 \left( e^{eU/kT} - 1 \right)$ 。

光电流 光照下流过PN结的电流，用 $I_p = SE$ 表示。

## 第4章 光伏探测器

### 4.1 光伏探测器的工作原理及特性

#### 4.1.2 光伏探测器的基本特性和主要参数

##### 1. 伏安特性

光伏探测器在不同照度下的伏安特性曲线如图 4-1 所示。

- 第三象限曲线：工作在光电导模式的光伏探测器的伏安特性。
- 第四象限曲线：工作在光伏模式的光伏探测器的伏安特性。

由光伏探测器的伏安特性得到其等效电路，如图 4-2(a)所示。光伏探测器等效于一个电流源（光电流） $I_p$  和一个普通二极管的并联。普通二极管包括暗电流  $I_d$ 、结电阻  $R_{sh}$ 、结电容  $C_j$  及串联电阻  $R_s$ 。一般， $R_{sh}$  很大且  $R_s$  极小，忽略二者的影响，光伏探测器的等效电路可简化为图 4-2 (b)所示。

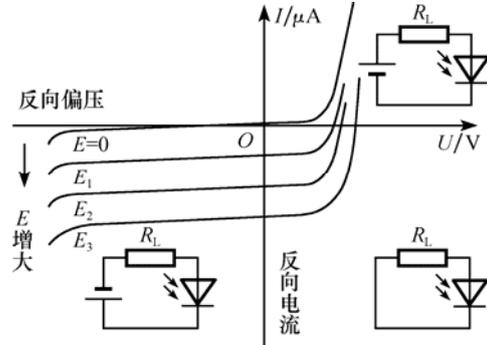


图 4-1 光照下的 PN 结伏安特性

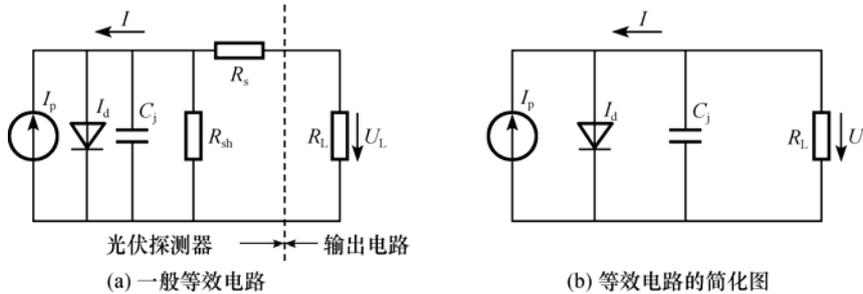


图 4-2 光伏探测器等效电路

##### 2. 开路电压 $U_{oc}$ 和短路电流 $I_{sc}$

**开路电压** 在开路 ( $R_L \rightarrow \infty$ ) 情况下，工作在光伏模式的探测器两端的电压，即

$$U_{oc} = \frac{kT}{e} \ln(I_p / I_0 + 1) \quad (4-4)$$

**短路电流** 在短路 ( $R_L = 0$ ) 情况下，流过工作在光伏模式的探测器的电流，即

$$I_{sc} = -I_p = -S \cdot E \quad (4-6)$$

$I_{sc}$  和  $U_{oc}$  是描述光电池性能的两个重要参数。

##### 3. 暗电流和温度特性

硅光电二极管暗电流的温度特性曲线如图 4-3 所示。常温条件下，一般硅光电二极管的暗电流约 100nA 数量级，硅 PIN 光电二极管可小到 1nA。

暗电流的影响：

- 弱光信号检测
- 增大散粒噪声

暗电流的减小方法：

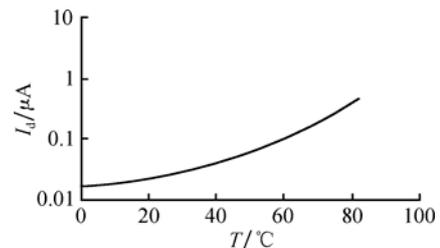


图 4-3 硅光电二极管暗电流的温度特性曲线

- 降低温度
- 加零偏或反偏压

#### 4. 噪声、信噪比和噪声等效功率

光伏探测器的噪声主要包括光电流的散粒噪声、暗电流的散粒噪声和PN结漏电阻 $R_{sh}$ 的热噪声、负载电阻 $R_L$ 的热噪声，表达式为：

$$\overline{i_n^2} = 2eI_p\Delta f + 2eI_d\Delta f + \frac{4kT\Delta f}{R_{sh}} + \frac{4kT\Delta f}{R_L} \quad (4-7)$$

输出的信噪比：

$$SNR = \frac{I_p^2}{i_n^2} = \frac{I_p^2}{2e(I_d + I_p)\Delta f + \frac{4kT\Delta f}{R_L}} \quad (4-9)$$

噪声等效功率为：

$$NEP = \frac{\sqrt{\overline{i_{dn}^2}}}{S} \quad (4-11)$$

注意：一般产品手册中给出的探测器的 NEP 值，仅考虑暗电流对散粒噪声的贡献。

#### 5. 光谱特性

**光谱响应特性** 光伏探测器的响应率与入射光波长之间的关系。

不同材料的光伏探测器，其光谱响应范围、灵敏波长等不同。

#### 6. 响应时间和频率特性

**响应时间的决定因素：**

- 扩散时间 $\tau_n$ ，约为  $10^{-9}$ s。
- 漂移时间 $\tau_d$ ，约为  $10^{-11}$ s。
- 外电路时间常数 $\tau_e$ ，是决定响应时间的主要因素。

**频率特性：**

$$f_{HC} = \frac{1}{2\pi\tau_e} \quad (4-13)$$

改善光伏探测器频率响应特性的重要措施：减小结电容 $C_j$ 和负载电阻 $R_L$ 。

**响应频率比较：**

- 硅光电二极管几百 MHz~上千 MHz。
- PIN 光电二极管~10GHz。
- 雪崩光电二极管 100GHz。

第4章 光伏探测器  
4.2 常用光伏探测器  
4.2.1 硅光电池

1. 光电池的概念

**光电池** 无外加偏压的光伏探测器。

光电池的分类：

- 太阳能光电池——主要用作电源，转换效率高，成本低。
- 测量光电池——主要用作光探测，光电特性的线性度好。

2. 光电池的结构

**基本结构：** 一个大面积的 PN 结。

**结构类型：**

- 2DR 型——以 N 型硅为受光面，以 P 型硅为衬底。
- 2CR 型——以 P 型硅为受光面，以 N 型硅为衬底。

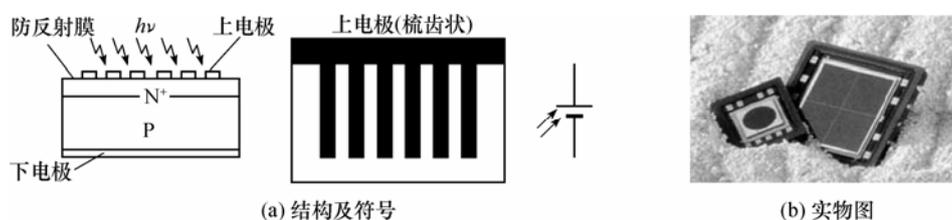


图 4-6 2DR 型硅光电池结构及图形符号

2. 硅光电池的基本特性

**光电特性：**

- 照度-电流电压特性——光电池的短路光电流 $I_{sc}$ 和开路电压 $U_{oc}$ 与入射光照度之间的关系。
- 照度-负载电阻特性——光电池在不同外接负载电阻条件下光电池短路电流与入射光照度之间的关系。

光电池的光照与负载电阻的特性关系：负载电阻越小，光电流和照度的线性关系越好，线性范围越宽；在一定负载电阻的条件下，光照越弱，其线性关系越好。

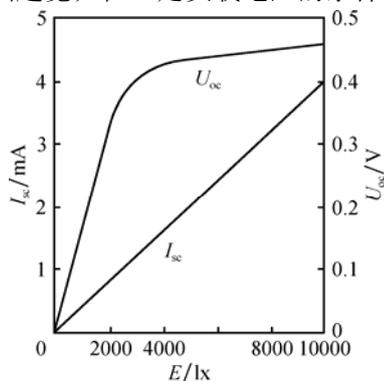


图 4-7 光电池的照度—电流电压特性

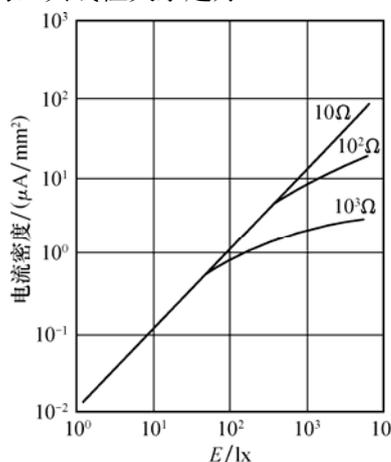


图 4-8 光电池的光照—负载电阻的特性

**光谱特性** 在入射光能量保持一定的条件下，光电池所产生的短路电流与入射光波长之间的关系，一般用相对响应表示。

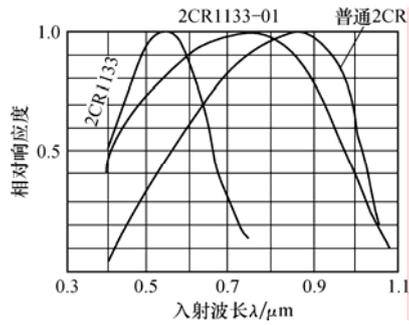


图 4-9 硅光电池及蓝硅光电池的光谱响应曲线

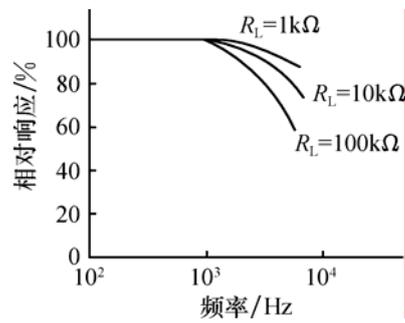


图 4-10 硅光电池的频率特性

**频率特性** 硅光电池的频率特性曲线如图 4-10 所示。图中，当  $R_L$  较大时，频率特性变差。硅光电池的最高截止频率仅为数十 kHz。

**温度特性** 光照射光电池时开路电压  $U_{oc}$  与短路电流  $I_{sc}$  随温度变化的关系。

光电池的参数值随工作环境温度改变而变化，如图 4-11 所示。开路电压  $U_{oc}$  具有负温度系数，短路电流  $I_{sc}$  具有正温度系数。因此，光电池作为探测器件时，测量仪器应考虑温度的漂移或进行补偿，以保证测量精度。

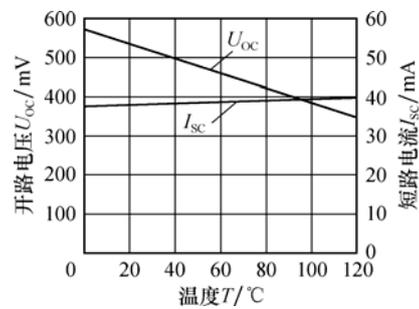


图 4-11 光电池的温度特性曲线

第4章 光伏探测器  
4.2 常用光伏探测器  
4.2.2 硅光电二极管

1. 光电二极管的结构和特点

**光电二极管** 工作在反偏的光伏探测器，简称 PD。

结构类型：

- 2CU 型——以 N-Si 为衬底。
- 2DU 型——以 P-Si 为衬底。

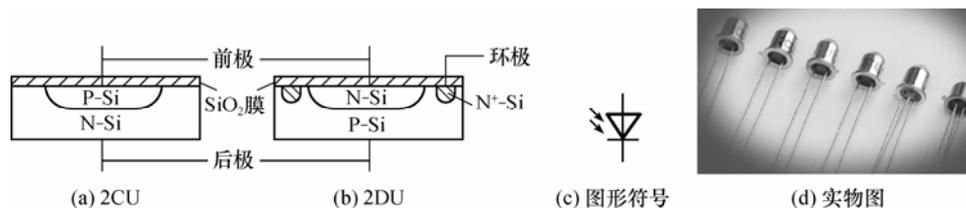


图 4-12 2CU、2DU 系列硅光电二极管的结构和图形符号

2. 硅光电二极管基本特性

**光电特性** 光电二极管外加反向偏压工作时的光电流与照度之间的关系。

光电二极管的光电特性线性较好，但光电流较小（微安量级），灵敏度较低。

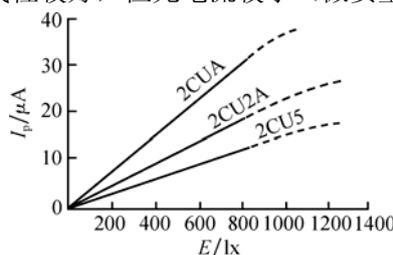


图 4-14 硅光电二极管光电特性曲线

**频率特性** 主要受电路时间常数的限制，即决定于负载电阻和结电容，频率响应比硅光电池高。

光电二极管和光电池特点的比较：

光电二极管	光电池
掺杂浓度较低	掺杂浓度高
电阻率较高	电阻率较低
结区面积小	结区面积大
通常多工作于反偏置状态	无偏置
结电容小，频率特性好	结电容大，频率特性差
光电流小，在微安量级	光电流大，在毫安量级

## 第4章 光伏探测器

### 4.2 常用光伏探测器

#### 4.2.3 硅光电三极管

##### 1. 硅光电三极管的概念

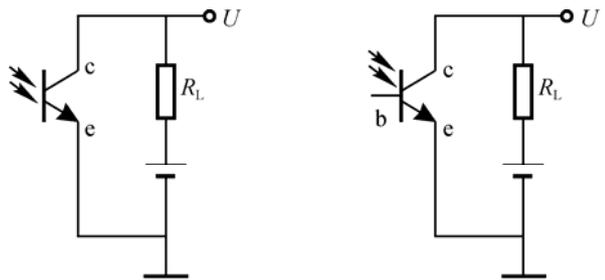
**硅光电三极管** 一种具有电流内增益的光伏探测器，又称为光电晶体管（Phototransistor，简称PT）。

结构类型：

- 3DU型——材料为NPN型晶体管。
- 3CU型——材料为PNP型晶体管。

##### 2. 硅光电三极管的结构

光电三极管的结构如图4-15所示。其引出线有e、c两极和e、c、b三极两种，后者的基极可以开路。若使用基极，光电三极管可同时加上电信号和光信号，进行双重控制，也可用来补偿温度变化，减小暗电流。



(a) 无基极引线光电三极管 (b) 有基极引线光电三极管

图4-15 3DU型光电三极管原理性结构图

##### 3. 硅光电三极管的工作原理

光电三极管的工作的两个过程：

- 光电转换——光照射在集电结上，产生电子—空穴对。由于集电结反向偏置，光生电子漂移到集电极，空穴流向基区，从而产生光电流 $I_p$ ，如图4-16(a)所示。
- 光电流放大——光生电动势使基极与发射极间电压升高，于是发射极便有大量电子经基极流向集电极，使光电流得以放大。

##### 4. 硅光电三极管基本特性

**光电特性** 在正常偏压下的集电极电流与入射光照度之间的关系。

光电三极管的灵敏度比光电二极管高，输出电流也比光电二极管大，多为毫安级。

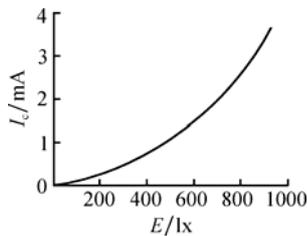


图4-17 光电三极管的光电特性曲线

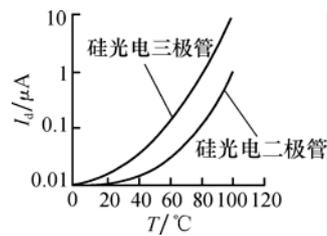


图4-18 光电三极管的温度特性曲线

**温度特性** 硅光电三极管的暗电流随温度的改变而变化，如图4-18所示。图中可见，硅光电三极管受温度的影响比光电二极管大得多。这是由于硅光电三极管有电流放大作用。

**频率特性** 硅光电三极管的最高截止频率仅为数百kHz。影响光电三极管频率响应的因素除与光电二极管的相同外，还受基区渡越时间和发射结电容的限制，因此频率特性比光电二极管差。

第4章 光伏探测器  
4.2 常用光伏探测器  
4.2.4 PIN 光电二极管

1. PIN 光电二极管的定义

**PIN 光电二极管** 一种快速光电二极管，简称 PIN PD。

2. PIN 光电二极管结构

在掺杂浓度很高的 P 型半导体和 N 型半导体之间夹着一层较厚的高阻本征半导体 I，其结构示意图如图 4-19 所示。

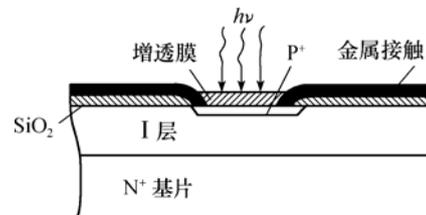


图 4-19 PIN 管结构示意图

3. PIN 光电二极管的特点及应用

**特点：**结电容变得更小，频率响应高，带宽可达 10GHz；线性输出范围宽。

**应用：**光通信、光雷达以及其他快速光自动控制领域。

动画[PIN光电二极管工作原理](#)。

第4章 光伏探测器  
4.2 常用光伏探测器  
4.2.5 雪崩光电二极管

1. 工作原理

工作原理：PN 结在高反向电压下产生的雪崩效应。

工作过程：

- 加高反压，约为 100~200 V。
- 结区内产生强电场，光生载流子在电场中被加速。
- 载流子与晶格原子碰撞产生电离，产生更多的电子空穴对。
- 再次重复碰撞，形成结电流的雪崩效应。

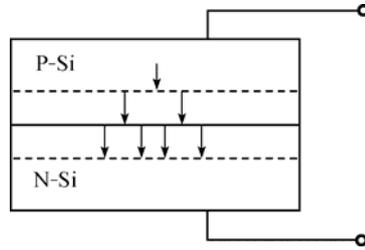


图 4-20 雪崩光电二极管工作原理示意图

动画 [雪崩光电二极管的工作原理](#)。

2. 雪崩增益

**雪崩增益** 有雪崩增益和无雪崩增益时流过雪崩光电二极管的反向电流之比。

$$M = I_M / I_0 \quad (4-14)$$

可近似表示为：

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_B}\right)^n} \quad (4-15)$$

雪崩增益  $M$  和暗电流与外加偏压  $U$  的关系：

- $U$  较低时，没有电流倍增现象；
- $U$  接近  $U_B$ ，有很大的倍增；
- $U$  超过  $U_B$ ，暗电流的雪崩电流急剧上升，发生击穿，器件输出很大的噪声电流。

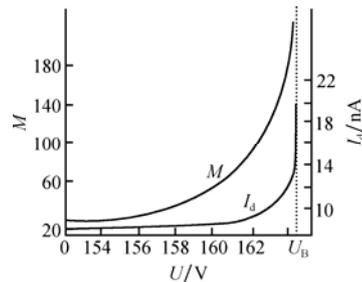


图 4-21 雪崩增益和暗电流与外加偏压关系

3. 噪声特性

雪崩光电二极管的噪声主要包括散粒噪声、由雪崩过程引入的附加噪声和负载电阻  $R_L$  的热噪声。表达式为：

$$\overline{i_n^2} = 2eIM^k\Delta f + \frac{4kT\Delta f}{R_L} = 2e(I_d + I_p)M^k\Delta f + \frac{4kT\Delta f}{R_L} \quad (4-16)$$

输出信噪比：

$$SNR = \frac{I_p^2 M^2}{2e(I_d + I_p)M^k\Delta f + \frac{4kT\Delta f}{R_L}} \quad (4-17)$$

4. 响应时间

雪崩光电二极管的响应速度特别快。一般硅管的响应时间约为 0.05~2.0nS。

## 第4章 光伏探测器

### 4.2 常用光伏探测器

#### 4.2.6 紫外光电二极管

紫外光电二极管一般采用浅 PN 结和肖特基结的结构。

- 蓝、紫增强型硅光电二极管

已经研制的蓝、紫光增强型硅光电二极管，具有 PN 结浅、电子扩散长度大和表面复合速率小三方面的优点。目前生产的 S1336、S1337 系列紫外光电二极管的光谱范围 190~1100 nm，暗电流 50~500pA。

- 肖特基结光电二极管

肖特基势垒是由金属与半导体接触形成的。一般利用金或铝分别与 Si、Ge、GaAs、GaAsP、GaP 等半导体材料接触，制得各种肖特基结光电二极管，其光谱范围为 190~760 nm，暗电流为 50~1000pA。

紫外光电二极管已广泛应用于激光辐射探测、天文物理、光谱学、医学生物等研究领域。

## 第4章 光伏探测器

### 4.2 常用光伏探测器

#### 4.2.7 碲镉汞、碲锡铅红外光电二极管

碲镉汞、碲锡铅红外光电二极管是响应于中红外波段特别对  $8\sim 14\mu\text{m}$  波段灵敏的光伏探测器。

PV-HgCdTe是以P型HgCdTe材料为衬底，在表面一层扩散Hg，使其表面形成N型层，从而构成PN结。目前制作的PV-HgCdTe器件可分别工作于室温（300K）和液氮温度，其响应波长可覆盖  $1\sim 14\mu\text{m}$ 。工作于 77K的PV-HgCdTe，其工作波段为  $8\sim 14\mu\text{m}$ ，峰值波长为  $10.6\mu\text{m}$  左右，是目前探测  $10.6\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$ 激光灵敏度最高、响应最快的较理想的光子探测器。PV-HgCdTe可以工作于零偏和反向偏压的情况。

PV-Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te可以通过改变组分 $x$ 及器件温度来得到不同的光谱特性。通常PV-PbSnTe工作温度可以有 15K、77K等。其光谱响应范围也是  $8\sim 14\mu\text{m}$ ，相应的  $D_p^*$  可达  $4\times 10^{10}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。

PV-HgCdTe与PV—PbSnTe可以制作单元器件、线阵和面阵的器件，它们都是红外成像系统中重要的探测器。

第4章 光伏探测器  
 4.3 光伏探测器组合器件  
 4.3.1 半导体色敏感器件

1. 半导体色敏器件的结构原理

结构：在同一块硅片上制造两个深浅不同的 PN 结：

- PD<sub>1</sub>为浅结，它对波长短的光响应率高；
- PD<sub>2</sub>为深结，它对波长长的光响应率高。

这种结构相当于两个光电二极管反向串联，所以又称为双结光电二极管。

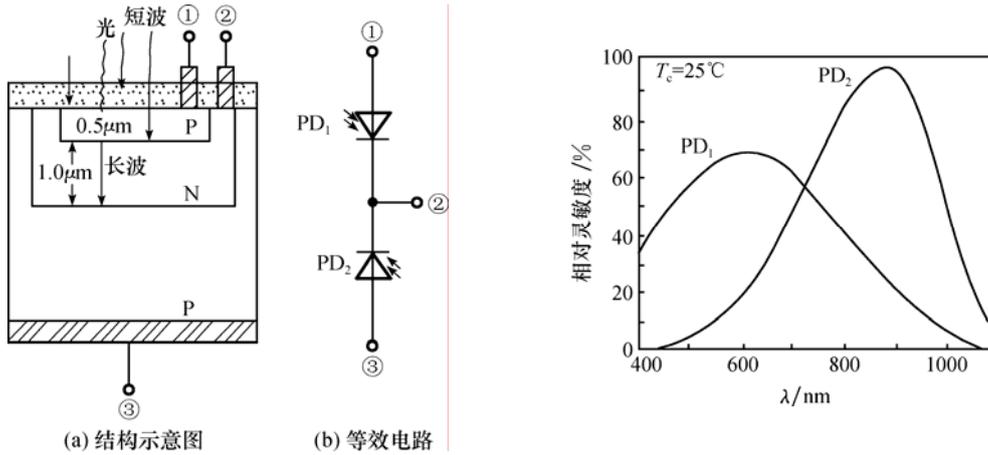


图 4-22 双结光电二极管半导体色敏器件

图 4-23 双结硅光电二极管的光谱响应特性

2. 双结硅色敏器件的检测电路

对应于不同颜色波长的输出电压值为：

$$U_0 = U_T (\lg I_{sc2} - \lg I_{sc1}) \frac{R_2}{R_1} \quad (4-18)$$

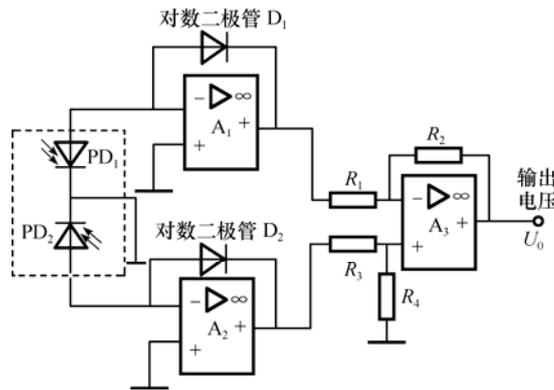


图 4-24 双色硅色敏器件信号处理电路

单色光波长的识别：

- 测出其中两个硅光电二极管的短路电流比的对数值( $\lg(I_{sc2} / I_{sc1})$ )与入射光波长的关系，如图 4-25 所示。根据短路电流比值的不同来判别入射光的波长。
- 测出信号处理电路的输出电压，确定被测光的波长并识别颜色。输出电压  $U_0$  与入射波长之间的关系，如图 4-26 所示。

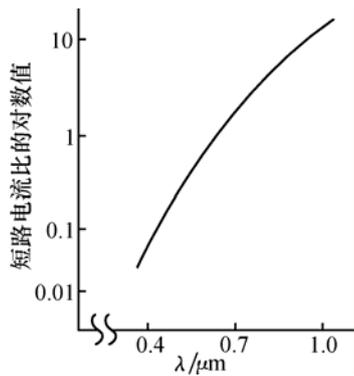


图 4-25 短路电流比与入射波长的关系曲线

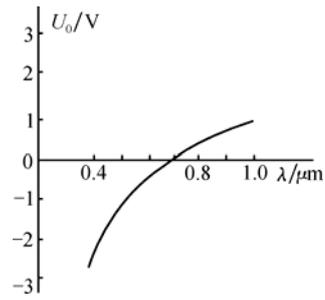


图 4-26 入射波长与输出电压  $U_0$  的关系

**混合色光波长的识别：**图 4-27 所示为集成全色色敏器件的结构示意图，它是在同一块非晶硅基片上制作 3 个深浅不同的 PN 结，并分别配上红、绿、蓝 3 块滤色片而构成一个整体，光谱响应曲线如图 4-28 所示。通过 R、G、B 这 3 个不同结输出电流的大小比较识别各种颜色。

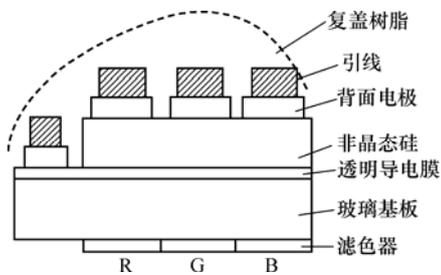


图 4-27 集成全色色敏器件的结构示意图

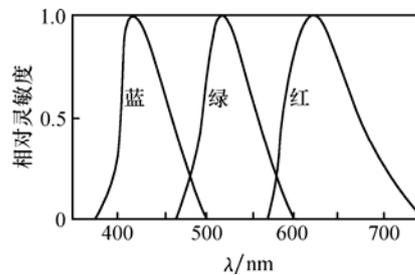


图 4-28 集成全色色敏器件的光谱特性

### 3. 半导体色敏器件的特点及应用

**特点：**结构简单、体积小、成本低等。

**应用：**在工业上可以自动检测纸、纸浆、染料的颜色；医学上可以测定皮肤、牙齿等的颜色；家电中电视机的彩色调整、商品颜色及代码的读取等。

## 第4章 光伏探测器

### 4.3 光伏探测器组合器件

#### 4.3.2 阵列式光电器件

**阵列式的光电器件** 利用集成电路技术将2个或2个以上的光电器件排成一行，集成在一块集成电路上，即成为阵列式的光电器件。

**阵列式的光电器件的特点及应用：**

- 光敏元密集度大，总尺寸小，容易做到各单元参数一致，便于进行信号处理。
- 辨别光点移动的方向。
- 摄取光点移动的相位信息。
- 摄取一维的光学图像或用作空间频谱分析。

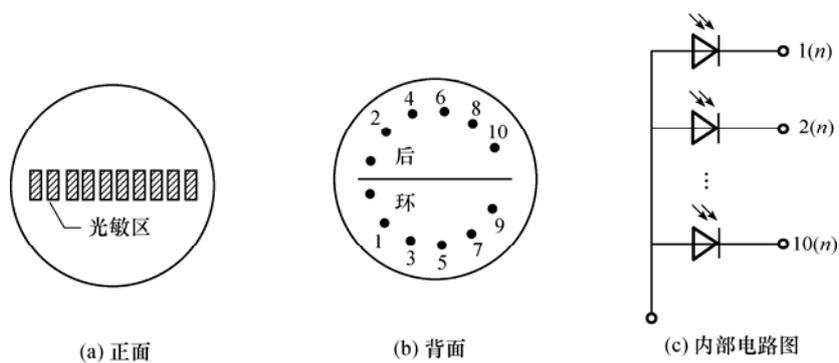


图 4-29 10DP 型光电二极管阵列器件

第4章 光伏探测器  
4.3 光伏探测器组合器件  
4.3.3 象限式光电器件

**象限式光电器件** 利用集成电路技术，将一个圆形或方形的光敏面窗口分隔成象限式区域，每一个区域置一个区域型光电器件。

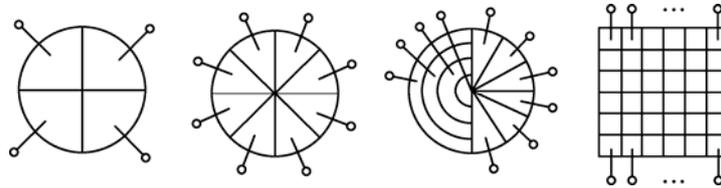


图 4-30 各种象限式光电器件示意图

**工作原理**（以四象限为例）：

- 若入射光为正中心 0，4 个象限的 PD 输出均等；
- 若偏于 1 象限，则第一象限的 PD 输出较大，其余均较小。

**象限式光电器件的应用**：用于准直、定位、跟踪或频谱分析等。

## 第4章 光伏探测器

### 4.3 光伏探测器组合器件

#### 4.3.4 光电位置探测器

##### 1. 光电位置探测器的结构和工作原理

**光电位置探测器** 利用离子注入技术制成的一种对入射到光敏面上的光点位置敏感的光电器件，简称 PSD (Position Sensitive Detectors)，分一维和二维两种。

一维 PSD 位置探测公式：

$$\begin{cases} I_1 = \frac{L-x}{2L} I_0 \\ I_2 = \frac{L+x}{2L} I_0 \\ x = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} L \end{cases} \quad (4-19)$$

二维 PSD 位置探测公式：

$$\begin{cases} x = \frac{I_B - I_A}{I_A + I_B} L \\ y = \frac{I_D - I_C}{I_C + I_D} L \end{cases} \quad (4-20)$$

##### 2. 光电位置探测器的特点及应用

特点：

- 对光斑的形状无严格要求。
- 光敏面上无象限分隔线，对光斑位置可进行连续测量，位置分辨率高。
- 可同时检测位置和光强。

应用：

- 激光的监控（对准、位移、振动）。
- 平面度的检测、倾斜度的检测和二维位置的检测系统等。

## 第4章 光伏探测器

### 4.3 光伏探测器组合器件

#### 4.3.5 光电耦合器

##### 1. 光电耦合器的定义和结构

**光电耦合器** 发光器件与光接收器件组合的一种器件。发光器件常采用发光二极管；接收器件常用光电二极管、光电三极管及光集成电路等。

##### 光电耦合器的结构：

- 接收器为光电二极管，命名为 GD-210 系列光电耦合器，如图 4-33 (a)所示；
- 接收器为光电三极管，命名为 GD-310 系列光电耦合器，如图 4-33 (b)所示；
- 接收器为光电二极管—高速开关三极管组件，如图 4-33 (c)所示；
- 接收器为光电三极管—达林顿晶体管组件，如图 4-33 (d)所示；
- 接收器为光集成电路，如图 4-33 (e)所示。

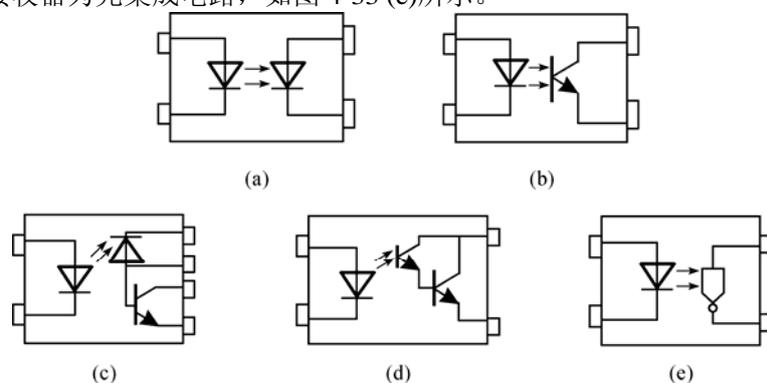


图 4-33 几种光电耦合器原理图

##### 2. 光电耦合器的特点及应用

**特点：**体积小、寿命长、无触点、抗干扰能力强、输出和输入之间隔离、可单向传输信号等特点。

**应用：**隔离电路、开关电路、数模转换电路、逻辑电路及长线传输、高压控制、线性放大、电平匹配等单元电路。

## 第4章 光伏探测器

### 4.4 光伏探测器的偏置电路

#### 4.4.1 自偏置电路

偏置电路的三种主要形式：

- 自偏置电路
- 零伏偏置电路
- 反向偏置电路

##### 1. 自偏置电路的定义

**自偏压** 光伏探测器的输出电流 $I$ 流过外电路负载电阻产生的压降 $IR_L$ 是它自身的正向偏压。

**自偏置电路** 具有自偏压特性的电路，如光电池的工作电路，如图 4-34 所示。

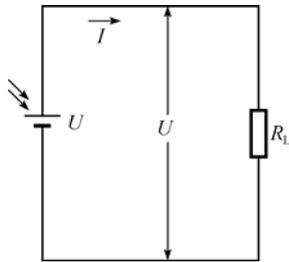


图 4-34 光电池自偏置电路

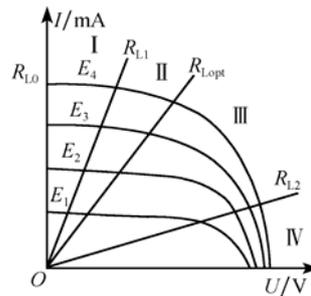


图 4-35 光电池伏安特性及直流负载线

##### 2. 光电池的工作特性

光电池的伏安特性曲线如图 4-35 所示。图中作出不同负载电阻 $R_{L0}$ 、 $R_{L1}$ 、 $R_{L2}$ 和 $R_{Lopt}$ 的直流负载线，这些负载线将光电池的工作状态分为 I、II、III、IV 四个区域。

##### I 区域：短路或线性电流放大区

**线性放大区：**负载电阻较小，其输出电流与光照有较好的线性关系

**线性放大区的特点：**线性好、输出光电流大，暗电流近似为零、信噪比好，适合于弱光信号的检测。

##### IV 区域：空载电压输出区

**空载电压输出区：**负载电阻很大，近似于开路（ $R_L \rightarrow \infty$ ），光电池输出电流 $I = 0$ 。

**空载电压输出区的特点：**具有很高的光电转换灵敏度，不需要增加任何偏置电源，适合于开关电路或继电器控制电路。

##### III 区域：功率放大区

**功率放大区：**当负载电阻取某一电阻值 $R_{Lopt}$ 时，光电池可以获得最大输出功率。

光电池工作在这个区域，能将光能有效地转换成电能给负载供电。

**总结：**工作在 I 和 IV 区域，具有光电探测的功能

工作在 III 区域，具有太阳能光电池的功能。

光电池作为线性测量使用时，I 区域是最佳的工作状态。

## 第4章 光伏探测器

### 4.4 光伏探测器的偏置电路

#### 4.4.2 零伏偏置电路

##### 1. 零伏偏置电路的定义

**零伏偏置** 光伏探测器在自偏置的情况下，若负载电阻为零，自偏压为零。

**接近于零伏偏置** 光伏探测器反偏置的情况下，反偏压很小或接近零。

**零伏偏置电路** 具有零伏偏置或接近于零伏偏置特性的电路。

##### 2. 零伏偏置电路特点

**特点：**  $1/f$  噪声最小，暗电流为零，有较高的信噪比。

**应用：** 光谱响应在中远红外波段的光伏探测器常工作在零伏偏置或接近于零伏偏置的状态，例如，工作于  $3\sim 5.5\mu\text{m}$  波段的 PV-InSb(77K) 和  $8\sim 14\mu\text{m}$  波段的 PV-HgCdTe (77K) 等。

##### 3. 零伏偏置电路实例

**例 4-1.** 利用运算放大器实现的零伏偏置电路。

图 4-38 所示为一种由运算放大器实现的零伏偏置电路。

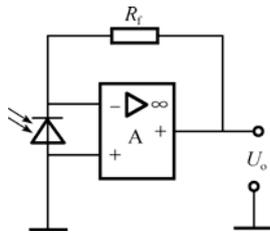


图 4-38 用运算放大器实现零伏偏置电路

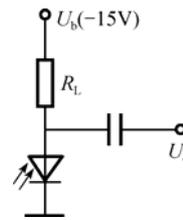


图 4-39 InSb(PV)探测器零偏置电路

**例 4-2.** InSb 光伏探测器的零偏置电路。

图 4-39 所示为 PV-InSb(77K) 光伏探测器的零偏置电路。

静态时，由探测器的反向漏电流在负载上的压降给探测器附加一个正向偏置电压，为了获得零偏的状态，需要外加反向偏压来抵消反向漏电流的影响。

设探测器的静态工作电流为  $I_D$ ，静态工作电压为  $U_D$ ，则直流负载线方程为

$$U_D = U_b - I_D R_L \quad (4-25)$$

要使探测器处于零偏置状态，则取  $U_D = 0$ ， $I_D = I_0$ ， $I_0$  为探测器的反向漏电流。

**注意：** 零伏偏置电路只适合对微弱辐射信号的检测，不适合较强辐射的探测领域。

## 第4章 光伏探测器

### 4.4 光伏探测器的偏置电路

#### 4.4.3 反向偏置电路

##### 1. 反向偏置电路的定义和特点

**反向偏置电路** 光伏探测器在外加偏压时，N区接正端，P区接负端的电路。

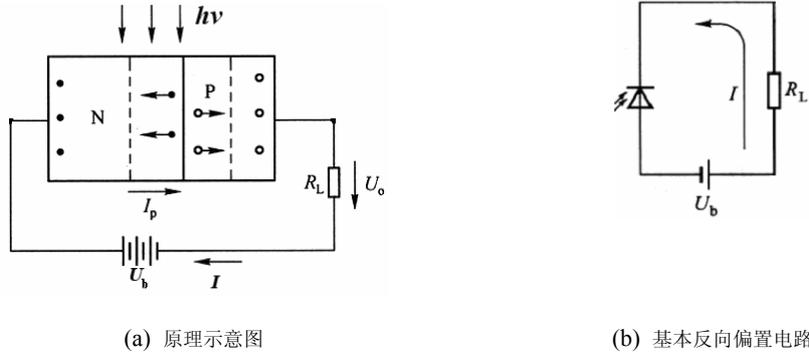


图 4-40 光伏探测器反向偏置电路

**反向偏置电路的特点：**灵敏度高、频带宽和光电变换线性范围较大。

##### 2. 基本反向偏置电路

以光电二极管为例，得到光电二极管的端电压方程为：

$$U(I) = U_b - IR_L \quad (4-26)$$

选择负载电阻 $R_L$ 和偏置电压 $U_b$ 的方法：

- **标出拐点  $M$** ——最大入射光照时对应曲线上的线性和非线性的转折点，如图 4-43 所示。负载电阻可用下式表示为：

$$R_L = \frac{U_b - U_M}{I_M} \quad (4-27)$$

- **功耗限制**

$$R_L \geq U_b^2 / 4P_{\max} \quad (4-28)$$

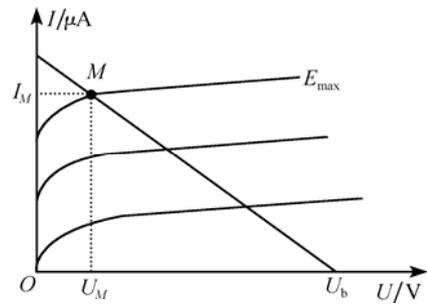


图 4-43 计算偏置电阻 $R_L$ 方法示意图

图解分析方法直观、方便，适应于检测恒定或缓慢变化的入射光信号的直流电路，特别适应大信号状态下的电路分析。

##### 3. 反偏光电二极管的跨阻抗放大电路

反偏光电二极管的跨阻抗放大电路如图 4-44 所示。图中，运放的同相端和反相端虚短，偏置电压 $U_b$ 和光电二极管构成了反偏电路。输出电压为：

$$U_o = -I_p R_f \quad (4-29)$$

**电路特点：**

——与基本反向偏置电路相比：

- 极小的负载电阻 ( $r_i$ )；

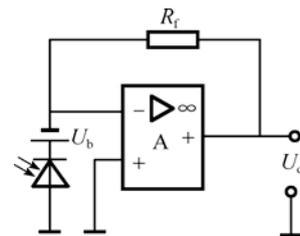


图 4-44 反偏光电二极管跨阻抗放大电路

- 不易出现信号失真；
- 输出较大的电压信号。

——与零伏偏置电路相比：

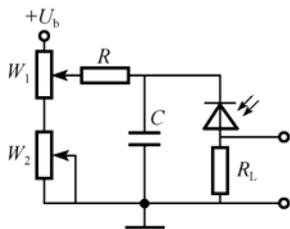
- 较高的反向工作偏压 ( $U_b$ )；
- 光电二极管结电容较小，响应速度快；
- 较大线性响应动态范围。

**电路应用** PIN-FET 微型组件（采用 PIN 光电二极管和输入级为场效应管（FET）的跨阻放大电路组合件），这种组件具有频率响应宽、信噪比高、输出阻抗低和可靠性高等特点，被广泛应用于光纤通信、激光雷达、激光测距和光纤分布式测温等系统。

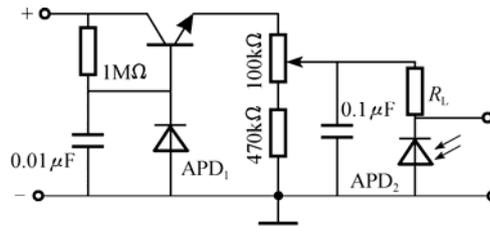
#### 4. 雪崩光电二极管的反向偏置电路

图 4-45(a)所示为可调偏压电路，其中  $W_1$  和  $W_2$  组成分压电路，分别用来对工作点进行粗调和细调， $R$  为保护 APD 的限流电阻，电容  $C$  可对加在雪崩管上的偏压起滤波作用， $R_L$  为负载电阻。

图 4-45 (b)所示为温度稳定偏压电路。它是一种采用双芯片雪崩光电二极管的温度补偿电路。其中， $APD_1$  作温度补偿使用， $APD_2$  作光电探测用。这一电路可在较宽的温度范围（ $-40^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ ）内自动稳定偏压。



(a) 可调偏压电路



(b) 温度稳定偏压电路

图 4-45 APD 的偏置电路

## 第5章 光电子发射探测器

### 5.0 本章知识要点

#### 1. 光电阴极的定义及分类:

常规光电阴极、负电子亲和势光电阴极

#### 2. 光电倍增管的结构:

光窗、光电阴极、光电子光学系统、电子倍增管、阳极

#### 3. 光电倍增管的主要特性参数:

灵敏度、电流增益、光电特性、光谱特性、伏安特性、响应时间和频率特性、暗电流、疲劳特性、噪声特性

#### 4. 光电倍增管的工作电路及应用:

高压供电电路、信号输出电路

## 第5章 光电子发射探测器

### 5.1 光电阴极

#### 1. 光电阴极的概念

**光电阴极** 光电发射器件中的光电子发射体。

**光电子发射体** 具有光电发射效应的材料。

光电阴极的分类：

- 常规光电阴极——电子亲和势大于0的光电子发射体。
- 负电子亲和势光电阴极——电子亲和势小于0的光电子发射体。

#### 2. 常规光电阴极的分类

- 银-氧-铯 (Ag-O-Cs) 材料——最早的光电阴极，主要应用于近红外探测。
- 单碱铯化物——以 CsSb 阴极最为常用，在紫外和可见光区的灵敏度最高。
- 多碱铯化物——Sb-Na-K-Cs 是最实用的一种光电阴极材料，高灵敏度、宽光谱、红外端延伸到 930nm，用于宽带光谱测量仪。
- 紫外光电阴极——只对所探测的紫外辐射信号灵敏，而对可见光无响应，通常称为“日盲”型光电阴极。

#### 3. 负电子亲和势光电阴极 (NEA)

##### 负电子亲和势的形成

表面 N 型材料自由电子较多，衬底 P 型材料自由空穴较多，它们间因存在浓度差而互相扩散，形成表面电荷的局部耗尽，耗尽区内发生能带弯曲。产生能带弯曲后的电子亲和势表示为：

$$E_{Ac} = E_0 - E_{c1} = E_{A2} - E_d \quad (5-1)$$

如果掺杂浓度足够高，使得能带弯曲足够大，则可使能带弯曲度  $E_d > E_{A2}$ ，从而  $E_{Ac} < 0$ ，这样就形成了负电子亲和势。

##### 负电子亲和势光电阴极的工作原理：

- 热电子的产生——价带中的电子吸收光子能量后跃迁到导带底以上，成为热电子；
- 冷电子的形成——热电子因碰撞散射发生能量损失，很快落到导带底而变成冷电子；
- 冷电子的逸出——克服电子亲和势逸出。

##### NEA 光电阴极的优点

- 量子效率高。
- 阈值波长延伸到红外区 ( $\lambda_0 > 1\mu\text{m}$ )。
- 由于冷电子发射，能量分散性小，在成像器件中分辨率极高。
- 暗电流极小。
- 延伸的光谱响应区内其绝对灵敏度均匀。

电子亲和势 半导体导带底部到真空能级间的能量值，用  $E_A$  表示。

光电发射效应 当金属或半导体受到光照时，电子从材料表面逸出的现象。

热电子 受激电子能量超过导带底的电子。

冷电子 能量恰好等于导带底的电子。

## 第 5 章 光电子发射探测器

### 5.2 光电管和光电倍增管的结构原理

#### 5.2.1 光电管

**光电管** 由玻璃外壳、光电阴极和阳极组成的光电子发射探测器。

**光电管的特点：**管子体积较大，工作电压高达百伏到数百伏，玻璃外壳容易破碎，目前已基本被半导体光电器件代替。

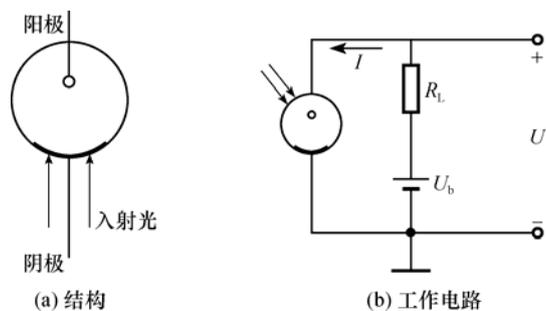


图 5-2 真空光电管

## 第5章 光电子发射探测器

### 5.2 光电管和光电倍增管的结构原理

#### 5.2.2 光电倍增管

##### 1. 光电倍增管的结构

**光电倍增管** 内部有电子倍增机构的真空光电管，简称 PMT。主要由光窗、光电阴极、电子光学系统、电子倍增系统和阳极组成。

**光窗** 入射光的窗口，可分为侧窗式和端窗式两种。光窗材料决定了倍增管的短波阈值。

**光电阴极** 进行光电转换，决定了光电倍增管的长波阈值，对整管灵敏度起决定性作用。

**电子光学系统** 通过电场加速和控制电子运动路线。作用是使使下一级的收集率接近于 1；使落到后一级上的各部分电子渡越时间零散最小。

**电子倍增极** 由多个倍增极组成的倍增系统，是决定倍增管灵敏度最关键的部分。

**阳极** 收集最末一级倍增极发射出来的二次电子，通过引线向外电路输出电流。

##### 2. 倍增原理

入射光照射到光电阴极 K 上，发射光电子，经电子光学系统加速，聚焦到倍增极上，发射出多个二次电子；电子经 n 级倍增极，形成放大的阳极电流，在负载 RL 上产生放大的信号输出。

**二次电子发射** 具有足够动能的电子轰击某些材料时，材料表面将发射出新的电子，这种现象被称为二次电子发射。

**一次电子** 轰击材料的入射电子。

**二次电子** 从材料表面发射出的电子。

**二次电子发射系数  $\delta$**  描述二次电子发射能力的参量，其定义为

$$\delta = \frac{n_2}{n_1} = \frac{i_2}{i_1} \quad (5-3)$$

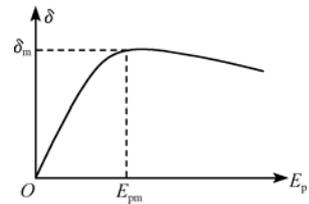


图 5-6 二次发射系数与一次电子能量的关系

各种不同材料的  $\delta_m$ ：

- 金属：0.5~1.8；
- 半导体和介质：5~6；
- 负电子亲和势材料：500~。

##### 3. 倍增极的材料和结构

**倍增材料**：灵敏的光电发射体，也是良好的二次电子发射体。

**倍增极的结构**：倍增极一般由几级到十五级组成，可分为聚焦型和非聚焦型两类。如图 5-7 所示，聚焦型分为直瓦片式和圆瓦片式两种，非聚焦型分为百叶窗式和盒栅式两种。

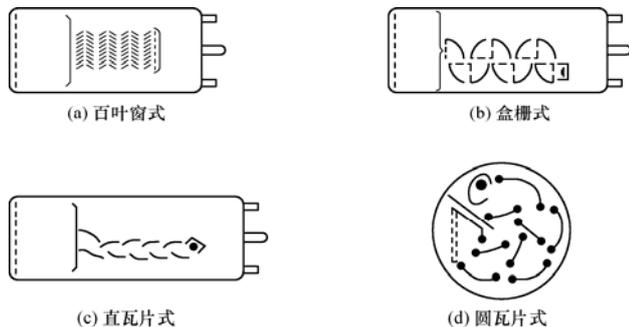


图 5-7 光电倍增管的倍增极结构

## 第5章 光电子发射探测器

### 5.3 光电倍增管的主要特性参数

#### 1. 灵敏度

**灵敏度** 可分为阴极灵敏度与阳极灵敏度，是衡量光电倍增管探测光信号能力的一个重要参数。

表 5-3 光电倍增管的灵敏度

灵敏度		公式	说明
阴极灵敏度	阴极光谱灵敏度	$S_K(\lambda)=I_{K\lambda}/\Phi(\lambda)$	式中， $S$ 为灵敏度； $\lambda$ 为波长； $I$ 为电流； $\Phi$ 为光通量； $\Phi(\lambda)$ 为光谱光通量 下标 K 表示阴极； 下标 A 表示阳极。
	阴极积分灵敏度	$S_K=I_K/\Phi$	
阳极灵敏度	阳极光谱灵敏度	$S_A(\lambda)=I_{A\lambda}/\Phi(\lambda)$	
	阳极积分灵敏度	$S_A=I_A/\Phi$	

#### 灵敏度的测试

- 阴极灵敏度测试 以阴极为一极，其它倍增极和阳极都连到一起为另一极，相对于阴极加 100~ 300V 直流电压。
- 阳极灵敏度测试 各倍增极和阳极都加上适当电压，注明整管所加的电压。
- 积分灵敏度测试 与光源的色温有关，一般多用色温为 2856K 的白炽钨丝灯。

#### 2. 电流增益

**电流增益  $M$**  阳极电流与阴极电流之比，即

$$M = \frac{I_A}{I_K} = \frac{S_A \Phi}{S_K \Phi} = \frac{S_A}{S_K} \quad (5-4)$$

**电流增益的稳定性：**

电流增益与光电倍增管所加电压  $U$  的关系为

$$M = \varepsilon_0 \left[ \varepsilon \cdot C \cdot \left( \frac{U}{n+1} \right)^k \right]^n = A \cdot U_d^{kn} \quad (5-9)$$

$U_d$  为级间电压且设为相等。则有：

$$\frac{dM}{M} = kn \frac{dU_d}{U_d} \quad (5-10)$$

一般情况下， $n=9\sim 12$ ，电源电压的稳定度要优于测量精度一个数量级。

#### 3. 光电特性

**光电特性** 阳极光电流与入射于光电阴极的光通量之间的函数关系。

光电倍增管只适于弱光的探测，其线性范围对于模拟量测量很重要，线性范围越宽，越能保证光电流与光照在大范围内保持线性关系。

#### 4. 光谱特性

光电倍增管的光谱响应取决于光电阴极的材料。

长波限决定于光电阴极材料，短波限决定于光窗材料。

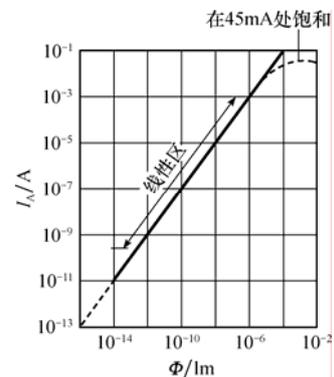


图 5-8 391-A 光电倍增管的光电特性曲线

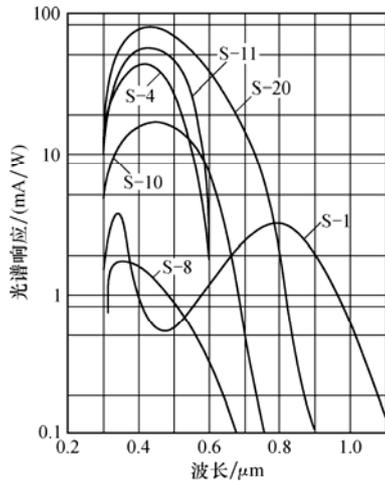


图 5-9 几种常用光电阴极的光谱特性曲线

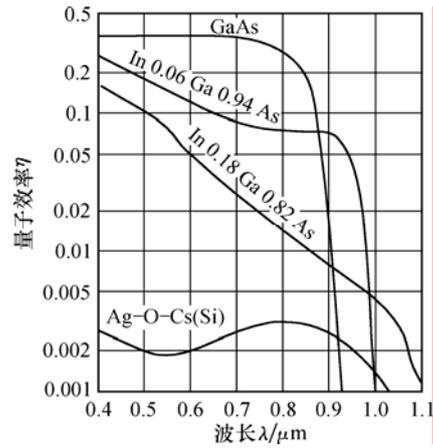


图 5-10 几种负电子亲和势光电阴极光谱特性曲线

### 5. 伏安特性

**阴极伏安特性** 阴极电流与阴极电压之间的关系曲线。

**阳极伏安特性** 阳极电流与阳极电压的关系曲线。

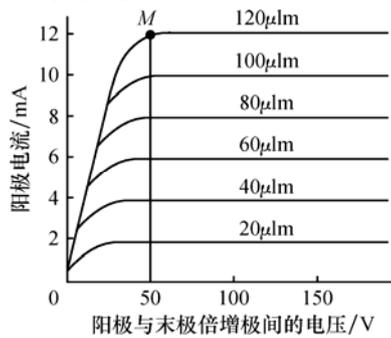
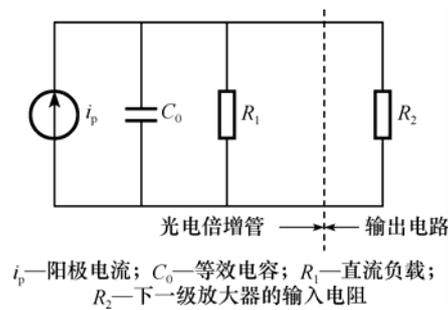


图 5-11 阳极伏安特性曲线



$i_p$ —阳极电流； $C_0$ —等效电容； $R_1$ —直流负载； $R_2$ —下一级放大器的输入电阻

图 5-12 光电倍增管交流微变等效电路

### 6. 时间特性和频率特性

**响应时间** 光电倍增管在  $\delta$  函数光脉冲照射下，其阳极输出电流从脉冲峰值的 10% 上升到 90% 所需的时间。

**渡越时间** 从  $\delta$  函数光脉冲的顶点到阳极电流输出电流达到峰值所经历的时间。

**渡越时间分散（散差）** 在重复光脉冲输入时，光电阴极发射的电子到达阳极的渡越时间的起伏。

几种光电倍增管的时间特性如表 5-4 列所示。

表 5-4 几种光电倍增管的时间特性 (单位: ns)

结 构	上升时间	渡越时间	渡越时间散差
直线聚焦型	0.7~3	1.3~5	0.37~1.1
环形聚焦型	3.4	31	3.6
盒栅型	~7	57~70	~10
百叶窗型	~7	60	~10

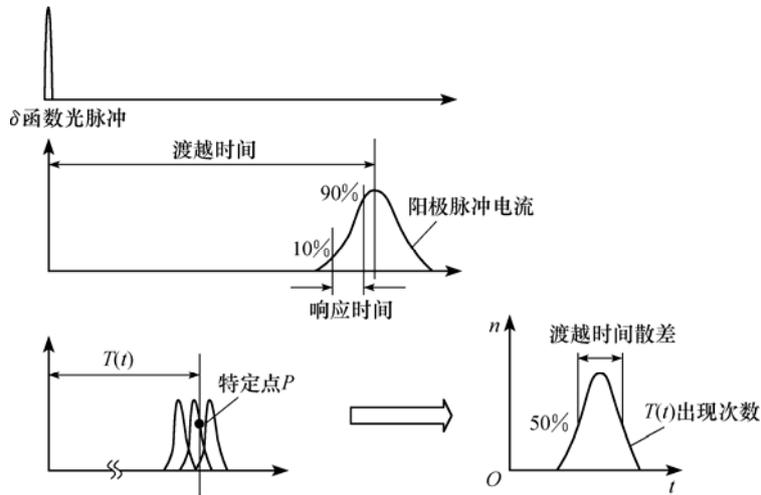


图 5-13 光电倍增管的响应时间、渡越时间和渡越时间散差

**截止频率** 光电倍增管对光信号的响应决定于倍增管的响应时间和输出电路的时间常数。当电路时间常数远大于上述响应时间时，倍增管的上限截止频率为

$$f_{HC} = 1/\tau_c = 1/(2\pi C_0 R_L) \quad (5-11)$$

#### 7. 暗电流

光电倍增管的暗电流可分为有阴极暗电流与阳极暗电流。一般使用比较多的是阳极暗电流。

**阳极暗电流** 各电极都加上正常工作电压，阴极无光照时阳极的输出电流。暗电流限制了可测的直流光通量的最小值，是产生噪声的重要原因。

减少暗电流的方法：

- 选好光电倍增管的极间电压。
- 在阳极回路中加上与暗电流相反的直流成份来补偿。
- 在倍增输出电路上加一选频或锁相放大滤掉暗电流。
- 利用冷却法减小热电子发射等。

#### 8. 疲劳特性

**疲劳** 管子长期连续工作或受强光照射，其灵敏度不能再恢复。

光电倍增管的灵敏度随工作时间的延长而下降，管子不使用时，应存放在黑暗的环境中，使用时忌强光照射。

#### 9. 噪声与噪声等效功率

**光电倍增管的噪声** 包括器件本身的散粒噪声、闪烁噪声以及热噪声等。

倍增管的噪声主要是散粒噪声，包括阴极电流产生的散粒噪声和各级倍增极产生的散粒噪声。

倍增管阳极散粒噪声的均方值  $\overline{i_{nA}^2}$  为：

$$\overline{i_{nA}^2} = \overline{i_{nDn}^2} = 2eM^2 I_K \Delta f K = 2eMI_A \Delta f K \quad (5-19)$$

式中， $K = \delta/(\delta - 1)$  称为噪声增强因子。

如果第一倍增极的倍增系数为  $\delta_1$ ，其它各倍增极的倍增系数为  $\delta$ ，则得

$$K = 1 + \frac{\delta}{\delta_1(\delta - 1)} \quad (5-20)$$

增大 $\delta_1$ （即在倍增管的阴极与第一倍增极之间加较高的电压），可以提高倍增管的输出信噪比。

### 噪声等效功率

光电倍增管的噪声等效功率

$$\text{NEP} = \frac{(2eM^2I_K\Delta fK)^{1/2}}{S_A} = \frac{(2eI_K\Delta fK)^{1/2}}{S_K} \quad (5-22)$$

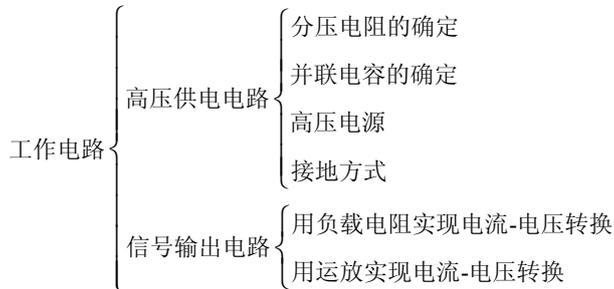
式中， $S_A$ 和 $S_K$ 分别为阳极灵敏度和阴极灵敏度。

## 第5章 光电子发射探测器

### 5.4 光电倍增管的工作电路及应用

#### 5.4.1 高压供电电路

1. 光电倍增管工作电路的分类:



2. 高压供电电路

光电倍增管各电极要求直流供电，从阴极开始至各个倍增极的电压依次升高，一般采用电阻链分压的办法来供电。

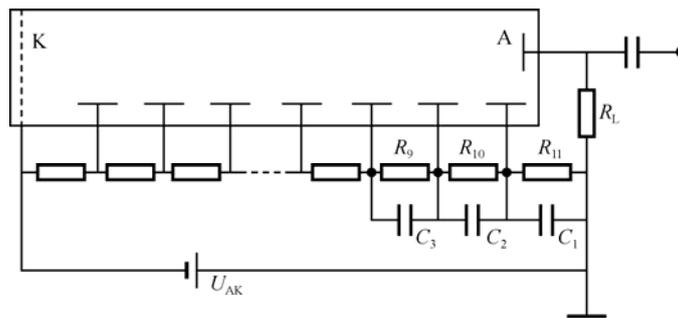


图 5-14 光电倍增管供电电路

工作电压的确定:

- 总电压  $U_{AK}$  : 1000~1500 V;
- 各个倍增极的极间电压  $U_D$ : 80~100V。

分压电阻的确定: 若电阻链为均匀分压, 则分压电阻的阻值需满足下式:

$$I_R \geq (10 \sim 20) I_{A \max} \quad (5-23)$$

并联电容的确定: 如果将光电倍增管用于探测光脉冲, 则最后几级倍增极瞬间电流很大, 会造成极间电压不稳。因此, 常在最后几级并联旁路电容  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 。各电容值需满足下式:

$$C_1 \geq \frac{\Delta Q_1}{\Delta U_d} = \frac{I_A \Delta t}{\frac{1}{kn} \Delta M} \quad (5-24)$$

$$C_2 \geq \frac{\Delta Q_2}{\Delta U_d} = \frac{\frac{1}{\delta} I_A \Delta t}{\frac{1}{kn} \Delta M} = \frac{1}{\delta} C_1 \quad (5-25)$$

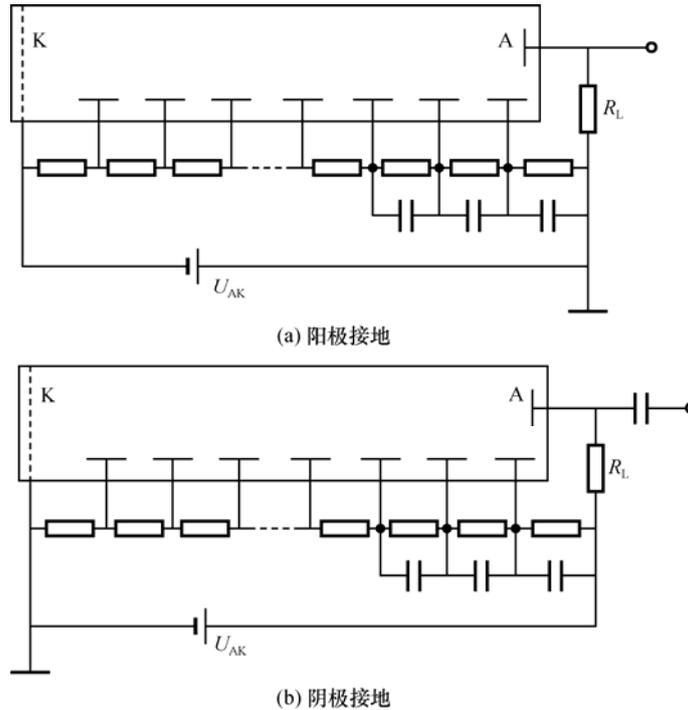
$$C_3 = \frac{1}{\delta^2} C_1 \quad (5-26)$$

$I_A$ 为阳极脉动电流幅度,  $\Delta t$ 为脉冲宽度。通常, 这些电容的容值取值范围为 0.002—0.005  $\mu$ F。

**高压电源:** 光电倍增管要高压直流电源供电, 对电源电压的稳定度要求高, 一般配有

专用电源，电压波动在 0.05% 以内。

接地方式：有阳极接地（负高压接法）和阴极接地（正高压接法）两种方法。



5-15 光电倍增管接地方式

阳极接地和阴极接地特点比较：

接地方式	优点	缺点
阳极接地	便于与后面的放大器相连，操作安全	阴极负高压，屏蔽困难，暗电流和噪声大
阴极接地	屏蔽罩靠近阴极，屏蔽效果好，暗电流小，噪声低	高压不利于安全操作，接耐压很高的隔直电容器

## 第 5 章 光电子发射探测器

### 5.4 光电倍增管的工作电路及应用

#### 5.4.2 信号输出电路

##### 1. 用负载电阻实现电流-电压转换

在光照一定的条件下，输出的信号电压与负载电阻大小成正比。但负载电阻太大，光电倍增管的频率响应变差，光电线性变差。

如果负载电阻 $R_L$ 太大、光照较强，阳极电流 $I_A$ 在负载电阻 $R_L$ 上会产生较大的压降，使阳极电压有较大的下降，如图 5-17 所示。这样就会出现明显的空间电荷效应，降低了阳极的电子收集率，导致输出信号饱和而引起非线性。

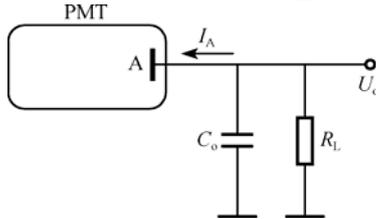


图 5-16 倍增管负载电阻输出电路

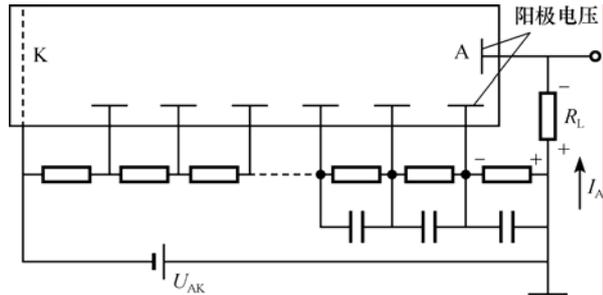


图 5-17 负载电阻太大时阳极电压降低

##### 2. 用运算放大器实现电流电压转换

倍增管的运算放大器输出电路如图 5-18 所示。输出的信号电压为：

$$U_0 = -R_f \cdot I_A \quad (5-27)$$

该电路保证了倍增管既具有良好的线性和频率响应特性，又使得电流电压的转换效率高。

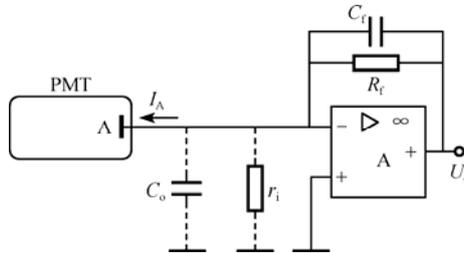


图 5-18 倍增管运算放大器输出电路

## 第5章 光电子发射探测器

### 5.4 光电倍增管的工作电路及应用

#### 5.4.3 光电倍增管应用举例

##### 1. 超高速碰撞闪光光电倍增管测量系统

**工作原理：**系统由4通道组成，由光纤探头采集的不同波长的闪光信号经光纤输入光电倍增管，将光信号转换为电信号并放大后输入示波器，可得到被测对象辐射随时间变化的历史。主要用于分析研究持续时间极短、强度微弱的超高速碰撞闪光。

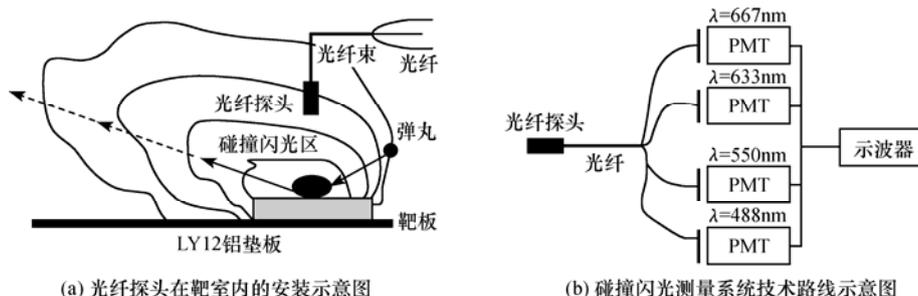


图5-19 一种超高速碰撞闪光光电倍增管测量系统示意图

##### 2. 闪烁计数器

**闪烁计数器** 由闪烁晶体与光电倍增管组合构成。

**工作原理：**如图 5-21(a)所示，当高能粒子照到闪烁体上，产生光辐射，倍增管接收。光电倍增管输出脉冲的幅度与粒子的能量成正比。

图 5-21(b)是一幅典型的输出脉冲幅度分布图——能谱图。图中每一能量上都有一个明显的峰值，在射线测量中，用作衡量脉冲幅度的分辨率。

**应用：**应用于核医学、石油测井和工业检测等领域，可检测  $\beta$  射线、X 射线和  $\gamma$  射线等高能粒子。

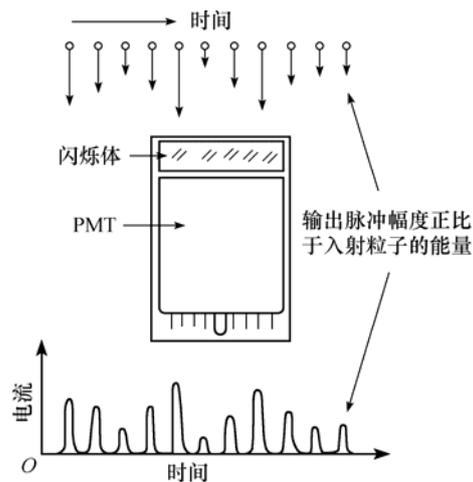


图 5-21 闪烁计数器原理

##### 3. 光电倍增管的使用要点

- 光电倍增管供电电压高、采用玻璃外壳、抗震性差，应注意防震和高压下的安全性。
- 使用时不可用强光照射。
- 工作电流不宜过大。
- 高压电源的稳定性须达到测量精度 10 倍以上，电压的纹波系数一般小于 0.001%。
- 流过电阻链分压器中的电流，一般应大于阳极最大电流的 20 倍以上；精密线性（非线性小于 1%）测量中，应大 100 倍以上。但不应过分加大，以免发热。
- 用运算放大器作光电倍增管输出信号的电流—电压变换，可获得良好的线性和频率响应特性。

## 第6章 热探测器

### 6.0 本章知识要点

#### 1. 热探测器的定义及分类:

热电偶（热电堆）、测辐射热计、热释电探测器

#### 2. 热探测器的特性

- 光谱响应范围宽，响应率与波长无关，具有从紫外到红外波段的几乎“平坦”的光谱响应特性。
- 工作时无需制冷亦无需偏压电源。
- 热响应时间一般为 ms~s 量级，响应速度慢，是一类（时间频率）窄带响应器件。
- 探测率较低， $D^*$ 值约为  $10^8 \sim 10^9 \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。

#### 3. 三种常用热探测器的基本原理、主要特点和性能参数等的比较

探测器类型	基本原理、被测物理量、输出信号	热响应时间常数	灵敏度（响应率）	主要噪声和 NEP/ $D^*$	主要材料	主要应用	使用时的注意事项
热电偶和热电堆	温差电效应、温差 $\Delta T$ 、温差电势 $U$	半导体热电偶： 几~几十毫秒	半导体热电偶： $\sim 50 \mu\text{V}/\mu\text{W}$	热噪声和温度噪声； NEP $\sim 10^{-11} \text{W}$ 。	半导体； 金属	测温、测辐射（几十 Hz 以下）	内阻几十 $\Omega$ ，信号放大时须接变压器
		细丝式热电堆 0.1~2s； 薄膜型热电堆 13~150ms	细丝式热电堆 $\sim 0.25 \mu\text{V}/\mu\text{W}$ ； 薄膜型热电堆 $50 \sim 280 \mu\text{V}/\mu\text{W}$	热噪声； 薄膜型热电堆 $D^* \sim 5 \times 10^9 \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$		光谱、光度仪器，高/低温空间探测，激光测量等。	避免振动；，光辐射不能太强；允许微安级电流，不准用欧姆表检测
测辐射热计	电阻率随温度变化、温度 $T$ 、电阻变化 $\Delta R$	1~200ms	与偏置电压、吸收率以及电阻—温度系数等成正比。	热噪声、温度噪声、电流噪声 ( $f < 10\text{Hz}$ )。 $D^* \sim 3 \times 10^8 \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$	金属； 半导体	光辐射探测 ( $f < 100\text{Hz}$ )，热成像等。	常采用桥式电路
热释电探测器	热释电效应、温差 $\Delta T$ 、表面电荷 $\Delta Q$	0.1~10s，调节负载可改变。 快速热释电探测器~13ps	50~200 $\mu\text{V}/\mu\text{W}$  与调制频率、负载等有关。	热噪声、放大器的噪声、温度噪声； $D^* \sim 2 \times 10^9 \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$	热电晶体	调制的光辐射，如大功率激光脉冲、温度分布（热像仪）等。	工作温度须稍远离居里温度；必须防震，以克服压电效应的影响

## 第6章 热探测器

### 6.1 热探测器的基本原理及特性

#### 6.1.1 热流方程及其解

**热探测器** 利用光热效应 (Photothermal Effect) 制作的器件称为热探测器 (Thermal Detector)。常用的热探测器主要有热电偶 (热电堆)、测辐射热计、热释电探测器等三种。

**光热效应** 探测器将吸收的光能转换为热能, 温度上升; 温升使探测器某些物理性质发生变化。检测某一种物理性质的变化, 就可探知光辐射的存在或其强弱程度。

对热探测器的分析可分为两步:

- 确定温升;
- 确定参量变化。

#### 1. 热流方程

热探测器的热力学分析模型如图 6-1 所示。设  $\Phi$  为入射到热探测器上的光辐射通量, 若热探测器光敏材料对光辐射的吸收系数为  $\alpha$ 。被吸收的光能一部分转化为热探测器的内能, 另一部分通过热探测器与周围环境的热交换而从热探测器流向周围环境。

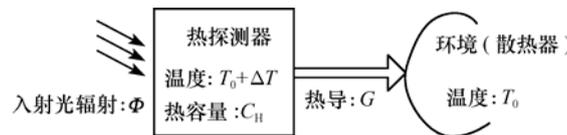


图 6-1 热探测器的热力学分析模型

设热探测器的温度分布是空间均匀的, 根据能量守恒定律, 得到热流方程为:

$$\alpha\Phi = C_H \frac{d(\Delta T)}{dt} + G \cdot \Delta T \quad (6-1)$$

式中,  $C_H$  是热探测器的热容量, 单位: J/K;  $G$  是热探测器的热导, 单位: W/K;  $\Delta T$  为热探测器的温升。

#### 2. 热探测器的温升

考虑交变调制光照射热探测器时的温升:

$$\Delta T_\omega(t) = \frac{\alpha\Phi_0}{G(1 + \omega^2\tau_T^2)^{1/2}} \exp[i(\omega t + \varphi)] \quad (t \gg \tau_T) \quad (6-3)$$
$$|\Delta T_\omega| = \frac{\alpha\Phi_0}{G(1 + \omega^2\tau_T^2)^{1/2}}$$

式中,  $\tau_T = C_H/G$ , 是热探测器的热响应时间常数;  $\varphi = -\arctan(\omega\tau_T)$ , 是温升  $\Delta T$  与光辐射通量  $\Phi$  之间的相位差。上式仅考虑交变辐射的平衡态响应。

**热容量** 热探测器的温度每升高 1K 所需要吸收的热量。

**热导** 热探测器与周围环境的热交换程度, 与热探测器的周围环境、器件的封装情况、电极以及引线尺寸等诸多因素有关。

## 第6章 热探测器

### 6.1 热探测器的基本原理及特性

#### 6.1.2 热探测器的共性分析

##### 1. 热探测器的共性：

- 热探测器适于低频调制。
- 热响应时间 $\tau_T$ 一般为几毫秒至几秒。
- 热导 $G$ 对热探测器灵敏度和热响应时间的影响与热容量 $C_H$ 的情况相反。

##### 热传导的三种形式：

- 探测元件与散热器、电极和导线等之间的接触传热；
- 与周围空气的对流传热；
- 热辐射，是决定热导的主要因素。

##### 热导分析

热平衡热探测器对外辐射的总通量为： $\Phi_e = A_d \varepsilon \sigma T^4$

热导 $G_R$ 为： $G_R = d\Phi_e / dT = 4A_d \varepsilon \sigma T^3$

##### 2. 热探测器的噪声等效功率和比探测率

**噪声等效功率：**  $NEP = 4\sqrt{kA_d \sigma \cdot \Delta f / \alpha} \cdot T^{5/2}$

**比探测率  $D^*$ ：**  $D^* = \frac{\sqrt{A_d \cdot \Delta f}}{NEP} = \frac{1}{4\sqrt{k\sigma} \cdot T^{5/2}}$  (cm·Hz<sup>1/2</sup>/W)

**物理意义：** 噪声等效功率和比探测率均可作为衡量实际热探测器性能的比较基准。

**噪声特性：** 热探测器的光谱响应范围很宽，但比探测率 $D^*$ 值较小，呈现出“平坦性”，与光子探测器的“波长选择性”不同。

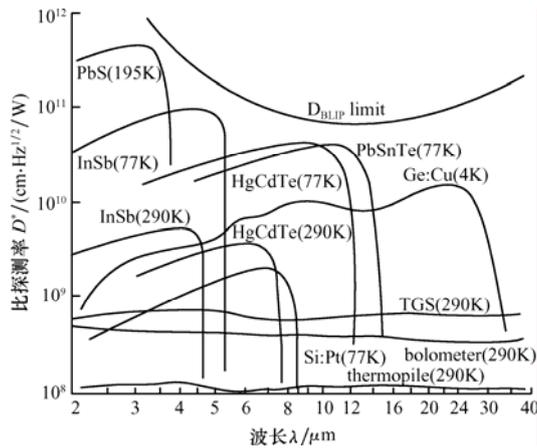


图 6-2 几种热探测器和光子探测器在 2~40 $\mu\text{m}$  红外波段的  $D^*$ — $\lambda$  特性曲线

## 第6章 热探测器

### 6.2 热电偶和热电堆

#### 6.2.1 热电偶的结构原理

##### 1. 热电偶的定义

**热电偶 (Thermocouple)** 利用温差电效应来测量光辐射的一种热探测器，也称为温差电偶。

**温差电效应** 将两种不同的材料连接成具有一对结点的闭合回路，使其中一个结点接收光辐射，该结点因吸收光辐射而产生温升，与另一个没有受光照射的结点之间出现温度差，导致两个结点的接触电动势不同，从而在闭合回路中产生电流的现象。

##### 2. 热电偶的结构原理

**金属热电偶** 由金属材料制作的热电偶，有实体状和薄膜型两种结构，实体状的热电偶多用于测量温度，薄膜型的热电偶多用于测量光辐射能量。

**测温热电偶：**通常由铂、铑等合金组成，采用“点接触”的方式测量温度，测温范围较宽，一般可达  $-200 \sim 1000^\circ\text{C}$ ，测量准确度高达  $10^{-3}^\circ\text{C}$ 。

**测辐射热电偶：**在材料A和B的连接点  $J_1$  上粘上涂黑的金箔，形成光敏面，接收入射的光辐射。金箔因吸收光辐射产生温升， $J_1$  成为热端，与冷端  $J_2$  之间产生温差电动势。若用导线将检流计G分别与材料A、B的冷端相连构成回路，则在回路中产生电流  $I$ 。由检流计G检测出  $I$  的大小，可探知光辐射的情况。

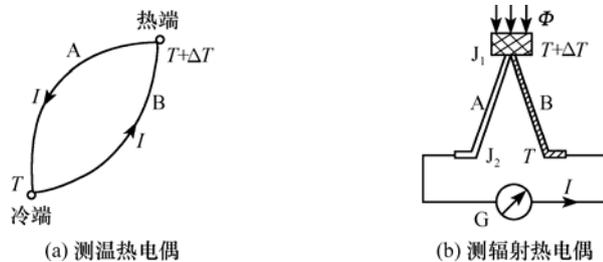


图 6-4 两种由金属材料制作的热电偶的原理结构图

若用导线将检流计G分别与材料A、B的冷端相连构成回路，则在回路中产生电流  $I$ 。由检流计G检测出  $I$  的大小，可探知光辐射的情况。

**半导体热电偶** 由半导体材料制作的热电偶。

**半导体热电偶的结构：**采用 P、N 型两种不同的半导体材料，用涂黑的金箔将 P、N 型半导体材料连接在一起构成热端，接收光辐射，两种半导体的另一端均为冷端。

**半导体热电偶的基本原理：**热端吸收光辐射后，产生温升，温升导致半导体中载流子的动能增加，使多数载流子由热端向冷端扩散，使得P型半导体材料的热端带负电、冷端带正电，N型半导体材料的情况则正好相反，从而在负载  $R_L$  上产生温差电压信号。检测电压信号，探知光辐射的情况。

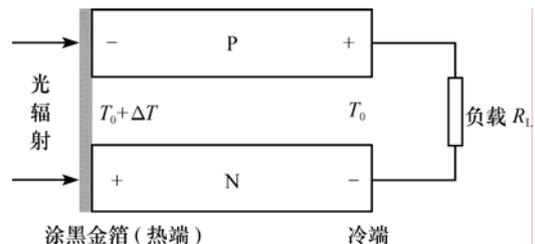


图 6-5 半导体测辐射热电偶的结构原理图

$$\text{热电偶的热流方程: } \alpha\Phi = C_{\text{ch}} \frac{d(\Delta T)}{dt} + \left( G_c + \frac{M^2 T}{R_{\text{ci}} + R_L} \right) \cdot \Delta T$$

温差电流  $I$  经负载电阻  $R_L$  产生的信号电压的幅值为：

$$|U_{\text{cl},\omega}| = IR_L = \frac{U_{\text{co}}}{R_{\text{ci}} + R_L} R_L = \frac{M\Delta T_{\omega}}{R_{\text{ci}} + R_L} R_L = \frac{MR_L}{R_{\text{ci}} + R_L} \cdot \frac{\alpha\Phi_0}{G_c^* (1 + \omega^2 \tau_{\text{CT}}^2)^{1/2}} \quad (6-17)$$

## 第6章 热探测器

### 6.2 热电偶和热电堆

#### 6.2.2 热电偶的主要特性参数

##### 1. 热电偶的电压灵敏度

**电压灵敏度** $S_c$  输出电压信号 $|U_{cL,\omega}|$ 与入射光辐射通量的幅值 $\Phi_0$ 之比。

$$S_c = \frac{|U_{cL,\omega}|}{\Phi_0} = \frac{MR_L}{R_{ci} + R_L} \cdot \frac{\alpha}{G_c^* (1 + \omega^2 \tau_{cT}^2)^{1/2}} \quad (6-18)$$

半导体测辐射热电偶的电压灵敏度 $S_c$ 约为  $50 \mu\text{V}/\mu\text{W}$ 。

提高热电偶的电压灵敏度 $S_c$ 的方法：

- 选用塞贝克系数  $M$  值较大的热敏材料；
- 将光敏面涂黑（以增大对光辐射的吸收率  $\alpha$ ）；
- 减小内阻 $R_{ci}$ ；
- 减小调制频率  $\omega$  等。

##### 2. 热响应时间

**热响应时间** $\tau_{cT}$  约为几~几十ms。热电偶适于探测恒定的或低频（一般不超过几十Hz）调制的光辐射。

##### 3. 热电偶的内阻

**热电偶的电阻值** $R_{ci}$  决定于所用的热敏材料及结构，电阻值一般为几十欧姆。

##### 4. 噪声等效功率

热电偶的噪声主要包括热电偶具有的欧姆电阻所引起的热噪声和光敏面温度起伏所产生的温度噪声。

##### 噪声等效功率

$$\text{NEP} = \left( \frac{\overline{u_{nt}^2}}{S_c^2} + \overline{W_T^2} \right)^{1/2} = \left( 4kR_{ci}T \cdot \frac{G_c^{*2} + \omega^2 C_{cH}^2}{M^2 \alpha^2} \cdot \Delta f + 4kG_c^* T^2 \cdot \Delta f \right)^{1/2} \quad (6-19)$$

半导体测辐射热电偶的噪声等效功率一般为  $10^{-11}\text{W}$ 左右。

## 第6章 热探测器

### 6.2 热电偶和热电堆

#### 6.2.3 热电堆

**热电堆** 多个热电偶的串联而成。

**热电堆的结构：**辐射接收面分为若干块，每块接一个热电偶，把它们串联起来，就构成热电堆。按用途不同，实用的热电堆可以制成细丝型和薄膜型，亦可制成多通道型和阵列型器件。

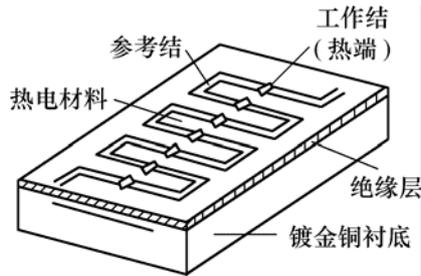
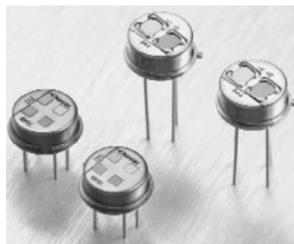
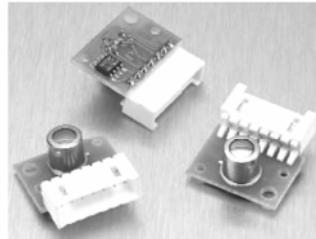


图 6-6 热电堆的结构与工作原理图



(a) 2/4 通道型



(b) 阵列型（集成了信号处理电路）

图 6-7 典型的热电堆

**热电堆的内阻** 所有串联热电偶的内阻之和，即：

$$R_{pi} = \sum_{i=1}^n R_{ci}^{(i)} = n \cdot R_{ci} \quad (6-20)$$

热电堆的内阻 $R_{pi}$ 较大，可达几十千欧姆，易于与放大器的阻抗匹配，可利用普通的运算放大器。

**热电堆的温差电动势**

在相同的温差时，热电堆的开路输出电压 $U_{po}$ 是所有串联热电偶的温差电动势之和：

$$U_{po} = \sum_{i=1}^n U_{co}^{(i)} = nU_{co} = n \cdot M \cdot \Delta T \quad (6-21)$$

在相同的电信号检测条件下，热电堆能检测到的最小温差是单个热电偶的  $1/n$ ，热电堆对温度的分辨能力增强。

**热电堆的噪声等效功率**

噪声等效功率 NEP 主要取决于热电堆的热噪声。

## 第 6 章 热探测器

### 6.2 热电偶和热电堆

#### 6.2.4 热电偶和热电堆的应用

##### 1. 热电偶的应用

热电偶可用于绝对温度的测量，其冷端需要进行温度补偿。

**温度补偿的方法：**冰点法、恒温迁移补偿法、热电势修正法、电桥补偿法、二极管补偿法、集成温度传感器补偿法等。

##### 2. 热电堆的应用

- 用于光谱、光度探测等仪器中，尤其是在高/低温空间探测和激光测量等领域。
- 利用热电堆对空调、微波炉、烘干机和干衣机等家用电器进行非接触式温度测量。
- 在热成像方面，薄膜型热电堆适合于制作非制冷红外焦平面阵列成像器件。

## 第6章 热探测器

### 6.3 测辐射热计

#### 6.3.1 测辐射热计的结构原理

**测辐射热计** (Bolometer) 利用某些热敏材料的电阻率随温度发生变化的特性而制成的电阻性元件。可分为金属材料测辐射热计和热敏电阻。

**金属材料测辐射热计** 用金属材料 (如镍、铋、铂) 制成的测辐射热计。适用于温度的模拟测量, 常用 PTC (Positive Temperature Coefficient) 表示。

**热敏电阻** 用半导体材料 (如锰、钴等的氧化物) 制成的测辐射热计。多用于光辐射的探测 (如目标搜索与跟踪、报警等)。

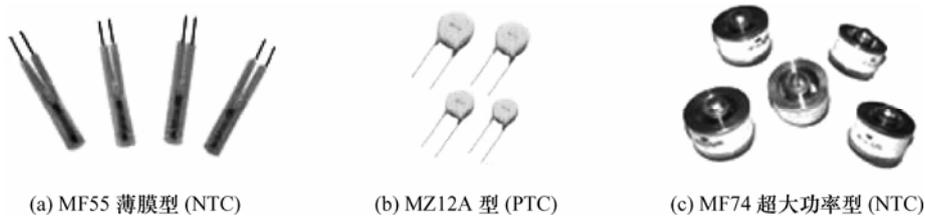


图 6-8 典型的测辐射热计

**测辐射热计的结构:** 光敏面是一层由金属导体或半导体热敏材料制成的薄片, 厚度约 0.01mm, 黏合在导热能力高的电学绝缘衬底上, 衬底再黏合在一个热容很大、导热性能良好的金属导热基体上, 两端用蒸发金属电极与外电路相连。

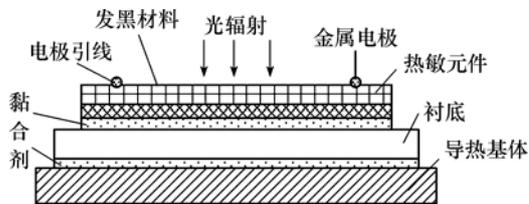


图 6-9 测辐射热计的结构示意图

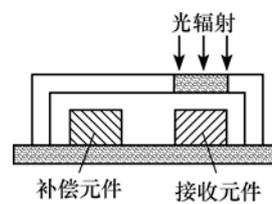


图 6-10 带补偿元件的测辐射热计

**带补偿元件的测辐射热计:** 将两个规格相同的测辐射热计安装在一个金属管壳内, 如图 6-10 所示。其中一个用于接收光辐射, 另一个用硅橡胶封装而被屏蔽 (不能接收光辐射, 用于环境温度的补偿), 两者靠得很近。

**测辐射热计的工作原理:** 热敏材料吸收光辐射, 产生温升, 引起材料的电阻发生变化。将测辐射热计与负载电阻等构成闭合回路, 测量负载电阻两端的电压变化, 就可探知光辐射的情况。

## 第6章 热探测器

### 6.3 测辐射热计

#### 6.3.2 测辐射热计的主要特性参数

##### 1. 电阻-温度特性

**电阻-温度特性** 用电阻-温度系数 $\alpha_T$ 来表征, 定义为

$$\alpha_T = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{dR_T}{dT} \quad (6-23)$$

- 对于大多数金属材料, 电阻-温度系数为正, 数值一般在  $10^{-3}$  量级, 且  $\alpha_T \approx 1/T$ 。其测辐射热计的型号常用PTC表示。
- 对于大多数的半导体材料, 电阻-温度系数为负, 且  $\alpha_T \approx -3000/T^2$ 。其测辐射热计的型号常用NTC表示。

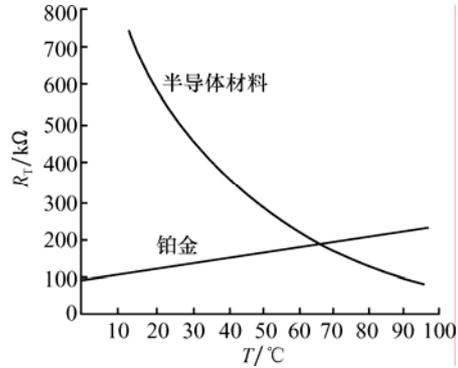


图 6-11 不同热敏材料的电阻-温度特性曲线

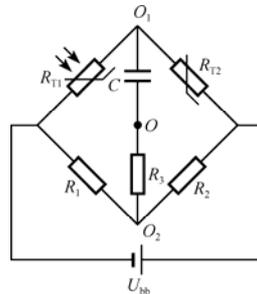
##### 2. 测辐射热计的电压灵敏度

桥式电路电压灵敏度: 
$$S_v = \frac{\alpha R_{T2} U_{bb} \alpha_T}{2G(R_{T1} + R_{T2})(1 + \omega^2 \tau_T^2)^{1/2}}$$

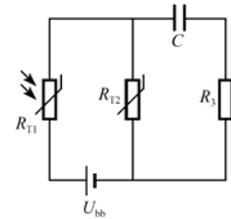
补偿电路电压灵敏度: 
$$S_v = \frac{\alpha R_{T2} R_{T1} U_{bb} \alpha_T}{G(R_{T1} + R_{T2})^2 (1 + \omega^2 \tau_T^2)^{1/2}}$$

提高测辐射热计的电压灵敏度的方法:

- 增大偏置电压  $U_{bb}$ , 此方法具有一定的局限性。
- 将测辐射热计的光敏面涂黑, 提高吸收率  $\alpha$ 。
- 减小热导  $G$ 。
- 选用  $\alpha_T$  值大的材料。



(a) 惠更斯桥式电路



(b) 以补偿元件为负载的电路

图 6-12 测辐射热计的典型应用电路

##### 3. 测辐射热计的噪声等效功率

- 热噪声电压的方均值:  $\overline{U_{RT}^2} = 4kTR_T \cdot \Delta f$
- 温度噪声电压的方均值:  $\overline{U_T^2} = 16A_d \varepsilon \sigma k S_v^2 T^5 \cdot \Delta f$
- 电流噪声电压的方均值:  $\overline{U_I^2} = A_0 R_T^2 I^2 \cdot \Delta f / f$

测辐射热计的比探测率  $D^*$ : 
$$D^* = \frac{S_v \sqrt{A_d \cdot \Delta f}}{U_N} = \frac{S_v \sqrt{A_d \cdot \Delta f}}{\sqrt{U_{RT}^2 + U_T^2 + U_I^2}}$$

#### 6.3.3 测辐射热计的应用

测辐射热计可用于温度测量, 现阶段主要发展硅基微测辐射热计焦平面阵列器件, 用于凝视型红外成像系统。

## 第6章 热探测器

### 6.4 热释电探测器

#### 6.4.1 热释电探测器的结构原理

**热释电探测器 (Pyroelectric Detector)** 利用热释电效应制成的光辐射探测器件。



图 6-14 几种典型的热释电探测器

#### 1. 热释电效应

**热释电效应** 热电晶体材料吸收光辐射能量、产生温升，导致晶体表面电荷发生变化的现象。

**热电晶体** 一类非中心对称的极性晶体，具有自发极化特性。热电晶体的自发极化强度  $P_s$  与温度有关，温度升高，极化强度减小；温度降低，极化强度增大。使自发极化强度  $P_s$  减小到零时的温度  $T_c$  称为“居里温度”。

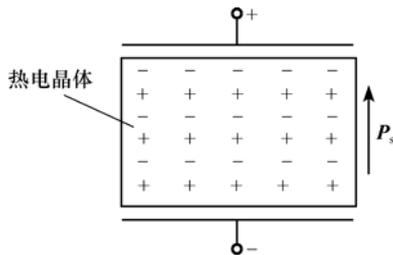


图 6-15 自发极化现象

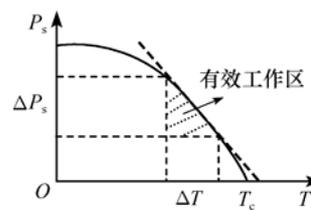


图 6-16 热电晶体自发极化强度  $P_s$  与温度  $T$  的关系

**热释电效应的基本原理：**热电晶体在自发极化强度  $P_s$  的作用下，垂直于  $P_s$  的两个晶面上会出现等量、异号的面束缚电荷。当热电晶体因吸收光辐射而使其温度由  $T_1$  上升到  $T_2$  时，自发极化强度  $P_s$  减小，导致晶面上的束缚电荷减少，这相当于晶体表面“释放”了电荷，因此称为热释电效应。

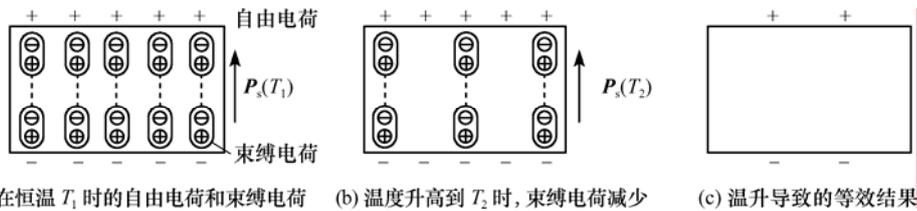


图 6-17 热电晶体在温度升高时的热释电效应示意图

#### 2. 热释电探测器的基本结构

**基本结构：**热释电的基本结构是一个电容器，其电容值很小、阻抗一般可达  $10^{10}\Omega$ ，使用时须采用具有高输入阻抗和低噪声的结型场效应管前置放大器 (JFET)。实际应用中一般将 JFET 与热释电探测器直接封装在同一个黄铜管内，构成源极跟随器、并进行阻抗变换。

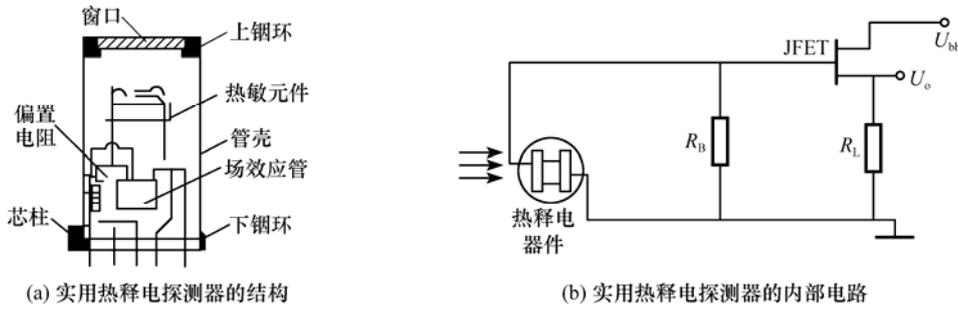


图 6-18 实用热释电探测器的结构及其内部电路

### 3. 热释电探测器的工作原理

基本原理：热释电探测器是一个电容器，其输出阻抗极高，故其等效电路可用恒流源来表示。

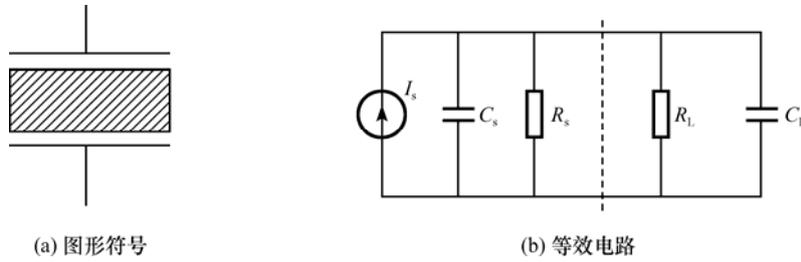


图 6-21 热释电探测器的图形符号与等效电路

恒流源产生的电流  $i$  为：

$$i = \frac{d(\Delta Q)}{dt} = A_d \cdot \gamma \cdot \frac{d(\Delta T)}{dt} = \frac{A_d \gamma \alpha \Phi_0 \omega j}{G \cdot \sqrt{1 + \omega^2 \tau_T^2}} \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (6-32)$$

探测器输出电压的幅值为：

$$|U_o| = \frac{\alpha A_d \gamma \omega R_L \Phi_0}{G \sqrt{(1 + \omega^2 \tau_T^2)(1 + \omega^2 \tau_c^2)}} \quad (6-33)$$

## 第6章 热探测器

### 6.4 热释电探测器

#### 6.4.2 热释电探测器的主要特性参数

##### 1. 电压灵敏度与频率响应特性

**电压灵敏度 $S_V$**  热释电探测器输出电压的幅值 $|U_o|$ 与入射光辐射通量 $\Phi_0$ 之比。

$$S_V = \frac{|U_o|}{\Phi_0} = \frac{\alpha A_d \gamma \omega R_L}{G \sqrt{(1 + \omega^2 \tau_T^2)(1 + \omega^2 \tau_e^2)}} \quad (6-34)$$

特性:

- 热释电探测器对恒定的光辐射不敏感。
- 在低频段 ( $\omega \ll 1/\tau_T, 1/\tau_e$ ),  $S_V$ 与 $\omega$ 成正比。
- 通常情况下, 有 $\tau_e < \tau_T$ , 故当 $\omega$ 在 $1/\tau_T \sim 1/\tau_e$ 范围内时,  $S_V$ 与 $\omega$ 无关, 为一常数。
- 在高频段 ( $\omega \gg 1/\tau_T$ 和 $1/\tau_e$ ),  $S_V$ 与 $\omega$ 成反比。

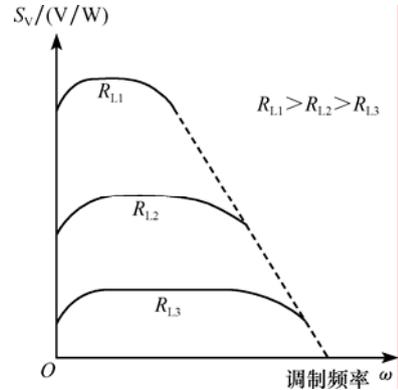


图 6-22 热释电探测器电压灵敏度 $S_V$ 与工作频率 $\omega$ 的关系曲线

##### 2. 热释电探测器的响应时间

**响应时间:** 主要由电响应时间常数 $\tau_e$ 决定。可通过减小负载 $R_L$ 提高热释电探测器的响应速度。但是, 减小负载, 电压灵敏度 $S_V$ 也会减小, 在实际应用中两者需要综合考虑。

##### 3. 热释电探测器的 $P_s \sim T$ 特性关系及居里温度

**$P_s \sim T$ 特性关系:** 热释电探测器的自发极化强度 $P_s$ 与温度的关系。对于不同热电晶体, 其 $P_s \sim T$ 特性关系也不同。

**热电晶体的居里温度:** 材料不同, 居里温度 ( $T_c$ ) 不同。热电晶体的工作温度必须在居里温度以下稍远一点的区域, 居里温度越高, 热释电探测器可适用的温度范围越宽, 可探测的动态范围也越大。

##### 4. 热释电探测器的噪声电流和噪声等效功率

热释电探测器的噪声来源:

- 电阻的热噪声——热电晶体的介电损耗以及并联负载电阻产生的噪声。
- 放大器噪声——放大器中的有源/无源元件以及信号源的源阻抗与放大器的输入阻抗之间的噪声匹配产生的噪声。
- 温度噪声——热释电探测器的光敏面与外界辐射热交换的随机性产生的噪声。

总噪声电流的方均值:

$$\begin{aligned} \overline{i_N^2} &= \overline{i_R^2} + \overline{i_F^2} + \overline{i_T^2} = 4k\Delta f \left[ \frac{T_R}{R} + \frac{(F-1)T}{R} + \frac{\gamma^2 A_d^2 \omega^2 T^2}{G} \right] \\ &= 4k\Delta f \left[ \frac{T_N}{R} + \frac{\gamma^2 A_d^2 \omega^2 T^2}{G} \right] \end{aligned} \quad (6-39)$$

噪声等效功率:

$$NEP = \frac{2T}{\alpha} \sqrt{kG \cdot \Delta f \cdot \left( 1 + \frac{T_N G}{T^2 \gamma^2 A_d^2 \omega^2 R} \right)} \quad (6-41)$$

## 第 6 章 热探测器

### 6.4 热释电探测器

#### 6.4.3 快速热释电探测器

快速热释电器件一般都设计成同轴结构，将光敏元件置于阻抗为  $50\ \Omega$  的同轴线的一端。

图 6-24 所示为一种快速热释电探测器的结构，光敏元件是铌酸锶钡（SBN）晶体薄片，采用边电极结构，电极 Au 的厚度为  $0.1\ \mu\text{m}$ ，衬底采用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  或  $\text{BeO}$  陶瓷等导热性能良好的材料；输出端采用 SMA/BNC 高频接头。

快速热释电器件采用面电极结构时，其时间常数约为  $1\ \text{ns}$ ；而采用边电极结构时，其时间常数可降至 ps 级。

主要用于测量大功率脉冲激光（脉宽为  $\mu\text{s}\sim\text{ps}$  级）。

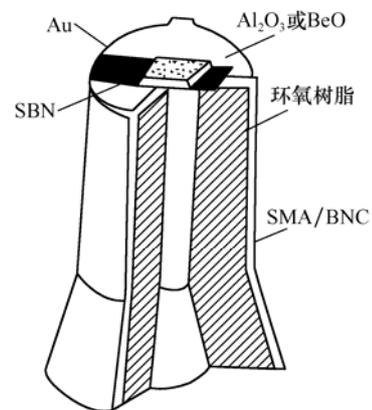


图 6-24 快速热释电探测器的结构

## 第 6 章 热探测器

### 6.4 热释电探测器

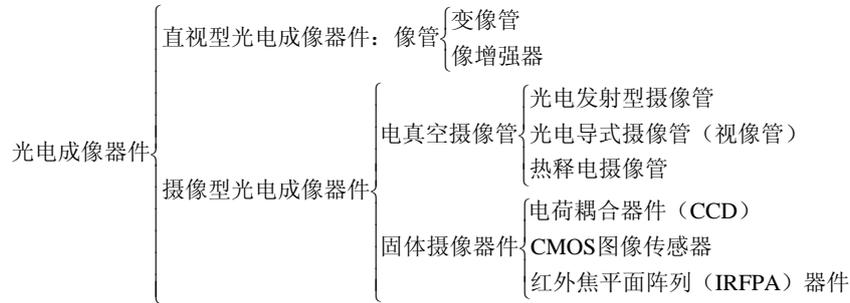
#### 6.4.4 热释电探测器的应用

- 作为参考（标准）探测器，应用于光源发射光谱特性和光子探测器光谱响应特性等测试系统。
- 利用热释电探测器和光学菲涅尔透镜组合制作的人体感应器模块，可感应人体发出的波长为 8~12 $\mu\text{m}$  之间的红外辐射信号，应用于电子防盗报警、自动门和感应开关水龙头等。
- 在空间技术方面，热释电探测器阵列可用来测量温度和湿度的空间分布。
- 用于电真空摄像管和非制冷红外焦平面阵列等成像器件。

## 第7章 光电成像器件

### 7.0 本章知识要点

#### 1. 光电成像器件的分类和定义：



- **光电成像器件** (Photoelectronic Imaging Devices) 一类能够输出图像信息（图像或视频信号）的功能器件，也称为光电图像传感器，按工作方式分为直视型和摄像型光电成像器件两大类。
- **直视型光电成像器件** 具有图像的转换、增强、显示等功能部件和高真空管壳，通常简称为像管，按主要功能的不同可分为变像管和像增强器两种，将像管配以成像物镜、观察目镜等，可构成直视型光电成像系统。
- **变像管** 将不可见的光学图像变换为可见光图像的成像器件。
- **像增强器** 将亮度很低的光学图像增强到足够亮度的成像器件，微通道板像增强器是其中一种重要的像增强器。
- **摄像型光电成像器件** 将二维空间的光强分布（光学图像）转换为一维时序电信号，不直接输出图像（只有对时序电信号进行再处理后才可获得目标图像），按工作方式和结构的不同可分为电真空摄像管和固体摄像器件，将它们配以成像物镜、显示器等，可构成摄像机系统。
- **电真空摄像管** 利用光电靶和电子束扫描、把二维光学图像转换为一维时序电信号的电真空摄像器件。将像增强器与电真空摄像管耦合，可构成微光（电真空）摄像系统。
- **固体摄像器件** CCD、CMOS 和 IRFPA 等。它们都利用了自扫描技术，能完成光学图像的转换、信息的存储和扫描输出（一维时序电信号）的全过程。

#### 2. 像管的结构原理及特性参数：

光谱响应特性、光谱匹配因数、增益特性、等效背景照度、成像特性

#### 3. 电视制式及电真空摄像管的结构原理。

#### 4. 几种固体摄像器件的结构原理及特性：

CCD、CMOS、IRFPA

## 第7章 光电成像器件

### 7.1 像管

#### 7.1.1 像管的结构和工作原理

##### 1. 像管的结构

**基本结构：**由光电阴极、电子光学系统（也称为“电子透镜”）、荧光屏等组成。

在实际应用中，像管的前、后部分别装配有光学成像物镜和观察目镜，构成微光夜视仪或医疗诊断仪等成像系统。

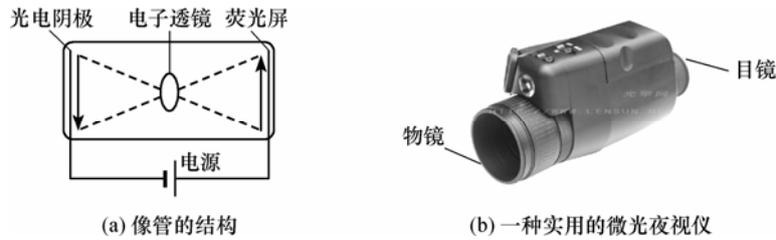


图 7-1 像管的结构及应用实物图

**光电阴极**——涂覆于光窗内壁的光电发射材料薄膜，是像管的光-电转换部分。

**电子光学系统**——将电子图像成像在荧光屏上。

**电子光学系统的分类：**

- **静电系统**——靠静电场的加速和聚焦作用完成电子图像的成像功能。在静电型电子光学系统中，电源的两极分别与光电阴极和荧光屏连接。工作时，阴极接零电位、阳极加直流高压，在两极之间形成轴对称的静电场。
- **电磁复合系统**——由静电场的加速和磁场的聚焦作用共同完成电子图像的成像功能。电磁复合系统的磁场由像管外围的长螺旋线圈通以恒定电流来产生，加速电场则由光电阴极与阳极之间所加直流高压产生。

**荧光屏**——将电子动能转换成光能，是像管的电-光转换部分。

**对荧光屏的要求：**具有高的转换效率；发射光谱与人眼或与之耦合的下一级光电阴极的光谱响应特性相匹配。

常用荧光屏发光材料是掺杂的晶态磷光体，发射的大部分是绿光，符合人眼视觉的光谱响应特性，便于观察。

##### 2. 像管的工作原理

- 亮度很低的可见光图像或者人眼不可见的光学图像经光电阴极转换成电子图像；
- 电子光学系统将电子图像聚焦成像在荧光屏上，并使光电子获得能量增强；
- 荧光屏再将入射到其上的电子图像转换为可见光图像。

## 第7章 光电成像器件

### 7.1 像管

#### 7.1.2 像管的主要特性参数

##### 1. 光谱响应特性和光谱匹配因数

**光谱响应特性** 就是光电阴极的光谱响应特性，决定像管适用的光谱范围。

**光谱匹配** 在像管的光谱响应范围内，光源与光电阴极、光电阴极与荧光屏以及荧光屏与人眼视觉函数之间的光谱分布匹配。

**积分灵敏度  $S$**  单位辐射通量（全波段）所产生的光电流，也称为光电灵敏度。

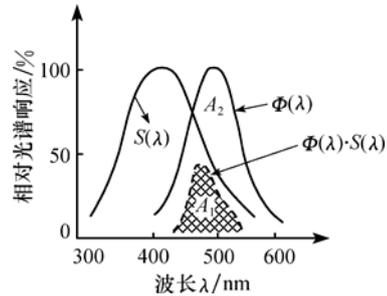


图 7-6 光源与光电阴极之间的光谱匹配

$$S = \frac{I}{\Phi} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_m \Phi(\lambda) \cdot S_m S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_m \Phi(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda} \cdot S_m = \frac{A_1}{A_2} \cdot S_m = a \cdot S_m \quad (7-1)$$

**光谱匹配因数  $a$**  光源确定时，若  $\Phi(\lambda)$  和  $S(\lambda)$  两条曲线重合得愈好，面积  $A_1$  就愈大，光谱匹配愈好；反之，若两条曲线重合得不好，光谱匹配不好。

##### 2. 增益特性

**亮度增益** 荧光屏的光出射度  $M_a$  与入射到光电阴极面上的照度  $E_k$  之比。

$$G_L = \frac{M_a}{E_k} = \frac{\pi \cdot L_a}{E_k} \quad (7-2)$$

##### 3. 等效背景照度

**等效背景照度** 在荧光屏上产生与暗背景相等的亮度时，光电阴极面上所需要的输入照度值。

$$G_L = \pi \cdot L_b / E_b, \quad E_b = \pi \cdot L_b / G_L \quad (7-3)$$

##### 4. 像管的成像特性

**像管的线放大率  $\beta$**  荧光屏上输出图像的线尺寸  $l'$  与光电阴极上输入图像的线尺寸  $l$  的比值。它表征了像管对图像几何尺寸的放大或缩小的能力。

**图像的畸变** 物高的不同导致放大率不同，图像的形状发生畸形变化。图像的畸变程度用光电阴极轴外不同位置处的放大率相对于中心放大率的偏差来表征。

$$D_r = \frac{\beta_r - \beta_0}{\beta_0} \times 100\% = \left( \frac{\beta_r}{\beta_0} - 1 \right) \times 100\% \quad (7-4)$$

**分辨率** 能够分辨图像中明暗细节的能力。分辨率是评价光电成像器件的一个重要指标。

**极限分辨率** 刚刚能够分辨清楚两个相隔很近的像点的能力。

**调制传递函数** 输出图像的调制度  $M_o$  与输入图像的调制度  $M_i$  之比。

$$\text{MTF} = \frac{M_o}{M_i} \times 100\% \quad (7-6)$$

## 第7章 光电成像器件

### 7.1 像管

#### 7.1.3 变像管

##### 1. 红外变像管

**红外变像管的基本结构:** 红外变像管的基本结构如图 7-10 所示。

- 对于波长小于  $1.15\mu\text{m}$  的近红外辐射, 变像管利用银-氧-铯光电阴极, 直接进行变像。
- 对于波长大于  $1.15\mu\text{m}$  的红外辐射, 因没有合适的光电阴极, 利用光电导技术进行间接变像。

**光电导技术的变像原理:** 入射的红外辐射图像经红外物镜成像在光电导靶上, 在靶面上形成相应的电势分布图像; 当电子枪发射的电子束在偏转磁场的作用下, 入射到靶面上时, 就会受到电势图像的调制; 原入射的电子束中有一部分电子再经偏转磁场和电场的作用而返回到荧光屏上, 使之发出荧光。

**红外变像管的应用:** 军事、公安等方面的红外夜视仪器; 暗室管理、物理实验、激光器校准和夜间生物活动的观察。

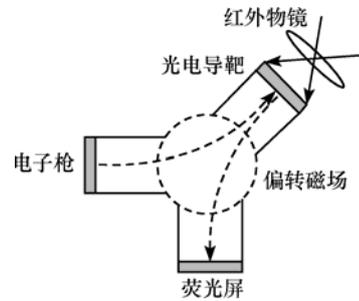


图 7-10 光电导式红外变像管原理示意图

##### 2. 紫外变像管

**紫外变像管的基本结构:** 与图 7-10 相似, 只是光电阴极的材料和光谱响应有所不同。

紫外敏感(日盲型)的光电阴极材料及其响应波段分别为:

- Sb-Cs 光电阴极(石英玻璃窗口),  $\lambda > 200\text{nm}$ ;
- Cs-I 光电阴极( $\text{MgF}_2$ 或 $\text{LiF}$ 窗口),  $105\text{nm}$ 或 $115\sim 195\text{nm}$ ;
- Rb-Te 光电阴极(蓝宝石窗口),  $145\sim 320\text{nm}$ 。

**紫外变像管的应用:** 和光学显微镜结合起来, 用于医学和生物学等方面的研究。

##### 3. 选通式变像管

**选通式变像管的结构:** 如图 7-11 所示, 选通式变像管的关键是在电子光学系统的阴极与阳极之间增加一对带孔栏的金属电极(称为控制栅)。

**选通式变像管的工作原理:** 改变控制栅的电压, 从而控制变像管的导通和光电子的发射。

- 变像管导通——控制栅的电压  $U_G$  比光电阴极电压高  $175\text{V}$ 。
- 变像管截止——控制栅的电压  $U_G$  比光电阴极电压低  $90\text{V}$ 。

**选通式变像管选通的工作方式:**

- 单脉冲触发式——主要用于高速摄影中的电子快门。
- 连续脉冲触发式——主要用于主动红外选通成像与测距。

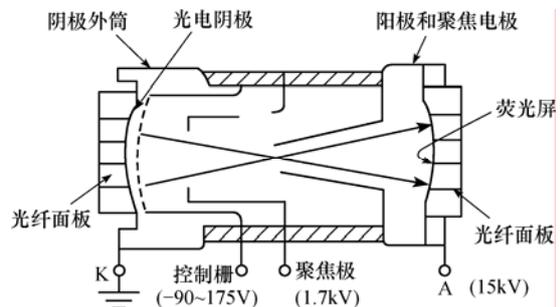


图 7-11 选通式变像管示意图

## 第7章 光电成像器件

### 7.1 像管

#### 7.1.4 像增强器

##### 1. 像增强器的结构及原理

**像增强器的基本结构：**由光电阴极、电子光学系统、电子倍增器以及荧光屏等功能部件组成。

**像增强器的工作原理：**电子光学系统和电子倍增器将光电阴极所发射的光电子图像传递到荧光屏，在传递过程中使电子流的能量增强（有时还使电子的数目倍增），并完成电子图像几何尺寸的缩小/放大；荧光屏输出可见光图像，且图像的亮度被增强到足以引起人眼视觉的程度，从而可以在夜间或低照度下直接进行观察。

**像增强器的分类：**级联式像增强器、带有微通道板的像增强器。

##### 2. 第一代像增强器——级联式像增强器

**级联式像增强器的结构：**由几个分立的单级像增强器组合而成。

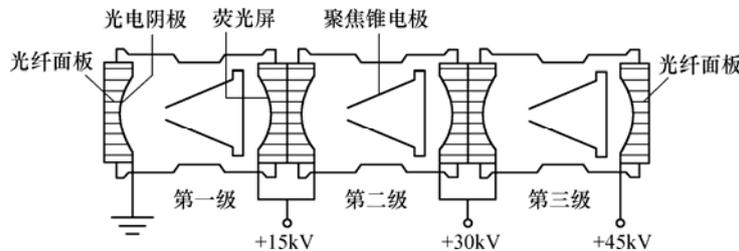


图 7-13 三级级联式像增强器的结构示意图

**级联式像增强器的性能：**光灵敏度为  $400\sim 800\mu\text{A}/\text{lm}$ ，光辐射灵敏度为  $20\text{mA}/\text{W}$ （波长为  $0.85\mu\text{m}$ ）；若单级像管的分辨率大于  $50\text{lp}/\text{mm}$ ，则三级级联式像增强器的分辨率可达  $30\sim 38\text{lp}/\text{mm}$ 、亮度增益可达  $10^5$ 。

**级联式像增强器的特点：**体积大、重量重，防强光能力差（最后一级荧光屏容易被前两级增强的电子流“灼伤”），使用时须避免强光照射。

##### 3. 第二代像增强器——微通道板像增强器

**微通道板（Micro Channel Plate）** 一种二维高增益电子倍增器，简称 MCP

**微通道板的结构：**微通道板是由上百万个平行而紧密排列的微细空心含铅玻璃纤维（微通道）组成的二维阵列。通道内壁覆盖一层具有较高二次电子发射系数的薄膜，两个端面镀有镍层，分别形成输入/输出电极，极板之间施加直流高压  $U$ （可达  $10\text{kV}$ ），外缘带有加固环，微通道板通常不垂直端面，而是成  $7\sim 15^\circ$  的斜角。

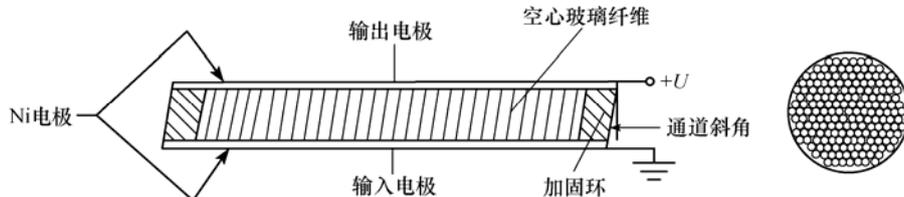


图 7-14 微通道板的剖面/截面结构示意图

**微通道板的电子倍增原理：**如图 7-15，微通道的入口端对着像管的光电阴极、并位于电子光学系统的像面上，出口端对着荧光屏，微通道的两个端面电极上施加工作电压  $U$  形成电场。高速光电子进入通道，与内壁碰撞，入射电子得到倍增。重复这一过程直至倍增

电子从通道出口端射出为止。

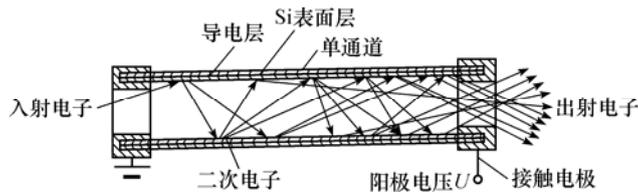


图 7-15 微通道内的电子倍增原理示意图

**微通道板的特点：**可使整幅电子图像得到增强；可得到  $10^8$  量级的电子增益。

**微通道板的应用：**用微通道板代替一般光电倍增管中的电子倍增器，构成微通道板光电倍增管（MCP PMT），可响应和探测更窄的脉冲或更高频率的光辐射。

**微通道板像增强器的结构：**将微通道板置入像管的光电阴极与荧光屏之间构成，分为双近贴式和倒像式两种。在这两种结构中，微通道板和荧光屏相距很近。

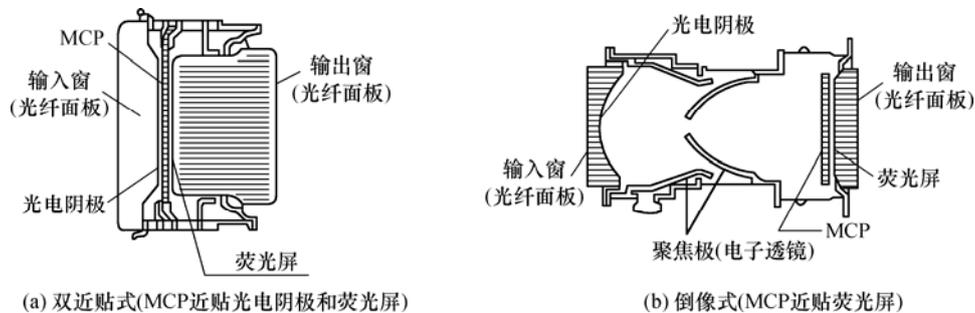


图 7-16 带微通道板像增强器的两种结构形式

**微通道板像增强器的工作原理：**由光电阴极发出的光电子图像，（经电子透镜的作用）入射到微通道板上，经微通道板的电子倍增和加速作用，直接投射到荧光屏上，在输出窗得到亮度增强的荧光图像。

**微通道板像增强器的特点：**有可调的亮度增益；体积小、重量轻，便于与其他光电器件（如光纤面板）配合使用；可自动防强光。

### 3. 二代以后的像增强器

- **第三代像增强器**——负电子亲和势光电阴极微通道板增强器。

**特点：**可同时起到光谱变换和图像增强的作用。

**典型性能：**光度学灵敏度为  $3000 \mu\text{A}/\text{lm}$ 、辐射度学灵敏度为  $100 \text{ mA}/\text{W}$ （波长为  $0.85 \mu\text{m}$  处）、亮度增益为  $1 \times 10^4 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ 、分辨率为  $36 \text{ lp}/\text{mm}$ 。

- **超三代和第四代像增强器**——在第三代像增强器的基础上，通过进一步改进微通道板的性能，或者利用门控电源技术，提高像增强器的分辨率、信噪比等性能参数的像增强器。

### 4. 像增强器的应用

- 可用来对近红外光、可见光、紫外光和 X 射线照射下的景物，进行探测、图像增强和成像。
- 作为微光摄像系统的前一级器件，先对入射图像进行增强，再传递给摄像器件。
- 用于微光夜视、夜盲助视、天文观测、X 射线图像增强、医疗诊断和高速电子摄影快门等技术。

## 第7章 光电成像器件

### 7.1 像管

#### 7.1.5 像管的典型应用

像管在医疗、军事等领域得到了广泛的应用。特别是在现代军事装备中，像管与红外光源、激光器以及光学系统等一起组成完整的光电成像系统（如微光夜视仪、微光瞄准镜、红外夜视仪等），在夜间侦察、瞄准、车辆驾驶等战场作业方面发挥了重要作用。



(a) 不易见的目标图像



(b) 利用微光夜视仪得到的目标图像

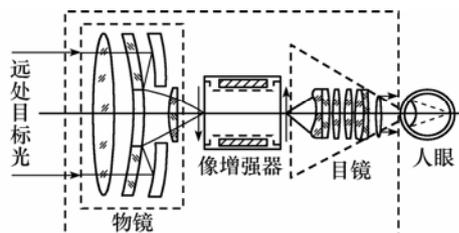
图 7-17 一种微光夜视仪的实用效果

#### 1. 微光夜瞄镜

**工作原理:** 远处目标在夜天光的照射下发出的微弱光学图像被物镜接收并聚焦在像增强器的光电阴极上，像增强器形成的可见光图像再经目镜放大后，可由人眼直接观察。



(a) 美军枪配AN/PVS-14型微光夜瞄镜



(b) 微光夜瞄镜的系统结构

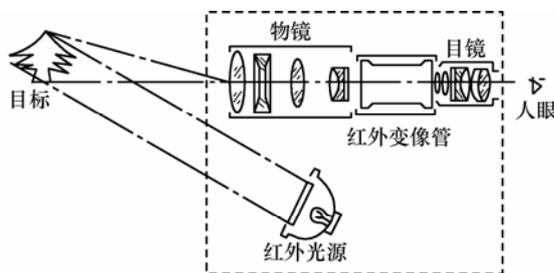
图 7-18 实用的微光夜瞄镜及其系统结构

#### 2. 红外夜视仪

**工作原理:** 由红外光源发出的红外光照射到目标上，经目标反射后，被红外物镜接收并聚焦在红外变像管的光电阴极上，红外变像管形成的可见光图像再经目镜放大后，可由人眼直接观察。



(a) 美国Bushnell 260542型红外夜视仪



(b) 主动式红外夜视仪的系统结构

图 7-19 红外夜视仪及其系统结构

## 第7章 光电成像器件

### 7.2 电真空摄像管

#### 7.2.1 电视制式

##### 1. 扫描制式

**像素** 将光电图像分割成很多单元。

**扫描** 按一定规律依次将图像中的每一像素的电（电荷）信号读出的过程或者（显示器）将时序电信号重现为光学图像的过程。

**制式** 扫描时所遵守的规则。

**行扫描** 扫描点在水平方向的运动。

**行扫描的正程** 自左至右的扫描。

**行扫描的逆程** 自右至左的回扫。

**场扫描** 扫描点在垂直方向的运动。

**场扫描的正程** 自上而下的扫描。

**场扫描的逆程** 自下而上的回扫。

**一帧** 扫描点从原点出发、历时一个周期再次回到原点，输出的全部图像信息。

**扫描方式的分类：**

- 逐行扫描方式——一帧（或一场）图像由逐次扫描 1、2、3、4...等全部行（实线）而得。逐行扫描所要求的行频很高，主要用于高清晰成像测量系统。
- 隔行扫描方式——一帧图像由奇、偶两场构成。第一场先扫描 1、3、5、7...等奇数行（实线），称为奇数场；当扫描至最后一行的中点 A 时，电子束在垂直方向回扫（即 A→B），然后进行第二场的 2、4、6、8...等偶数行（虚线）的扫描，称为偶数场。当扫完右下角最后一个像素，电子束又回扫到左上角的起始点，完成一帧图像的扫描。

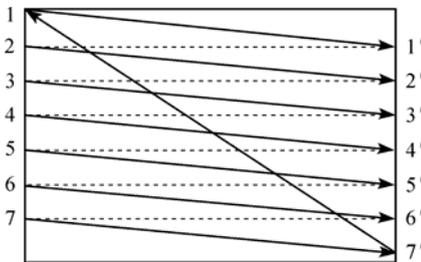


图 7-21 逐行扫描方式

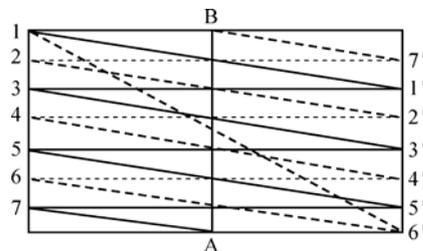


图 7-22 隔行扫描方式

**场扫描周期**  $T_v = T_{vt} + T_{vr}$ （其中正程时间  $T_{vt}$  远大于逆程时间  $T_{vr}$ ）。

**行扫描周期**  $T_h = T_{ht} + T_{hr}$ （其中正程时间  $T_{ht}$  远大于行扫描的逆程时间  $T_{hr}$ ）。

**场频** 场扫描周期的倒数，用  $f_v = 1/T_v$  表示；

**行频** 行扫描周期的倒数，用  $f_h = 1/T_h$  表示。

##### 2. 电视制式

**电视制式** 广播电视系统中采用的信号传输和接收规则，如 PAL、NTSC 制式等。

**视频信号** 按电视制式输出的一维时序电信号。

**我国电视标准：**采用 PAL-D 制。即：场频 50Hz，帧频 25Hz；隔行扫描，每帧 625 行；场周期 20ms；行周期 64μs；视频信号带宽 6MHz。

##### 3. 全电视信号

普通摄像器件输出的仅是视频信号，需要与显示器组合起来，获得目标的图像。要在屏幕上正确地显示出目标图像，需要在视频信号中加入行/场同步脉冲信号，以控制图像显示的起始位置。而在行/场回程过程中，不传送图像信号，需要在回程期间加入行/场（帧）消隐脉冲信号。

扫描过程：如图 7-23 所示，摄像器件从 A 点正程扫描到 B 点时，输出如图 (a) 所示的阶梯电压图像信号，其中白色图像信号为低电平、黑色图像信号为高电平，中间灰色图像电平介于黑、白电平之间。从 B 点回扫到 C 点时，不输出图像信号，代之以黑色电平（即行消隐信号），控制显示器，使之输出为零。并且，在开始回扫后，在电视信号中加行同步信号，不需要显示。

当一场结束后，摄像机即发出场消隐和场同步信号，显示器接收到它们后，即进行场逆程回扫，也不显示。由行/场同步信号、行/场（帧）消隐脉冲和图像信号即组成摄像机的（黑白）全电视信号，如图 (b) 所示。

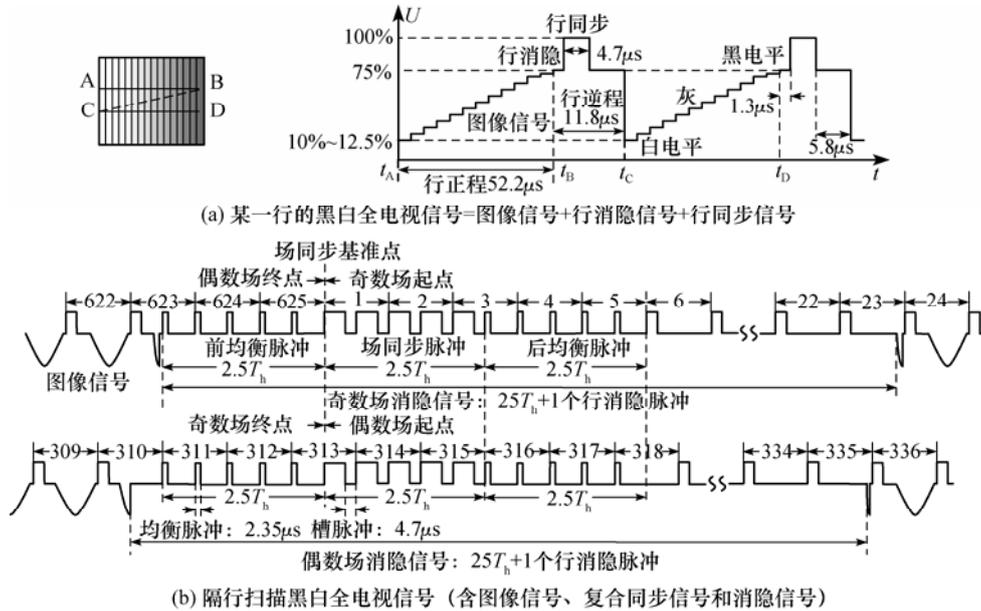


图 7-23 黑白全电视信号

## 第7章 光电成像器件

### 7.2 电真空摄像管

#### 7.2.2 电真空摄像管的结构原理

**电真空摄像管** 能够将二维光学图像转换为“电气”图像、输出视频信号的真空光电管。

**电真空摄像管的分类：**

- 光电发射型摄像管——利用外光电效应进行光电转换，其增益和灵敏度都很高，可工作在亮度较低场合，信号质量好。
- 光电导式摄像管——利用内光电效应进行光电转换，其结构简单、体积小、使用方便，广泛用于电视领域。

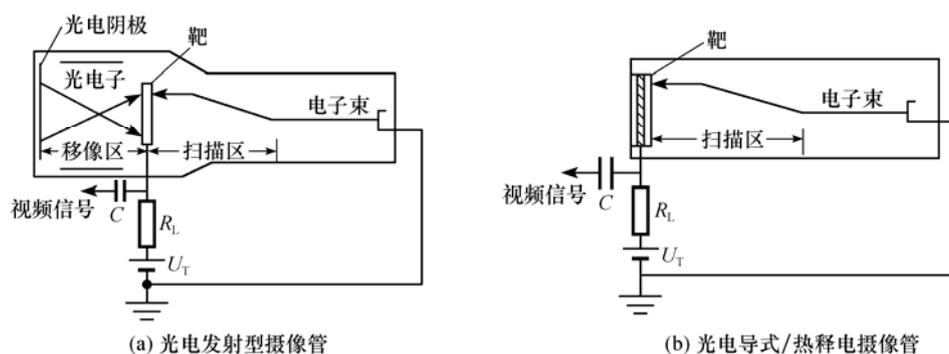


图 7-24 两类真空摄像管的结构示意图

**电真空摄像管的工作过程：**

- 光电变换——被摄景物的光学图像通过物镜投射到摄像管上，摄像管受光照射的材料产生光电（或光热）效应，在摄像管的光电阴极（或靶面）建立起与入射光照度相对应的“电气”图像；
- 光电信息的存储——摄像管靶的每个像元在一帧周期内连续积累电荷（或电势），并保持其空间分布；
- 扫描输出——利用电子枪发射出来的电子束依次扫描靶面各像素，将靶面的电荷（或电势、电阻）图像有序地转变成视频信号输出。

## 第7章 光电成像器件

### 7.3 固体摄像器件

#### 7.3.1 电荷耦合器件

##### 1. 电荷耦合器件的结构与工作原理

**电荷耦合器件** 以电荷作为信号载体的半导体光电器件，简称 CCD。

CCD 的分类：

- 表面沟道电荷耦合器件 (SCCD) —— 信号电荷存储在半导体与绝缘体之间的界面，并沿界面传输。
- 体内沟道或埋沟道电荷耦合器件 (BCCD) —— 信号电荷存储在离半导体表面一定深度的体内，并在半导体内部沿一定方向传输。

CCD 的基本单元：一个由金属-氧化物-半导体组成的电容器（简称 MOS 结构）。

CCD 线阵：由多个像素（一个 MOS 单元称为一个像素）组成。

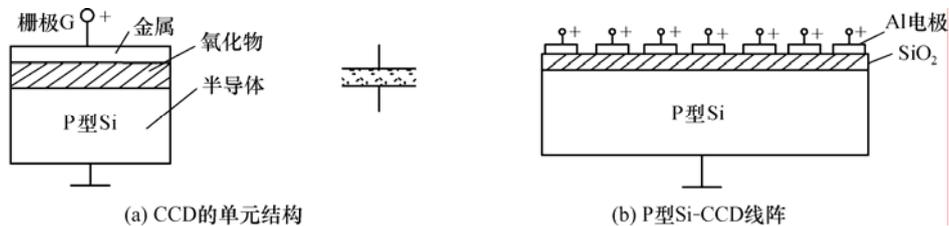


图 7-25 CCD 的单元与线阵结构示意图

MOS 电容器的电学特性：

- 栅极未加电压时——P 型 Si 内的多数载流子（空穴）均匀分布。
- 栅极施加正电压  $U_G$  后——在半导体上表面附近形成一层多子的耗尽区（势阱）。
- 电压  $U_G$  超过阈值电压  $U_{th}$  时——形成反型层（沟道）。

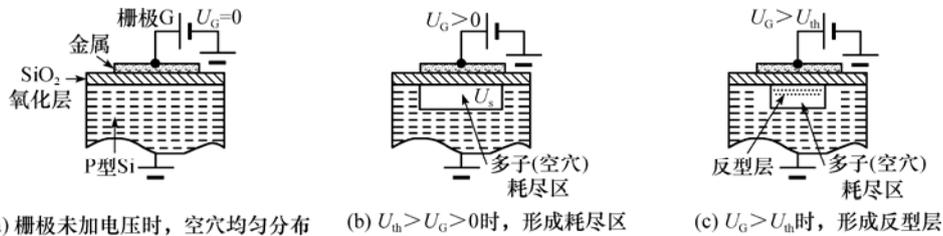


图 7-26 CCD 栅极电压  $U_G$  的变化对 P 型 Si 耗尽区的影响

**电荷包的存储：** CCD 单元能够存储电荷包、其存储能力可通过调节  $U_G$  而加以控制。

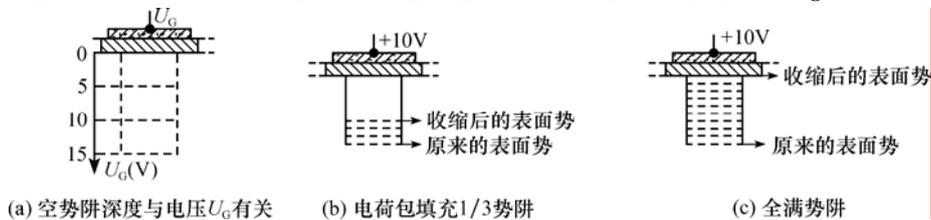


图 2-27 注入电荷包时，势阱深度随之变化的示意图

每个金属栅极下的势阱中能够存储的最大（信息）电荷量为：

$$Q = C_{ox} \cdot U_G \cdot A_d \quad (7-8)$$

CCD 中电荷包的转移：将电荷包从一个（因存储了这些电荷而变浅的）势阱转入相邻的深势阱。

### 三相 CCD 中电荷包的转移过程:

- 开始时刻电荷包存储在栅极电压为 10 V 的第 1 个栅极下的深势阱里, 其他栅极上加有大于阈值的低电压 (2 V);
- 经时间  $t_1$  后, 第 1 个栅极电压仍保持为 10 V, 而第 2 个栅极的电压由 2 V  $\rightarrow$  10 V;
- 栅极靠得很近的两个势阱发生耦合, 使原来在第 1 个势阱中的电荷包被耦合势阱共享;
- 在  $t_2$  时刻, 第 1 个栅极的电压由 10 V  $\rightarrow$  2 V、第 2 个栅极的电压仍为 10 V, 势阱 1 收缩, 电荷包流入势阱 2 中。

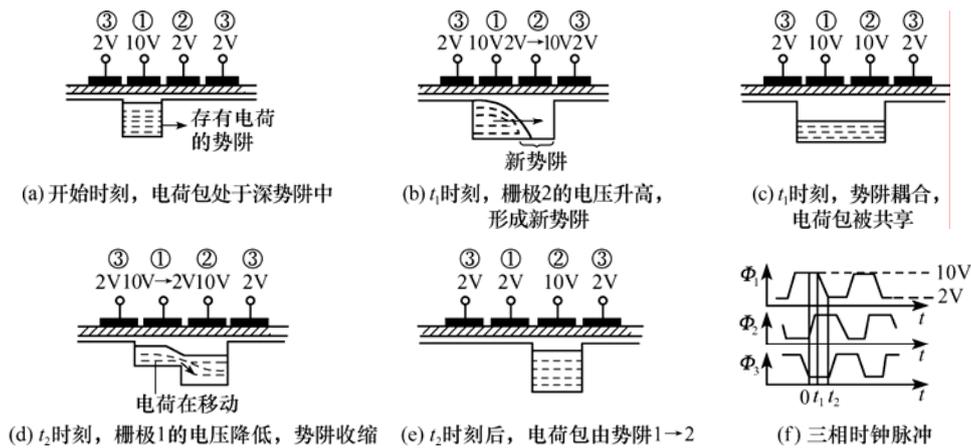


图 7-28 三相 CCD 中电荷包的转移过程示意图

### 电荷包的注入方式:

- 光注入——光束直接照射 P 型 Si-CCD 衬底, 分为正面照射与背面照射两种。
- 电注入——当 CCD 用于信息存储或信息处理时, 通过输入端的输入二极管和输入栅极, 把与信号成正比的电荷注入到相应的势阱中。

**电流输出方式:** 如图 7-31 所示。当电荷包在驱动脉冲的作用下向右转移到最末一个转移栅极 CR2 下的势阱中后, 若 CR2 电极上的电压由高变低, 则势阱收缩, 电荷包通过栅极 OG 下面的沟道进入  $N^+$  区。  $N^+$  区对电子来说相当于一个深势阱, 进入  $N^+$  区后的电荷包将被迅速拉走而产生电流  $I_d$ 。因此 A 点的电位  $U_A (= U_D - I_d \cdot R)$  发生变化。进入二极管的电量  $Q_s$  越大,  $I_d$  越大,  $U_A$  下降越厉害。利用  $U_A$  的变化来检测  $Q_s$ 。隔直电容 C 将  $U_A$  的变化量取出, 并通过场效应放大器的 OS 端输出。

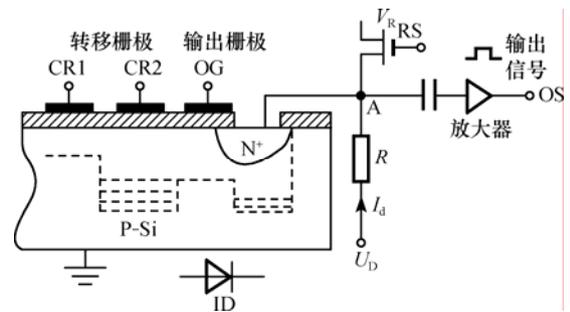


图 7-31 电流输出方式电路图

**CCD 工作过程概述:** 先将半导体产生的 (与照度分布相对应) 信号电荷注入到势阱中, 再通过内部驱动脉冲控制势阱的深浅, 使信号电荷沿沟道朝一定的方向转移, 最后经输出电路形成一维时序信号。

### 2.CCD 的主要特性参数

**电荷转移效率** 一次转移后到达下一个势阱中的电荷量与原来势阱中的电荷量之比。

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_0} \quad (7-9)$$

### 电荷转移损失率

$$\varepsilon = \frac{Q_0 - Q_1}{Q_0} = 1 - \eta \quad (7-10)$$

转移效率  $\eta$  是电荷耦合器件能否实用的重要因素。

**暗电流:** CCD 在无光注入也无电注入情况下的输出信号。

**暗电流的主要来源:**

- 半导体衬底的热激发;
- 耗尽区内的产生-复合中心的热激发 (此为主要原因);
- 耗尽区边缘的少数载流子的热扩散;
- $\text{SiO}_2/\text{Si}$  界面处的产生-复合中心的热激发。

**灵敏度:** 投射在光敏像元上的单位辐射功率所产生的输出信号电压或电流。

$$S_v = \frac{U_s}{\Phi} \quad (7-12)$$

**平均量子效率:** 在整个波长范围内的灵敏度。

**光谱响应:** CCD 光谱响应与光敏面结构、光束入射角及各层介质的折射率、厚度、消光系数等多个因素有关。

**光电特性:** 输出电压与输入照度之间的关系。对于 Si-CCD, 在低照度下, 其输出电压与输入照度有良好的线性关系; 而当输入照度超过 100 lx 以后, 输出有饱和现象。

**CCD 的噪声:** 主要包括散粒噪声、转移噪声和热噪声。

**分辨率:** 实际中, CCD 器件的分辨率一般用像素数表示, 像素越多, 则分辨率越高。

**极限分辨率:** 空间采样频率的一半。

**调制传递函数 (MTF):** 取决于器件结构 (像素宽度、间距) 所决定的几何 MTF<sub>1</sub>、光生载流子横向扩散衰减决定的 MTF<sub>D</sub> 和转移效率决定的 MTF<sub>T</sub>, 总的 MTF 是三项的乘积。CCD 总的 MTF 随图像中各成分空间频率的提高而下降。

**三相 CCD 工作频率的下限:**

$$f_{\min} = \frac{1}{3\tau_c} \quad (7-13)$$

**三相 CCD 工作频率的上限:**

$$f_{\max 1} \leq \frac{1}{3\tau_g} \quad (7-14)$$

**CCD 器件的动态范围:** 势阱中可以存储的最大电荷量 (或输出的饱和电压  $U_{\text{sat}}$ ) 与暗场 (无光信号) 情况下的噪声峰-峰值电压  $U_{\text{p-p}}$  之比。动态范围表征 CCD 器件能够正常工作的照度范围。增大动态范围的途径是降低暗电流, 特别是控制暗电流尖峰。

### 3. 电荷耦合摄像器件

**电荷耦合摄像器件** 一类可将二维光学图像转换为一维时序电信号的功能器件, 由光电探测器阵列和 CCD 移位寄存器两个功能部分组成, 简称为 CCD。可分为线阵和面阵两大类型。

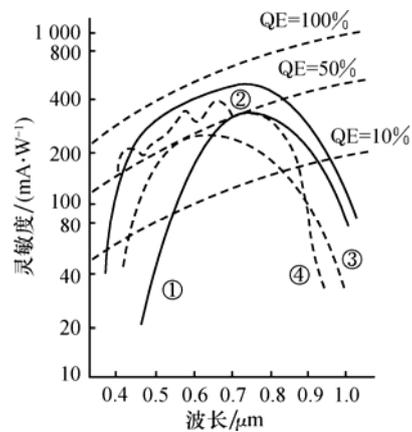


图 7-32 四种不同 CCD 的光谱响应特征曲线

①前照式单层多晶硅; ②减薄背照式;  
③前照式虚相结构; ④前照式多晶硅/透明金属氧化物型

**单沟道线阵CCD结构：**由行扫描电压 $\Phi_p$ 、光敏二极管阵列、转移栅 $\Phi_x$ 、三相CCD移位寄存器、( $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$ 、 $\Phi_3$ )驱动脉冲和输出机构等构成。

**单沟道线阵CCD工作原理：**在光积分时间内，行扫描电压 $\Phi_p$ 为高电平、转移栅 $\Phi_x$ 为低电平，光敏二极管阵列被反偏置、并与CCD移位寄存器彼此隔离，在光辐射的作用下产生信号电荷并存储在光敏元的势阱中，形成与入射光学图像相对应的电荷包的“潜像”。当转移栅 $\Phi_x$ 为高电平时，光敏阵列与移位寄存器沟通，光敏区积累的信号电荷包通过转移栅 $\Phi_x$ 并行地流入CCD移位寄存器中。在光积分时间内，已流入CCD移位寄存器中的信号电荷在三相驱动脉冲的作用下，按其在CCD中的空间排列顺序，通过输出机构串行地转移出去，形成一维时序电信号。

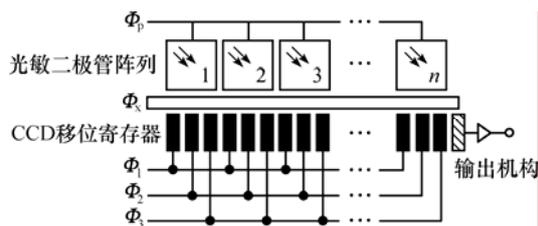


图 7-33 三相单沟道线阵 CCD 摄像器件的结构

**单沟道线阵 CCD 特点及应用：**单沟道线阵 CCD 的转移次数多、转移效率低、调制传递函数 MTF 差，只适用于像素数较少的摄像器件。

**双沟道线阵 CCD 结构：**有两列 CCD 模拟移位寄存器 A、B，分列在光敏阵列的两边。

**双沟道线阵 CCD 工作原理：**当转移栅 A、B 为高电位（对于 N 沟道器件）时，光敏阵列势阱里存储的信号电荷包将同时按照箭头指定的方向分别转移到对应的移位寄存器内，然后在驱动脉冲的作用下分别向右转移，最后经过输出放大器以一维时序电信号的方式输出。

**双沟道线阵 CCD 特点：**同样光敏单元数目的双沟道线阵 CCD 的转移次数比单沟道线阵 CCD 减少一半，转移时间缩短一半，总转移效率大大提高。

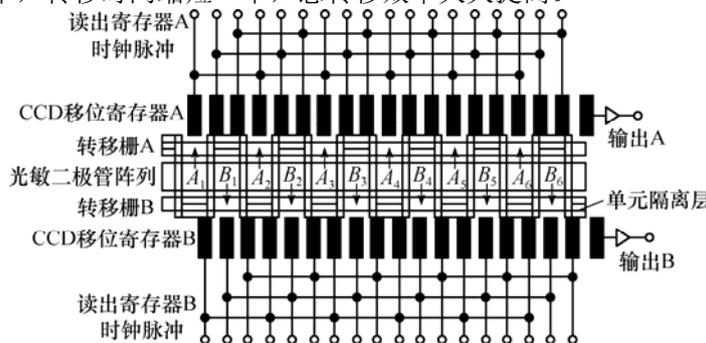


图 7-35 双沟道线阵 CCD 的结构

**二维面阵 CCD 摄像器件** 按一定的方式将一维线阵的光敏单元和 CCD 移位寄存器排列成二维阵列。可分为帧转移方式、隔列转移方式、线转移方式和全转移方式等四种。

**帧转移面阵 CCD 工作原理：**当光敏区开始进行第二帧图像的光积分时，暂存区利用这一时间，将电荷包一次一行地转移给 CCD 移位寄存器，变为串行时序电信号输出。当 CCD 移位寄存器将其中的一行电荷包输出完毕，暂存区里的电荷包再向下移动一行，又转移给 CCD 移位寄存器。当暂存区中的电荷包被全部转移完毕，再进行第二帧电荷包的转移。

**帧转移面阵 CCD 的特点：**结构简单、光敏像元的尺寸很小、调制传递函数 MTF 较高，但光敏

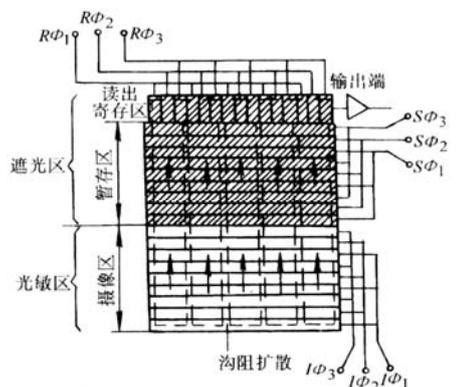


图 7-37 帧转移三相面阵 CCD 的原理结构图

面积占总面积的比例（填充因子）小。常用面阵 CCD 的像素数有  $512 \times 512$ 、 $1024 \times 768$  等，帧频可高达 1200 帧/秒，响应波长可涵盖紫外、可见光和红外波段。

#### 微光 CCD 的构成方法：

- 将像增强器与 CCD 耦合起来，构成图像增强型 CCD（简称 IICCD）；
- 用光电子轰击 CCD 的光敏元件，构成电子轰击型 CCD（简称 EBCCD）；
- 在 CCD 芯片的转移寄存器与输出放大器之间增加一个特殊的增益寄存器（对信号电荷进行倍增），构成电子倍增 CCD（简称 EMCCD）；

#### 像增强器与 CCD 的耦合方式：

- 光学耦合方式，利用光学成像系统将像增强器与 CCD 耦合起来；
- 光纤耦合方式，利用光纤面板（光纤锥）将像增强器与 CCD 直接耦合起来。

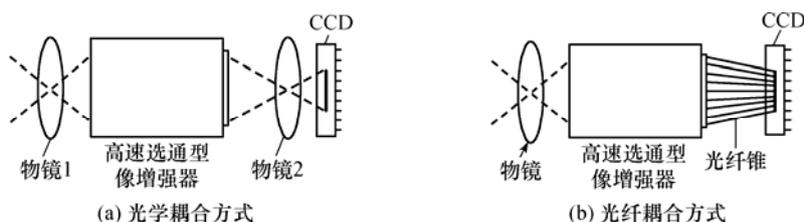


图 7-38 像增强器与 CCD 芯片的耦合方式

**电子轰击型 CCD 基本原理：**入射光子照射光电阴极后转换为光电子，光电子被电子光学系统加速并聚焦成像在 CCD 的光敏面上，高速轰击 CCD，光敏元件中产生信号电荷，信号电荷再由转移寄存器输出。

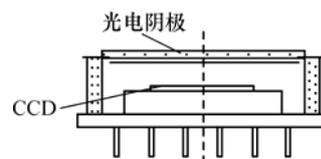


图 7-39 近贴式 EBCCD 的结构

**电子轰击型 CCD 特点：**灵敏度高、暗电流小，但工作寿命短。

**电子倍增 CCD 原理：**增益寄存器的结构与一般的 CCD 类似，只是在电子转移过程第二阶段的势阱被一对高压(40~50)V 电极下的深势阱取代，信号电子在高压下被电离、形成新的电子。每次电离后的电子数目约为原来的 1.015 倍，通过数百次的电离，可使输出信号的强度大幅提高。

**电子倍增 CCD 特点：**信噪比高，空间分辨率好于 IICCD，输出图像的质量更好。

**微光 CCD 的应用：**于军事、天文观测等高性能光电探测。

**微透镜阵列与 CCD 摄像器件的集成的目的：**采用 CCD 与微透镜集成可提高 CCD 的填充因子、提高其灵敏度及信噪比（SNR）。

**微透镜的作用：**使原本落入介电层上（死区）的光子因微透镜的聚焦作用而偏折落入光敏区，从而提高填充因子。

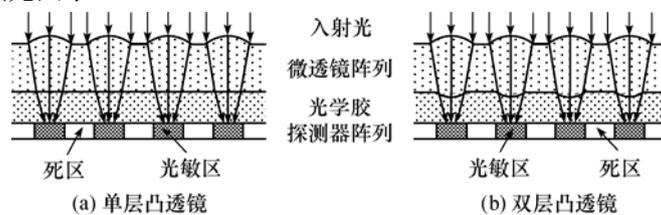


图 7-41 微透镜阵列与 CCD 摄像器件集成的两种形式

第7章 光电成像器件  
 7.3 固体摄像器件  
 7.3.2 CMOS 图像传感器

**CMOS 图像传感器** 将光敏阵列、放大器、A/D 转换器、存储器、数字信号处理器和计算机接口电路等集成在一块硅片上的光电成像器件。

1. CMOS 图像传感器的结构与工作原理

**CMOS 图像传感器的结构：**如图 7-42 所示，其主要组成部分是集成在同一硅片上的像敏单元阵列和 MOS 场效应管集成电路。

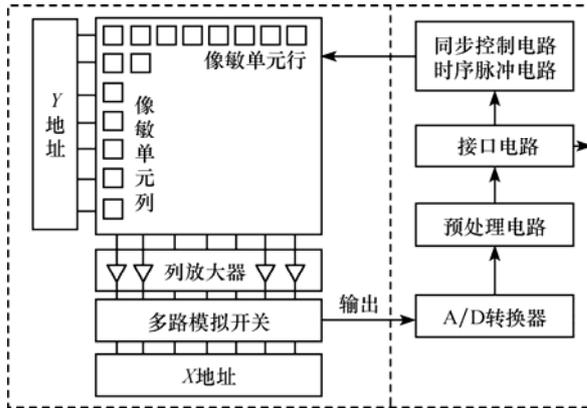


图 7-42 CMOS 图像传感器的结构示意图

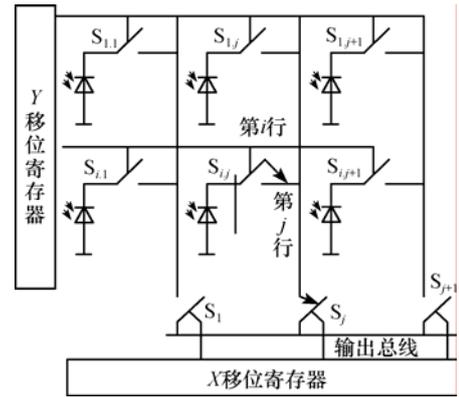


图 7-43 CMOS 图像传感器阵列原理示意图

**图像信号的输出过程：**如图 7-43 所示，在 Y 方向地址译码器的控制下，按序接通每行像元上的模拟开关（如第 i 行、第 j 列的开关  $S_{i,j}$ ），光电信号通过行开关传送到列线上，再通过 X 方向地址译码器的控制，输送到放大器。行、列开关的导通由两个方向地址译码器上所加的时序脉冲控制，可以实现逐行扫描或隔行扫描的输出方式，也可以只输出某一行或某一列的信号（与线阵 CCD 类似），还可选择所希望观测的某些像素的光电信号，如图中第 i 行、第 j 列像元的信号  $S_{i,j}$ 。

2. CMOS 图像传感器的像元结构

**像元结构** 每个成像单元的电路结构。

**像元结构的分类：**被动式和主动式两类。

**被动像元结构：**如图 7-44 所示，它由光电二极管和地址选通开关两部分构成。

**被动像元的工作原理：**如图 7-45 所示，复位脉冲启动复位操作，光电二极管的输出电压被置 0；光电二极管开始光信号的积分；积分工作结束时，选址脉冲启动选址开关，光电二极管中的信号传输到列总线上；再经公共放大器 A 放大后输出。

**被动像元结构的缺点：**固定图像噪声大、图像信号的信噪比低。

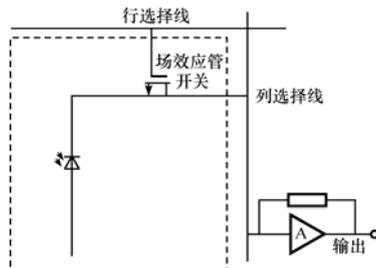


图 7-44 CMOS 被动像元结构

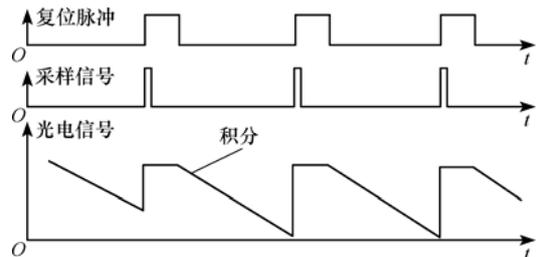


图 7-45 被动像元图像信号的读出时序

**主动像元结构：**如图 7-46 所示。图中，场效应管 $V_1$ 构成光电二极管的负载，其栅极接在复位信号线上。

**主动像元的工作原理：**如图 7-47 所示，复位脉冲出现， $V_1$ 导通，光电二极管被瞬时复位；复位脉冲消失后， $V_1$ 截止，光电二极管开始光信号积分。场效应管 $V_2$ 将光电二极管输出的光电信号进行电流放大。场效应管 $V_3$ 用作选址模拟开关，选通脉冲到来时，开关 $V_3$ 导通，光积分结束，被放大的光电信号就输送到列选通线上。

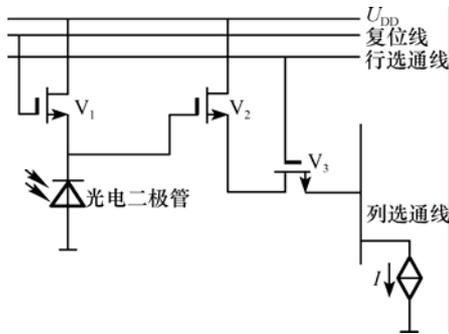


图 7-46 CMOS 的主动像元结构

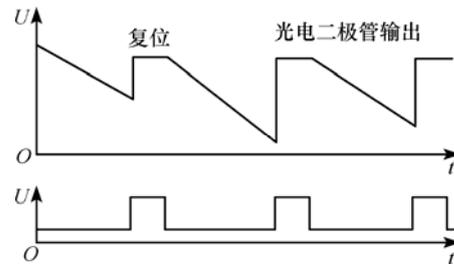


图 7-48 主动像元图像信号的读出时序

**主动像元结构与被动像元结构的主要区别：**主动像元的信号是先放大、再通过场效应管模拟开关传输，其固定图像噪声降低，图像信号的信噪比显著提高。

### 3. CMOS 图像传感器的应用

广泛用于数码相机、微型和超微型摄像机以及游戏机、手机、视频通信、PDA、条码识别、汽车、机顶盒、PC 摄像、医疗仪器、保安监视、生物特征识别、高速影像应用等领域。

### 4. CMOS 图像传感器与 CCD 的特性比较

#### 最大差异：

- 单元结构：CMOS 图像传感器带放大器。
- 随机访问能力：CMOS 图像传感器是信号寻址读出而 CCD 是信号顺序读出。

#### 应用差别：

- CCD 低噪声、高分辨率、高灵敏度等高画质性能——占据图像传感器高端市场。
- CMOS 高集成度、高速、小体积、低价格等特点——占据低端市场大的份额。

## 第7章 光电成像器件

### 7.3 固体摄像器件

#### 7.3.3 红外焦平面阵列器件

##### 1. 热成像系统

**热成像系统** 能输出热图的装置，可分为光机扫描型和凝视型两种。

**热图** 通过对物体辐射能的探测及信号处理，形成与物体辐射（或温度）分布相对应的、反映目标特征的可见光图像。

**光机扫描型热成像系统：**采用红外光学系统和机械扫描器依次对被测目标作二维空间的扫描，利用 PbS、InSb 或 Ge: Hg 等单元或多元探测器接收瞬时视场内的目标光辐射信号，转换成一维时序电信号。电信号经过隔直流电路消除背景辐射、放大处理后，在显示器上输出对比度良好的目标热图，如图 7-48 所示。

**光机扫描型热成像系统的特点及应用：**结构复杂、要求高（如要求探测器的响应速度快）、体积较大、可靠性低、成本较高。应用在红外遥感、新一代坦克瞄准具等方面。

**凝视型热成像系统：**利用红外焦平面阵列器件，把二维被测目标的红外辐射图像转换为电荷图像，再借助 CCD 自扫描技术，输出一维时序电信号，最后经电路处理，输出景物热图。

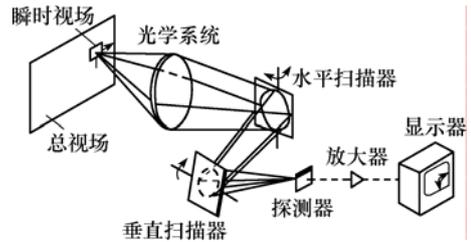


图 7-48 光机扫描型热成像系统结构示意图

##### 2. 红外焦平面阵列器件的结构原理

**红外焦平面阵列器件** (Infrared-Ray Focus Plane Array) 一类用于凝视型热成像系统的面阵成像器件，简称 IRFPA。

**IRFPA 的基本结构：**包括探测器、信号读出和信号处理等部分。

**IRFPA 的结构分类：**

- 单片式结构——整个 IRFPA 做在同一块芯片上，又称整体式。
- 混合式结构——把探测器与信号读出部分(用普通的 Si-CCD) 分开。
- Z 平面式——将信号读出与信号处理部分采用叠层的方法组装成模块，再把模块与探测器连接起来，又称立体式。

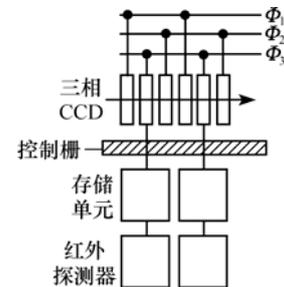


图 7-50 IRFPA 的基本结构

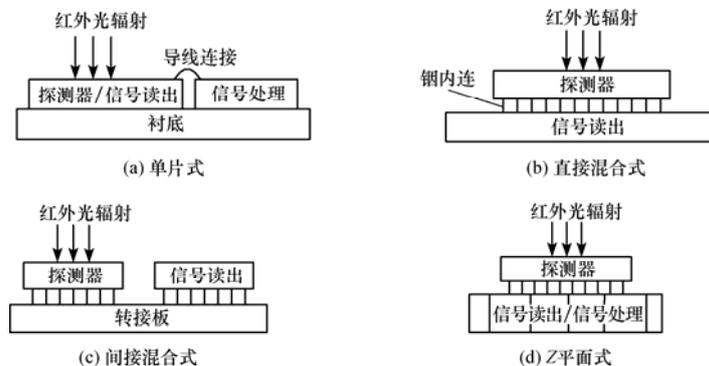


图 7-51 IRFPA 的几种不同结构

红外焦平面阵列器件的工作波段：1~3  $\mu\text{m}$ 、3~5  $\mu\text{m}$  和 8~12  $\mu\text{m}$ 。

用途：多用于探测常温（300 K）背景中的目标。

### 3.几种 IRFPA 的介绍

光子探测器阵列 IRFPA：

- InSb 探测器阵列——前照式 1×512 像素线阵，背照式 1024×1024 像素面阵。
- HgCdTe 探测器阵列——1024×1024 像素面阵，响应波段 1~2.5 $\mu\text{m}$ ，主要用于空间成像光谱仪；640×480 像素面阵，响应波段 3~5 $\mu\text{m}$ ，主要用于战术导弹寻的器和战略预警监视系统；还有一种响应波段 8~12 $\mu\text{m}$ ，用于常温下目标红外辐射图像探测。它们的像元尺寸均为 18×18 $\mu\text{m}^2$ 。

光子探测器阵列 IRFPA 属于制冷型 IRFPA，主要用于红外遥感、军事目标的探测与制导等性能要求较高的领域，但成本和价格非常昂贵。

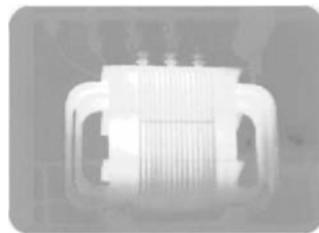
热探测器阵列 IRFPA：

- 碲酸锶钒（SBN）热释电探测器阵列——328×245 像素面阵。
- 二氧化钒（VO<sub>2</sub>）测辐射热计——336×240 像素面阵。
- 多晶硅热电堆——320×240 像素面阵，像元尺寸 28×28 $\mu\text{m}^2$ 。

热探测器阵列可工作在常温下，价格低廉，但其灵敏度要比制冷型 IRFPA 低 1 个量级以上，在准军事和民用市场的凝视型红外成像系统中用得比较广泛。

### 4.IRFPA 的应用

以 IRFPA 为主要器件的红外热成像系统，广泛应用在战略预警、战术告警、侦察、观瞄、导航与制导、遥感、气象、工业探伤、医学和科学研究等军事和民用的许多领域。



(a) 变压器的热图



(b) 隐藏在草丛中的人的热图

图 7-52 红外热像仪（IRFPA）的应用实例

## 第8章 光学信号的调制

### 8.0 本章知识要点

#### 1. 光学调制的基本概念、作用及调制方式：

一次调制、二次调制

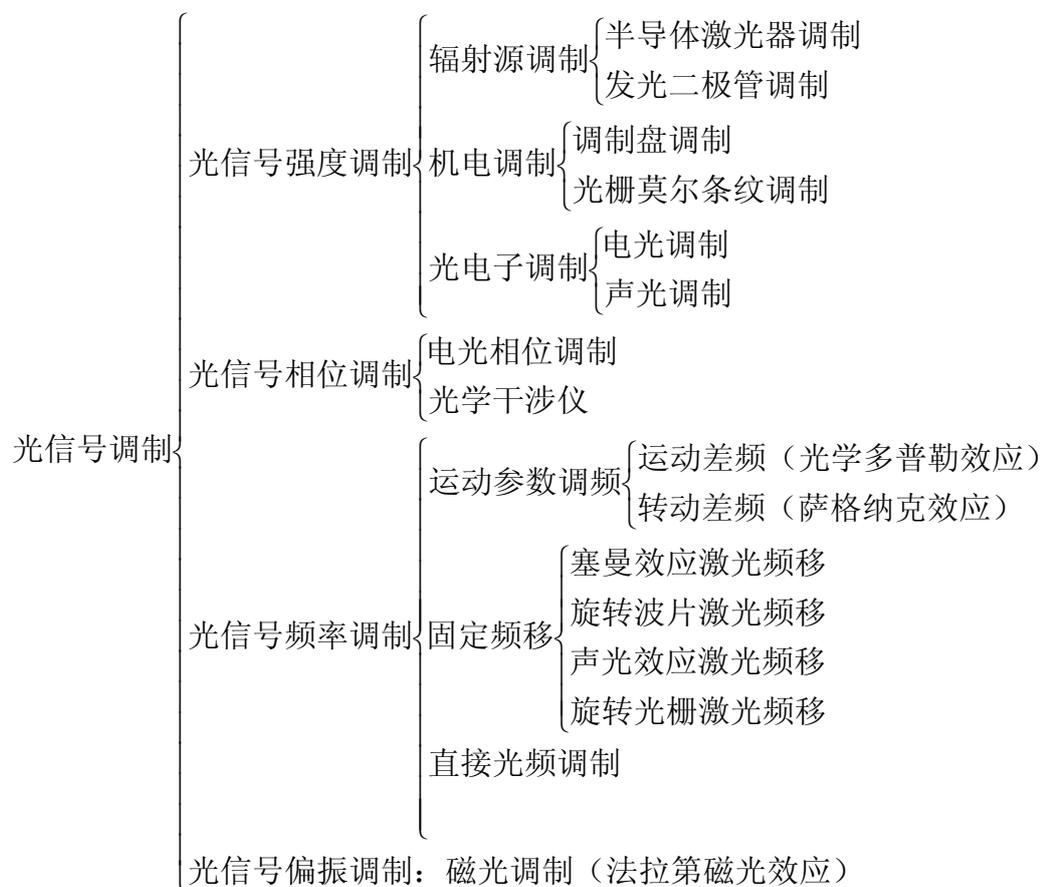
#### 2. 光信号调制的基本原理：

连续波调制：幅度调制（AM）、频率调制（FM）、相位调制（PM）

脉冲调制：脉冲幅度调制（PAM）、脉冲频率调制（PFM）、脉冲宽度调制（PWM）

编码调制：抽样、量化、编码

#### 3. 光信号调制的基本方法：



#### 4. 信号解调的概念及常用电子解调方法：

直线律检波（调幅信号解调）、相敏检波（调相信号解调）

## 第8章 光学信号的调制

### 8.1 光信号调制的概述

#### 1. 光学调制的基本概念

**光载波** 在光电系统中，光波是信息的载体，通常称为光载波。

**光波的电场强度** (光波的电场强度对人的眼睛和感光仪器起作用。)

$$E = E_0 \sin(2\pi\nu t + \varphi_0) \quad (8-1)$$

**光载波的特征参数** 强度 ( $E_0^2$ )、振幅 ( $E_0$ )、频率 ( $\nu$ )、初相位 ( $\varphi_0$ )、偏振、传播方向等。其中，光波强度使用最广泛。

**光学调制** 改变光载波的一个或者几个特征参数的过程。

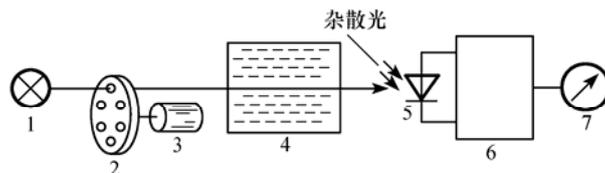
#### 2. 光学调制的两种调制方式

**一次调制** 将信息直接加载到光载波上。

**二次调制** 人为地按确定的时间或空间规律变换载波信号。在光电系统中提到的光学调制通常是指二次调制。它不仅可以用来加载信息，还可以改善系统的工作品质。

#### 3. 一种典型的光学调制系统

图 8-1 所示为利用调制光测量液体浓度的光电系统。其中，液体浓度（信息）对光强参数的调制为一次调制；调制盘（具有确定的时间规律）对光强参数的调制为二次调制。



1—光源；2—调制盘；3—电动机；4—溶液；5—光电探测器；6—放大电路；7—指示表

图 8-1 利用调制光测量液体的浓度的光电系统

## 第8章 光学信号的调制

### 8.2 光信号调制的基本原理

#### 8.2.1 连续波调制

**连续波调制** 连续波调制又称为模拟调制，主要包括调幅（Amplitude Modulation, AM）、调频（Frequency Modulation, FM）和调相（Phase Modulation, PM）三种方式。

调制前的光载波辐射通量： $\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_m \sin(\omega t + \varphi)$

调制后的光载波辐射通量： $\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_m[V(t)]\sin\{\omega[V(t)]t + \varphi[V(t)]\}$ ，其中， $V(t)$ 是由被测信息决定的调制函数， $\Phi_m[V(t)]$ 、 $\omega[V(t)]$ 和 $\varphi[V(t)]$ 分别对应于AM、FM和PM。

##### 1. 振幅调制

**振幅调制（AM）** 载波辐射通量的振幅随调制信号的变化规律而变化的振荡。

调制项： $\Phi_m[V(t)] = [1 + mV(t)]\Phi_m$

光载波： $\Phi(t) = \Phi_0 + [1 + mV(t)]\Phi_m \sin(\omega t + \varphi)$

**调幅系数** 表示调制函数  $V(t)$ 对载波辐射通量幅度的调制能力， $m = \frac{|\Delta\Phi_m|}{\Phi_m} \leq 1$ 。

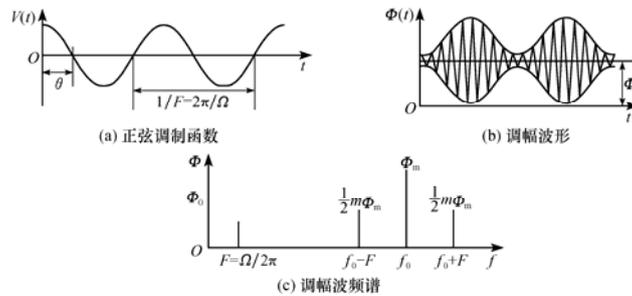


图 8-2 调幅波的波形和波谱

频谱分析的作用：确定调制载波的频谱是选择检测通道带宽的依据。

例：转轴跳动检测：动画[轴跳动检测-均匀](#)、[轴跳动检测-跳动](#)

##### 2. 频率调制

**频率调制（FM）** 载波辐射通量的频率随调制信号的变化规律而变化的振荡。

调制项： $\omega[V(t)] = \omega_0 + \Delta\omega V(t)$

光载波： $\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_m \sin[\omega_0 t + \Delta\omega \int_0^t V(t) dt]$

**调频系数** 表示单位调制频率引起的频偏的大小， $m_f = \frac{\Delta\omega}{\Omega} = \frac{\Delta f}{F}$ 。

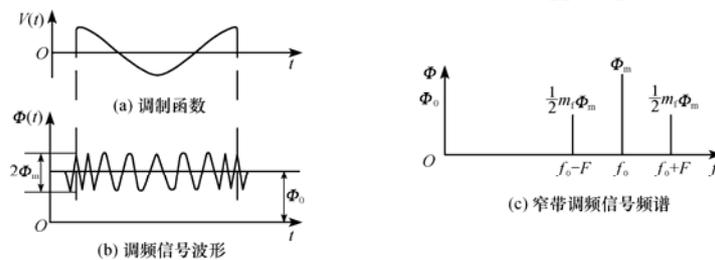


图 8-3 调频信号波形和频谱

### 3.相位调制

**相位调制 (PM)** 载波辐射通量的初始相位角随着调制信号的变化规律而变化的振荡, 它和调频的最终效果都表现为总相角的变化。

调制项:  $\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_m \sin[\omega_0 t + m_f \sin(\Omega t)]$

光载波:  $\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_m \sin\{\omega t + \phi[V(t)]\} = \Phi_0 + \Phi_m \sin[\omega t + (k_\phi \sin \omega_m t + \phi_c)]$

动画 [电压频率变换](#)

动画 [调频光产生](#)

## 第8章 光学信号的调制

### 8.2 光信号调制的基本原理

#### 8.2.2 脉冲调制

**脉冲调制** 将被测物理量信息加载在光脉冲序列的参量（如振幅、相位、频率和宽度等）上。实际应用中，一般先对光信号进行电调制，如将直流信号用间歇通断的方法调制，获得脉冲载波，再使载波脉冲的幅度、相位、频率和脉宽等参数按调制信号改变，从而得到不同的脉冲调制。

**脉冲调制的优点：**提高探测系统的信噪比和抗干扰能力，抑制背景光的影响，提高系统测量的灵敏度，可以用同一个光学通道实现多路信息的传输。

**脉冲调制的类型：**脉冲幅度调制（Pulse Amplitude Modulation, PAM）

脉冲频率调制（Pulse Frequency Modulation, PFM）

脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM）

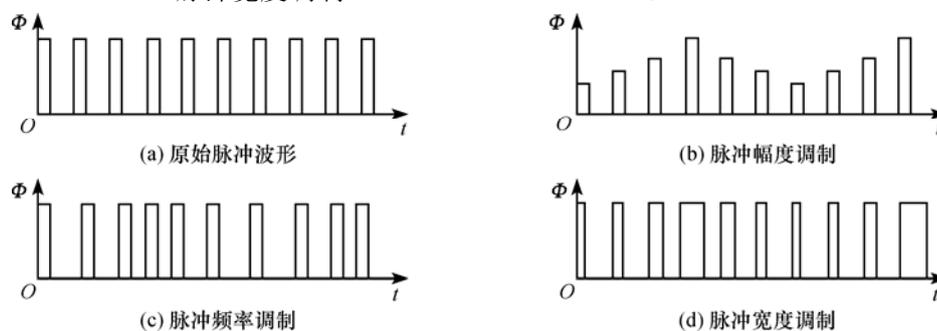


图 8-5 脉冲调制的类型

**脉位调制（PPM）** 通过改变脉冲的位置来将数字序列变换成脉冲序列。

第 8 章 光学信号的调制  
8.2 光信号调制的基本原理  
8.2.3 编码调制

**编码调制** 把模拟信号先变成脉冲序列，再变成代表信号信息的二进制编码，然后对载波进行强度调制。

编码调制的三个过程：

**抽样** 把连续的信号波分割成不连续的脉冲波，用一定的脉冲序列来表示，且脉冲序列的幅度和信号波的幅度相对应。模拟信号通过抽样变成脉冲信号。

**量化** 把抽样后的脉冲调制波进行分级取整处理，用取整后的整数值取代抽样值的大小。连续信号经抽样量化后即变成数字信号。

**编码** 把量化后的数字信号变换成相应的二进制码的过程。

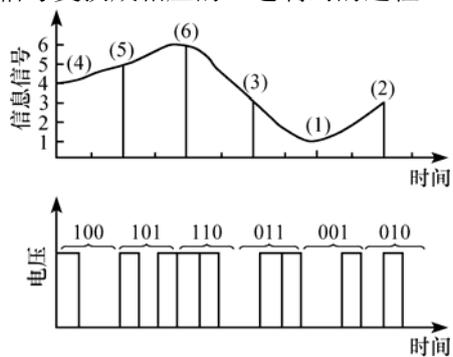


图 8-6 模拟信号的抽样、量化和编码示意图

## 第8章 光学信号的调制

### 8.3 光信号调制的基本方法

#### 8.3.1 光信号强度的调制

##### 1. 辐射源调制

**LD 调制** 给 LD 加上合适的偏置电流就可以实现其直接调制功能。LD 芯片的调制频率能够达到 10GHz 量级。

LD 调制电流： $I(t) = I_b + I_m f_b(t)$

**LD 模拟信号调制：**直接用连续的模拟信号（如语音、电视等信号）对光源进行调制。

**LD 数字信号调制：**采用脉冲编码调制（Pulse Code Modulation, PCM），先将连续的模拟信号通过取样、量化和编码，转换成一组二进制脉冲编码，用矩形脉冲的有和无（1 码和 0 码）来表示信号。

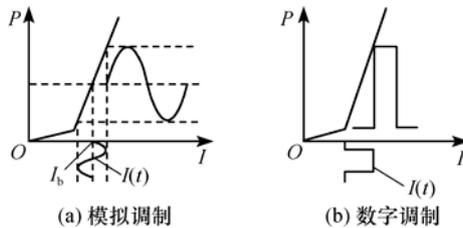


图 8-7 LD 调制

动画 [LD 模拟调制](#)

动画 [LD 数字调制](#)

**LED 调制** 与 LD 相似，给 LED 加上合适的偏置电流即可实现其直接调制功能。

在注入电流较低时，LED 的调制带宽主要受 LED 结电容的限制；而在偏置电流较高时，调制带宽主要由注入有源区的载流子寿命决定。

动画 [LED 模拟调制](#)

动画 [LED 数字调制](#)

LD 与 LED 调制的优点：

- 可以简单地通过改变注入电流来调制光强，无需配备其他结构复杂、功耗较大的调制器；
- 体积小、重量轻、结构牢固、不怕震动。

LD 与 LED 调制的应用领域：中短距离光电测距、光通信。

##### 2. 机电调制

**调制盘** 一种光强度调制器，它可以通过光刻的方法在基板上刻出许多透光和不透光的栅格，也可在金属基体上通过机械加工来获得各种透光和不透光的图形。

调制盘的分类：调幅式、调频式、调相式、脉冲编码式。

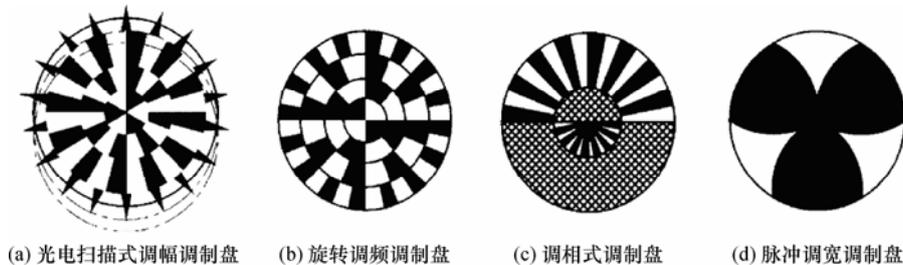


图 8-9 几种调制盘示意图

**调制盘调制** 将调制盘置于光学系统的焦平面上，位于光电探测器之前。当目标像与调制盘之间有相对运动时，调制盘的透光与不透光栅格切割像点，使得通过调制盘的辐射能量变成断续输出，光电探测器接收到的是被调制后的周期性光强度信号。

**调制盘调制的优点：**结构简单、易于实现。

**调制盘调制的缺点：**调制频率不高，一般上限约为 10kHz。

**调制盘调制的应用：**红外被动制导系统、红外跟踪系统、激光波束制导系统等。

**调制盘调制的作用：**

- 抑制光源波动和探测系统内部电子噪声的影响；
- 对信号进行空间滤波，抑制目标的背景噪声；
- 提供目标的空间方位信息。

**光栅莫尔条纹** 将两块光栅叠加在一起，并使它们的栅线有一小的交角。当光栅对之间有一相对运动时，就会形成一组垂直于光栅运动方向的明暗相间的条纹运动，这种移动的条纹称为光栅莫尔条纹。

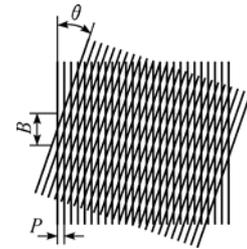


图 8-13 莫尔条纹图案

**光栅莫尔条纹调制** 当两光栅沿着垂直于栅线的方向相对移动时，莫尔条纹将沿着平行于栅线的方向移动。如果在光栅后某一点观察，可看到随着光栅的移动，该点的亮度作明暗交替变化，即通过莫尔条纹把光栅位移信息转换成光强信号。若光栅位移  $x$  等于光栅栅距  $P$  时，则光强变化一个周期。用光电探测器检测莫尔条纹的辐射通量变化，就可计算出位移值。若测得辐射通量变化  $N$  个周期，则被测位移  $x = NP$ 。

**光栅莫尔条纹调制的分类：**长光栅莫尔条纹调制、圆光栅莫尔条纹调制。

### 3. 光电子调制

**电光效应** 某些晶体在电场的作用下具有的双折射效应。电光效应分为泡克尔斯效应和克尔效应两种。利用电光效应可以对激光的振幅（或光强）和相位进行调制。

**电光振幅调制** 利用电光效应，使入射光在电光晶体两主轴方向的分量产生相位延迟，经线偏振器后输出光的振幅（或光强）与外加电场强度有关，即将输入电压信号转换为光强信号输出，实现对光振幅（或强度）的调制。

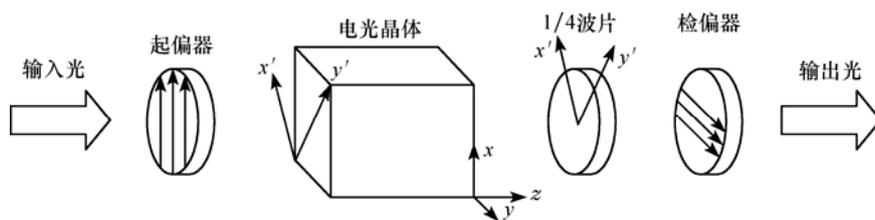


图 8-15 电光振幅调制器示意图

电光晶体在电场的作用下，两主轴方向相对相位延迟  $\delta'$  与电场  $E$ 、晶体长度  $L$  成正比。

$$\delta' = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{63} E L = \frac{\pi U}{U_\pi} \quad (8-21)$$

图 8-15 中出射光强与入射光强之比为：

$$\frac{I(\text{out})}{I(\text{in})} = \sin^2\left(\frac{\delta'}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \quad (8-27)$$

**电光调制的优点：**调制带宽大（10GHz 量级），可以作成几乎没有惯性的高速电光开关。

**电光调制的缺点：**光能利用率低，驱动功率大。

**电光调制的应用：**激光测距仪。

**声光效应** 当超声波在声光介质中传播时,介质的密度和折射率随超声信号变化而变化,从而使入射到声光介质中光的参数发生变化的现象。声光效应分为拉曼-奈斯衍射和布拉格衍射两种。利用声光效应可以实现对激光强度、频率、相位和方向的调制。

**布拉格声光调制** 利用布拉格衍射效应,当入射光与声波面间的夹角满足一定条件时,合理选择参数,并使超声场足够强,可以使入射光的能量全部转移到+1级(或-1级)衍射极值上,因而光束能量可以得到充分利用。

光波通过声光介质时产生的附加相移与超声波的功率 $P_s$ 的平方成正比。

$$\delta = KP_s^2 \quad (8-36)$$

一级衍射光强与入射光强之比为:

$$\frac{I_1}{I_i} = \sin^2\left(\frac{K\sqrt{P_s}}{2}\right) \quad (8-37)$$

**声光调制的优点:** 光能利用率高,驱动功率小。

**声光调制的缺点:** 调制带宽小。

**声光调制的应用:** 激光打印机、激光印刷设备。

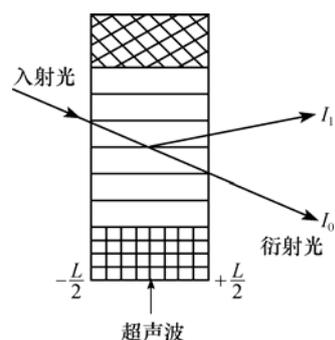


图 8-19 布拉格衍射

**双折射效应** 当一束单色光在各向异性晶体的界面折射时,一般可以产生两束折射光,这种现象称为晶体的双折射。晶体的双折射现象,表示晶体在光学上是各向异性的,即它对不同方向的光振动表现出不同的性质。更具体地说,对于振动方向互相垂直的两个线偏振光,在晶体中有着不同的传播速度(或折射率),因而发生双折射现象。

**泡克耳斯(Pockels)效应** 晶体折射率的变化量与外加电场强度的一次方成比例。

**克尔(Kerr)效应** 晶体折射率的变化量与外加电场强度的二次方成比例。

**拉曼-奈斯(Raman-Nath)衍射** 当光束垂直于声波传输方向、声光作用长度 $L \leq n\lambda s^2/2\pi\lambda$ ( $n$ 为介质折射率, $\lambda$ 为光波波长)时,声光栅和普通平面光栅类似,产生喇曼-奈斯衍射。平行光通过光栅时产生多级衍射,零级光最强,其他级衍射光对称地分布在零级光的两侧,光强依次递减。

**布拉格(Bragg)衍射** 当超声波频率较高、声光作用长度 $L \geq 2n\lambda s^2/\pi\lambda$ 、光束与声波波面间以角度 $\theta_i = 1/2 \arcsin(\lambda/\lambda_s)$ 入射时,发生布拉格衍射。这时,声光介质相当于一个体光栅,只出现零级和一级衍射光。此时入射光的能量全部转移到0级和 $\pm 1$ 级上。

## 第8章 光学信号的调制

### 8.3 光信号调制的基本方法

#### 8.3.2 光信号相位的调制

##### 1. 电光相位调制

**电光相位调制** 利用电光晶体的电光效应，对电光晶体施加电场，改变晶体的折射率，从而使输入光场的相位发生变化。

电光相位调制可以实现对单束相干光波相位的调制。

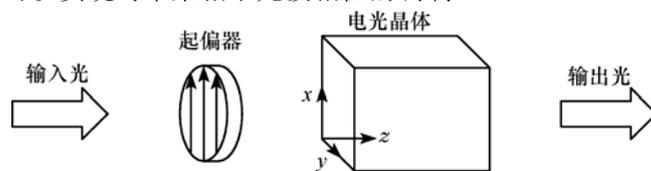


图 8-22 电光相位调制器示意图

##### 2. 光学干涉仪

**干涉仪相位调制** 利用光束的相干性，通过改变发生干涉的两路（或多路）光束中某一路光束的光程而改变其相位，产生相位差，并形成带有被测物体信息的干涉条纹。

光学干涉仪可以实现两束或两束以上相干光波相位差的调制。

通常作为相位调制用的光学干涉仪有迈克尔孙（Michelson）干涉仪、吉曼（Gell-Mann）干涉仪、马赫-泽德（Mach-Zehnder）干涉仪、萨格纳克（Sagnac）干涉仪和法布里-珀罗（Fabry-Perot）干涉仪等。

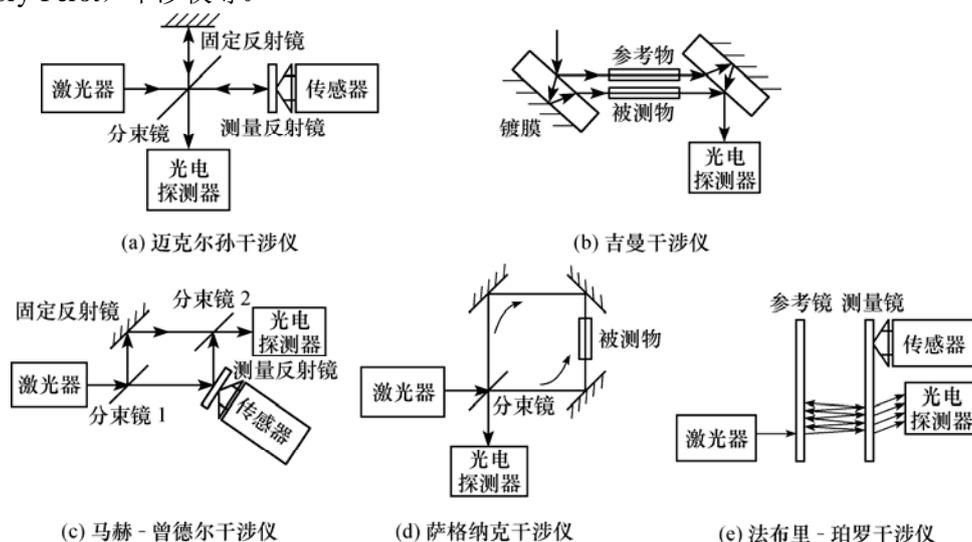


图 8-23 典型光学干涉仪原理示意图

## 第8章 光学信号的调制

### 8.3 光信号调制的基本方法

#### 8.3.3 光信号频率的调制

##### 1. 运动参数调频

**光学多普勒效应** 运动物体能改变入射在其上的光波的频率的现象。

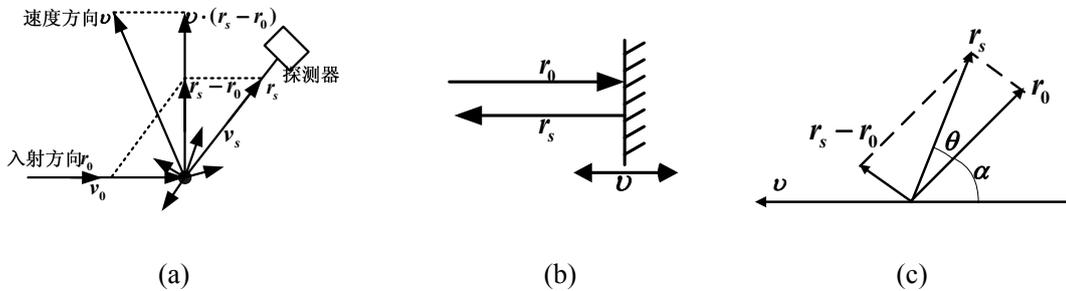


图 8-24 光学多普勒效应示意图

多普勒频移的大小等于散射物体的运动速度在多普勒强度方向上的分量和入射光波长的比值。

$$\Delta\nu = \nu_s - \nu_0 = [\mathbf{v} \cdot (\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_0)] / \lambda \quad (8-43)$$

多普勒测速公式:

$$\Delta\nu = \frac{2v}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \sin \left( \alpha + \frac{\theta}{2} \right) \quad (8-45)$$

**萨格纳克效应** 闭合光路的正反向光路光程差随着转速改变的现象。

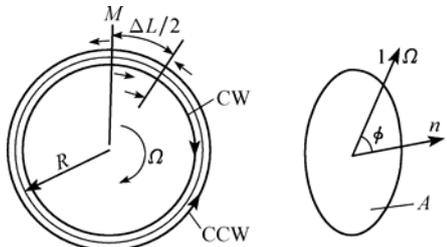


图 8-25 萨格纳克效应的转动光程差示意图

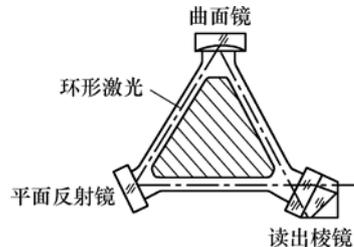


图 8-26 环形激光器示意图

萨格纳克干涉仪中, 封闭的光路相对于惯性空间有一转动角速度  $\Omega$  时, 顺时针光路和逆时针光路之间将形成与转速成正比的光程差  $\Delta L$ , 其数值满足关系:

$$\Delta L = \frac{4A}{c} \Omega \cos \phi \quad (8-48)$$

**环形激光器** 三个或三个以上反射镜组成的激光谐振腔使光路转折形成闭合环路, 这种激光器称作环形激光器。

环形激光器测角公式:

$$N = \int_0^t \Delta\nu dt = \frac{4A}{\lambda L} \theta \quad (8-53)$$

##### 2. 固定频移

**塞曼效应激光频移** 如图 8-27(a)所示, 利用永久磁铁或螺线管在 He-Ne 激光器中形成轴向磁场, 它使单模激光分裂成左右圆偏振的两个分量。二偏振光存在频差, 数值取决于外加磁场的强度和谐振腔的品质因数。

**旋转波片激光频移** 如图 8-27(b)所示, 线偏振激光通过  $\lambda/4$  波片 1 后输出圆偏振光。再通过以角频率  $\Omega$  旋转的半波片和固定的  $\lambda/4$  波片 2, 所输出的偏振光可得到  $2\Omega$  的角频移。

**声光效应激光频移** 如图 8-27 (c)所示, 在声光器件中以频率为  $f$  的超声波交变信号激励换能器, 在透明介质内形成折射率的周期变化。当激光平行入射到介质内将产生 0 级和 $\pm 1$ 级衍射光。一级衍射光与零级衍射光频率相差 $\pm f$ , 可分别作为参考光和信号光。

**旋转光栅激光频移** 如图 8-27 (d)所示, 激光由透镜聚焦在光栅盘的刻线上, 透射光被分作 0 级和 $\pm 1$ 级衍射光。光栅盘由电动机带动旋转, 若光栅上光点处的线速度为  $v$ , 光栅刻线间距为  $d$ , 则 $\pm 1$ 级衍射光将发生  $f = \pm v/d$  的频移。

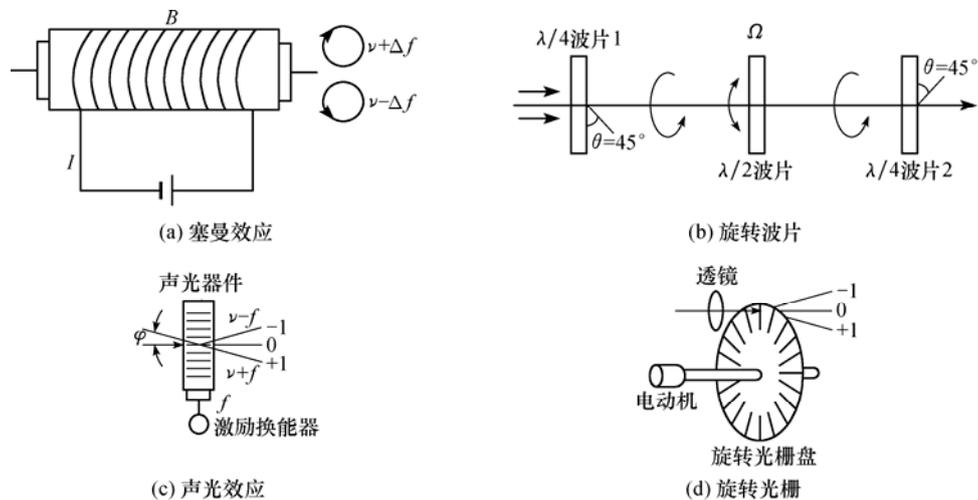


图 8-27 固定频移的产生方法

几种方法的频移对比:

- 塞曼效应: 2~3MHz
- 旋转波片: 2~3kHz, 变换效率 90%
- 声光效应: ~100MHz, 变换效率 20%
- 旋转光栅: ~20MHz, 变换效率 20%

## 第8章 光学信号的调制

### 8.3 光信号调制的基本方法

#### 8.3.4 光信号偏振的调制

**旋光现象** 当偏振光通过某些透明物质时，光的振动面将以光的传播方向为轴线旋转一定的角度的现象。

**旋光物质** 能使振动面旋转的物质，如石英晶体、食糖溶液等。

**法拉第磁光效应** 物质在磁场作用下产生的旋光效应。

把磁光介质放到磁场中，光线通过介质时，入射的平面偏振光的振动方向就会发生旋转，旋转角度的大小与磁光介质的性质、光程和磁场强度等因素有关：

$$\theta = KIH \cos \alpha \quad (8-54)$$

**法拉第磁光效应的重要特性：**对于给定的磁光介质，振动面的旋转方向只决定于磁场方向，与光线的传播方向无关，即无论光的传播方向  $\mathbf{k}$  与磁场方向  $\mathbf{H}$  平行或是反平行，线偏振光的旋转方向相同。

**光隔离器** 如 8-28 所示，在光源与反射镜之间放置一个线起偏器和一个法拉第盒，经过偏振器后的线偏振光通过法拉第盒旋转  $45^\circ$  角，被光路右端的反射镜反射后，按原路返回到法拉第盒，再旋转  $45^\circ$  角，这样偏振光共旋转了  $90^\circ$ ，被线偏振器所阻断。

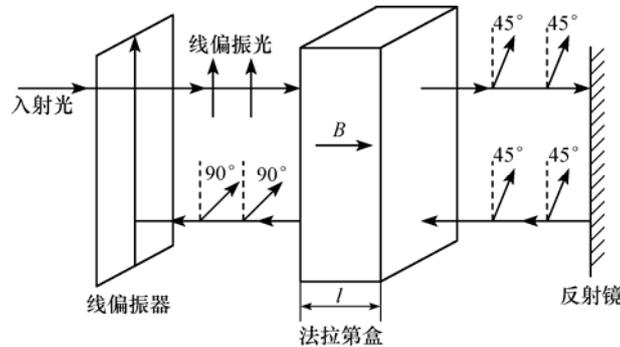


图 8-28 光隔离器

#### 动画光隔离器

**磁光调制** 如图 8-29 所示， $N_1$ 和 $N_2$ 分别为起偏器和检偏器，它们的偏振方向成  $45^\circ$ ，YIG 棒是铁磁晶体，预加恒定磁场使其达到饱和状态。线圈电流产生的磁场方向在 YIG 棒的轴向，法拉第旋转决定于轴向电流磁场。控制高频线圈电流，从而改变轴向信号磁场强度，就可控制光振动面的旋转，使通过  $N_2$  的光振幅随电流的变化而变化，从而实现光强调制。

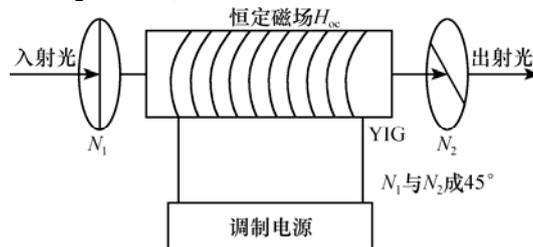


图 8-29 线性磁光调制装置

## 第 8 章 光学信号的调制

### 8.4 调制信号的解调

#### 8.4.1 直线律检波与调幅信号的解调

二极管半波检波调幅信号解调电路由检波二极管 VD 和低通滤波器 RC 组成。

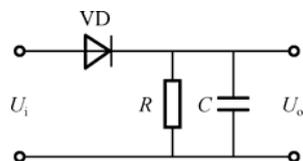


图 8-30 调幅信号二极管检波电路

二极管单向导通特性:

$$U_D = \begin{cases} K_D U_i & U_i > 0 \\ 0 & U_i \leq 0 \end{cases} \quad (8-55)$$

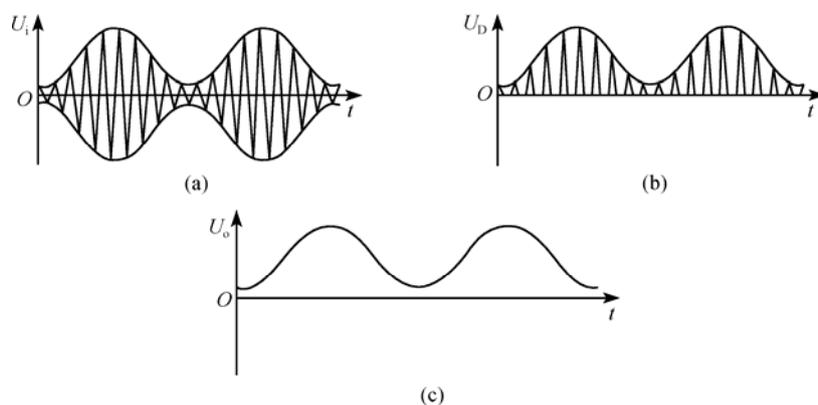


图 8-31 解调波信号

设输入调幅信号为:

$$U_i = (1 + m \sin \Omega t) \sin \omega t \quad (8-56)$$

则输出解调信号为:

$$U_o = \frac{2K_D}{\pi} (1 + m \sin \Omega t) \quad (8-58)$$

## 第8章 光学信号的调制

### 8.4 调制信号的解调

#### 8.4.2 相敏检波与调相信号的解调

##### 1. 概述

**相敏检波的目的：**判别相位调制信号中信号的方向或相位，检波器的输出电压能反应出调制相位的变化。

**相敏检波的方法：**乘法器检波电路、开关式相敏检波电路、相加式检波电路、脉冲钳位式相敏检波电路等。

**相敏检波的特性：**输出信号的极性与载波信号和参考信号之间的相位差有关，当载波与参考同相时，输出信号为正；反之为负。

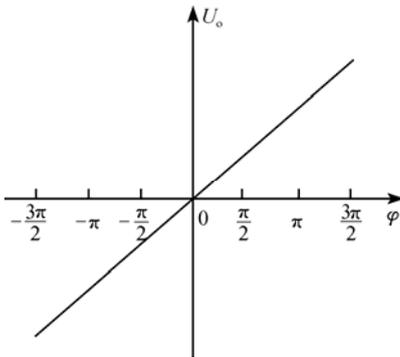


图 8-32 相敏检波工作特性

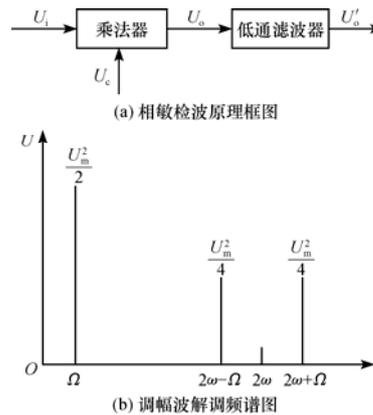


图 8-33 乘积相敏检波框图及频谱图

##### 2. 乘积相敏检波

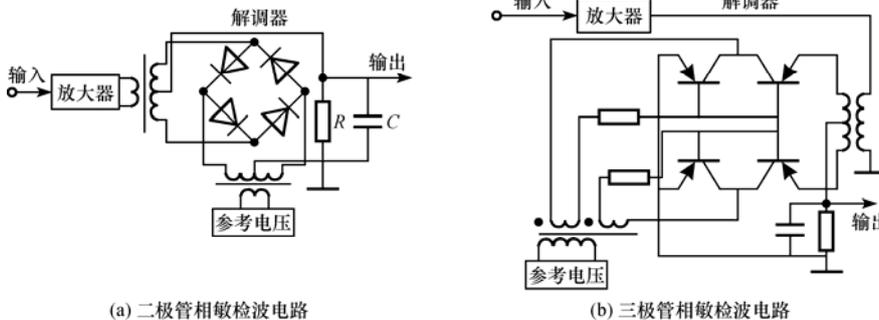
输入载波信号： $U_i = U_m \cos \Omega t \cos \omega t$

输入参考信号： $U_c = U_{cm} \cos(\omega t + \varphi)$

输出滤波信号： $U'_o = \frac{U_m^2}{2} \cos \Omega t \cos \varphi$

##### 3. 典型的相敏检波电路

常用的相敏检波电路有二极管环形鉴相电路和三极管相敏检波电路。已调制的载波信号通过放大器由输入变压器输入，参考电压由中心抽头变压器引入。在参考电压的正、负半周期内分别控制两对二极管或三极管的通断，使输入信号在负载电阻上进行全波整流输出。输出电流的流向取决于参考电压和信号电压的相位关系，以达到相敏检波的目的。



(a) 二极管相敏检波电路

(b) 三极管相敏检波电路

图 8-34 相敏检波电路实例

## 第9章 直接探测和相干探测

### 9.0 本章知识要点

#### 1.直接探测的基本原理、及主要性能指标:

信噪比、噪声等效功率、视场、作用距离

#### 2.直接探测的几种应用举例:

- 强度调制—直接探测光纤通信系统
- 用相位和时间法测量空间距离
- 像分析器定位法

#### 3.相干探测的基本原理、基本特性及探测条件:

空间条件、频率条件

#### 4.相干探测的几种应用举例:

- 激光干涉测量
- 激光多普勒测速
- CO<sub>2</sub>激光外差通信

#### 5.直接探测与相干探测的比较:

	直接探测	相干探测
系统结构	结构简单	结构复杂
应用范围	全波段	光学(近、中红外)波段
噪声等效功率	$NEP_d = 2h\nu\Delta f / \eta$ 实际应用中很难达到	$NEP_h = h\nu\Delta f / \eta$ 实际应用中容易达到
所使用的光源	非相干光源或相干光源	只能用相干光源
所调制的光波参量	光强	振幅、频率、相位
电子放大器的噪声	必须考虑	可以忽略
信息容量	较小	较大
探测极限	较高 紫外光和可见光波段能实现量子限探测,红外波段尚无法实现。	很低(测量精度优于直接探测 $10^7 \sim 10^8$ 倍数量级) 所有波段均能实现量子限探测。

#### 6.两种改进的探测方法:

- 平衡探测法——提高探测器可接受光能。
- 光前置放大探测——提高探测器探测灵敏度。

## 第9章 直接探测和相干探测

### 9.1 直接探测

#### 9.1.1 直接探测的基本原理

**直接探测** 将信号光直接入射到光电探测器的光敏面上，光电探测器只响应入射光辐射的强度（或辐射通量）。无论光载波是相干光还是非相干光，其系统只能解调出由光强度调制所形成的信息，不涉及光辐射的相干性质，因而又称为非相干探测。

#### 1. 直接探测的基本物理过程

光电探测器将信号光的光强变化转化为电压或电流的变化，再经后续电路处理（如滤波、放大或其他各种电学信号变换等），从而获得有用的信号。

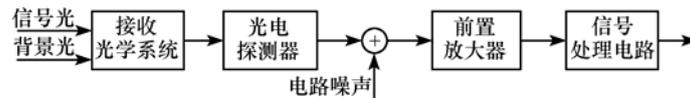


图 9-1 直接探测系统的结构示意图

输入信号光： $E_s(t) = a_s \sin(2\pi\nu_s t + \varphi_s)$

探测器输出光电流： $I_{ds} = S\Phi_s = \frac{1}{2}Sa_s^2$

#### 2. 直接探测系统的信噪比

**信噪比 (SNR)** 输出信号在负载电阻 $R_L$ 上产生的电信号功率与电噪声功率之比。

$$\text{SNR} = \frac{P_{sd}}{P_{nd}} = \frac{I_{ds}^2 R_L}{i_n^2 R_L} = \frac{I_{ds}^2}{i_n^2} \quad (9-6)$$

用分贝表示：

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \lg \frac{I_{ds}^2}{i_n^2} = 20 \lg \frac{I_{ds}}{(i_n^2)^{1/2}} \quad (9-7)$$

**量子极限 (SNR<sub>d</sub>)** 理想情况下，直接探测系统中只受信号光引起的散粒噪声限制，其所能达到的最大信噪比极限。

$$\text{SNR}_d = \frac{\eta\Phi_s}{2h\nu\Delta f} \quad (9-10)$$

**噪声等效功率 (NEP<sub>d</sub>)** 在量子极限情况下，直接探测系统能检测的最小光功率。

$$\text{NEP}_d = \frac{2h\nu\Delta f}{\eta} \quad (9-11)$$

#### 提高系统信噪比的几种途径：

- 光学方法——使系统接收到更多的光信号能量。
- 电学方法——合理设置探测器的各项参数，降低探测器自身的各种噪声。
- 热力学方法——采取制冷措施降低探测器噪声。

## 第9章 直接探测和相干探测

### 9.1 直接探测

#### 9.1.2 直接探测系统的视场和作用距离

##### 1. 直接探测系统的视场

**视场** 表示系统能探测到的空间范围，是直接探测系统的指标之一。

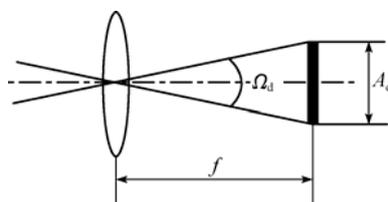


图 9-2 光电探测器的视场角

视场角：

$$\Omega_d = A_d / f^2 \quad (9-12)$$

##### 2. 直接探测系统的作用距离

**作用距离** 探测器接收到最小可用能量所对应的距离，通常希望作用距离越大越好。

被动探测系统的距离方程：

$$R = \left[ \frac{A_r I \tau_0 \tau_1 D^* \cdot \frac{I_n}{I_s}}{(A_d \Delta f)^{1/2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9-19)$$

主动探测系统的距离方程：

$$R = \left[ \frac{\Phi_s \tau_s \tau_r r_i K_s A_t D_0^2 D^* \cdot \frac{I_n}{I_s} \cdot e^{-2\alpha(\lambda)R}}{4\Omega_s (A_d \Delta f)^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (9-26)$$

## 第9章 直接探测和相干探测

### 9.1 直接探测

#### 9.1.3 直接探测的应用举例

##### 1. 强度调制—直接探测光纤通信系统

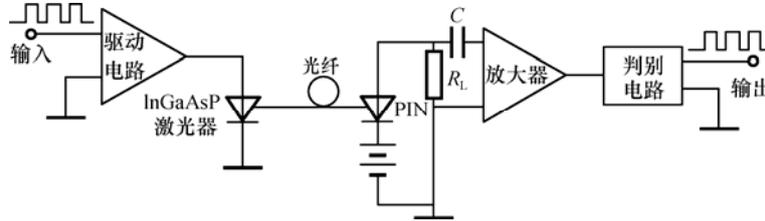


图 9-5 光纤通信系统简图

光纤数字通信系统中，误码率  $P_e$  与光电探测器输出端的信噪比有关。对于如图 9-5 所示系统，放大器输出端的电流信噪比为：

$$\frac{i_s}{(i_N^2)^{1/2}} = \frac{e\eta\Phi_s/h\nu}{\left[\frac{4kT\Delta f}{R_L} + (F-1)\frac{4kT\Delta f}{R_L}\right]^{1/2}} \quad (9-31)$$

要满足  $P_e < 10^{-9}$ ，则输入到光探测器的最小光功率为  $\Phi_s \approx 5.3 \times 10^{-6} \text{ W}$ 。

##### 2. 用相位和时间法测量空间距离

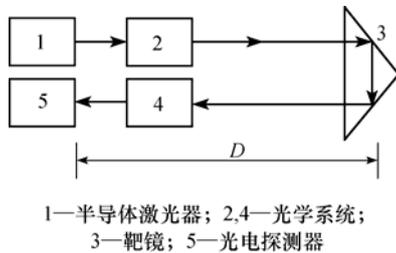


图 9-7 相位法光波测距原理图

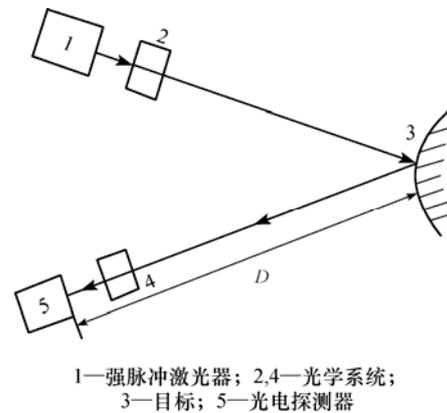


图 9-8 时间法光波测距原理图

**相位测量法** 如果光载波的光通量被调制成随时间呈周期性变化，而被测信息加载于光通量的相位之中，检测到这个相位值即能确定被测值。

典型的光通量相位测量实例是光电光波测距，对于如图 9-7 所示的测距系统，待测距离为：

$$D = \frac{\nu\varphi}{2\omega_0} = \frac{c\varphi}{4\pi\nu f_0} \quad (9-35)$$

**时间测量法** 若光源发出的光通量是脉冲式辐射，则可用测量单个脉冲的时间延迟来测距离。

脉冲式激光测距仪和激光雷达都是时间法测距的典型应用，对于如图 9-8 所示的测距系统，待测距离为：

$$D = \frac{1}{2}ct = \frac{1}{2f}cN = KN \quad (9-38)$$

### 3. 像分析器定位法

**像分析** 通过分析被测物体在像面上的几何中心相对于像面上某个选定基准的偏移情况，从而确定该物体在空间位置的方法称为像分析，能实现这种作用的装置叫做像分析器。

**像分析器的基本工作原理：**将被测物体的像相对于像面基准的几何位置信息，变换为通过该基准某一取样窗口的光通量，通过检测该光通量的变化来确定物体的坐标位置信息。因此，像分析器是一种能将几何形位信息加载到光通量上的调制器，是几何量转换为光学量的G/O变换器。

**单通道像分析器工作原理：**将线纹与狭缝窗口的空间相对位置变换为透过狭缝窗口的光通量，依此来判断线纹的定位位置。当线纹中心位于光轴上时，线纹像刚好与狭缝对准，线纹像的透过率  $\tau=0$ ，则透过狭缝的光通量为 0。而在线纹未对准光轴时，其线纹像中心也偏离狭缝，光通量不为 0。

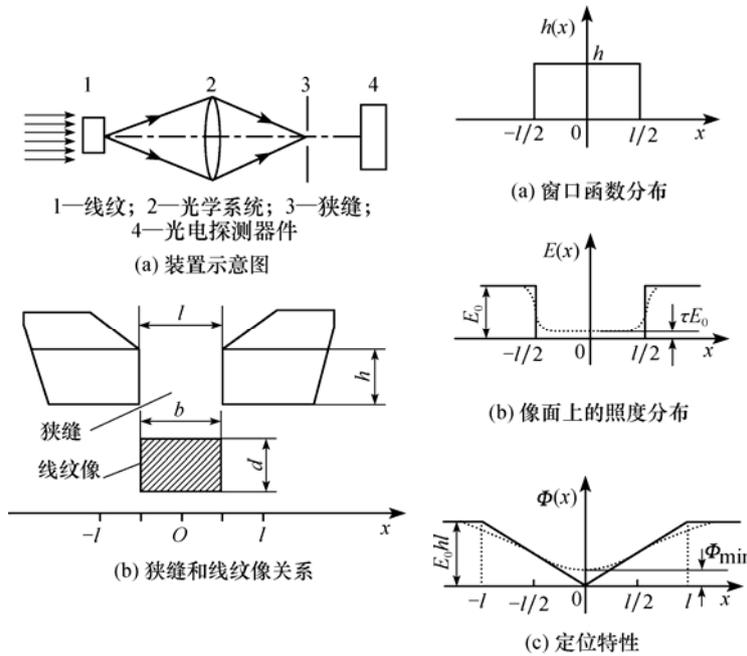


图 9-10 单通道像分析器原理图

**双通道差动式像分析器工作原理：**利用分束器将线纹分别成像于两个狭缝窗口上，实现差分检测，以克服单通道式像分析器零位误差的影响，提高其分辨能力。

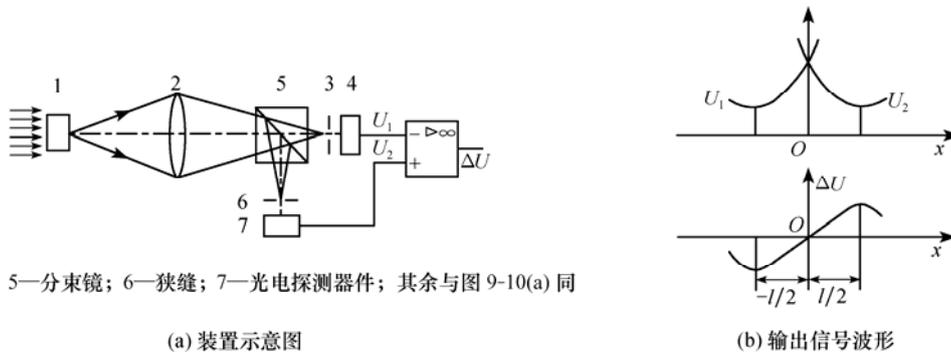
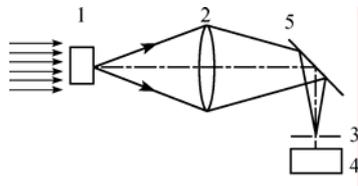


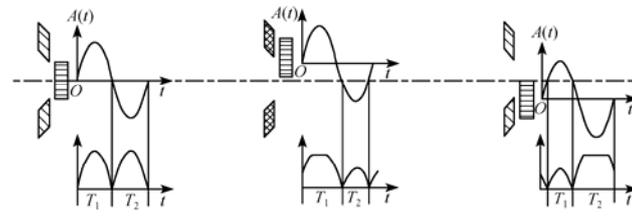
图 9-12 一种双通道差动像分析器原理示意图

**扫描调制式像分析器工作原理：**利用振动光学部件对线纹像在狭缝窗口上作周期性扫描，将原本为直流的光通量的信号变为交流信号，以减小光源光强波动的影响，提高定位精度。



5—反射镜；其余与图 9-10(a) 同

图 9-13 扫描调制式像分析器原理示意图



(a) 线纹像对准狭缝中心 (b) 线纹像中心偏在狭缝上半部

图 9-14 扫描调制式像分析器输出信号的波形图

## 第9章 直接探测和相干探测

### 9.2 相干探测

#### 9.2.1 相干探测的基本原理

**相干探测** 将信号光和参考光同时入射到光电探测器的光敏面上，形成光的干涉图样，光电探测器响应两光束的干涉光场，其输出信号不仅与入射光波的强度（或振幅）有关，还与频率和相位等其他波动参数有关。这种探测方式与无线电外差接收极为相似，故又称为外差探测。

##### 1. 相干探测的基本物理过程

信号光和参考光在满足波前匹配条件下在光电探测器上进行光学混频。探测器输出的是两光波光频之差的**拍频信号**，该信号包含有调制信号的振幅、频率和相位等特征。通过检测拍频信号可以解调出被传送的信息。

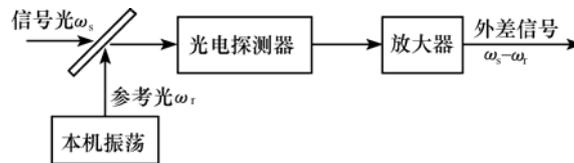


图 9-15 相干探测原理示意图

输入信号光： $E_s(t) = a_s \sin(\omega_s t + \varphi_s)$

输入参考光： $E_r(t) = a_r \sin(\omega_r t + \varphi_r)$

探测器输出光电流： $I_{hs} = S a_s a_r \cos(2\pi\Delta\nu t + \Delta\varphi)$

##### 2. 相干探测的基本特性

- 探测能力强——相干探测不仅能够检测出振幅和强度调制的光波信号，而且可以检测出相位和频率调制的光波信号。
- 转换增益高——相干探测与直接探测的信号功率比可高达  $10^7 \sim 10^8$  数量级。
- 信噪比高——在滤波带宽相同的情况下，相干探测的噪声等效功率为直接探测的一半。相干探测可以检测到更小的入射功率，有利于弱光信号的检测。
- 滤波性好——相干探测能够滤除背景光，有较强的空间滤波能力。
- 稳定性和可靠性高——相干信号通常是交变的射频或中频信号，并且多采用频率或相位调制，即使被测参量为零，载波信号仍保持稳定的幅度。对于这种交流测量系统，系统的直流分量漂移和光信号幅度涨落不会直接影响其检测性能，系统能稳定可靠地工作。

## 第9章 直接探测和相干探测

### 9.2 相干探测

#### 9.2.2 相干探测的条件

##### 1. 相干探测空间条件

相干探测中，信号光束和参考光束的波前必须重合，也就是说，必须保持信号光和参考光在空间上的角准直。若存在失配角，则信号光和参考光在入射到探测器表面时会因为同一波前到达的时间不同而产生相位差，导致混频信号的相互抵消从而减小输出光电流的减小。失配角越大，混频器输出光电流越小。实际应用中，波长越长，光电探测器尺寸越小，所容许的失配角越大。波长越短，空间准直要求越苛刻，这是目前相干探测主要用于红外波段的一个原因。也正是由于这一严格的空间准直要求，使得外差探测具有很好的空间滤波性能。

##### 2. 相干探测频率条件

相干探测中，要求信号光和参考光具有高度的单色性和频率稳定度。由于相干探测是两束光波叠加后产生干涉的结构，单色性越差，相干探测的信噪比越低，所以一般选用单纵模运转的激光器作为相干探测的光源。而如果信号光和参考光的频率不稳定，相对漂移很大，两者的频率差就可能超出中频滤波器的带宽，导致光混频之后的前置放大和中频放大电路对中频信号不能正常地放大，所以通常情况下两束光取自同一激光器，通过频率偏移取得参考光，而信号光用调制的方法得到。

##### 3. 相干探测偏振条件

相干探测中，要求信号光与参考光的偏振方向一致，或者有偏振方向相同的分量，这样两束光才能按光束叠加规律进行合成。一般情况下都是通过光电探测器的前面放置检偏器来实现的。分别让两束信号中偏振方向与检偏器透光方向相同的信号通过，以此来获得两束偏振方向相同的光信号。

## 第9章 直接探测和相干探测

### 9.2 相干探测

#### 9.2.3 相干探测的应用举例

##### 1. 激光干涉测量

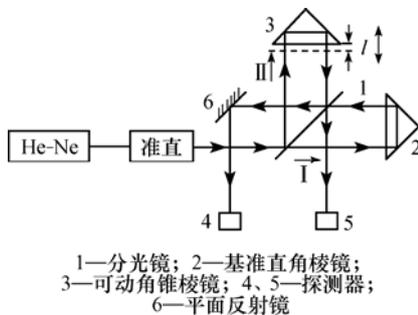


图 9-18 单频激光干涉仪的原理示意图

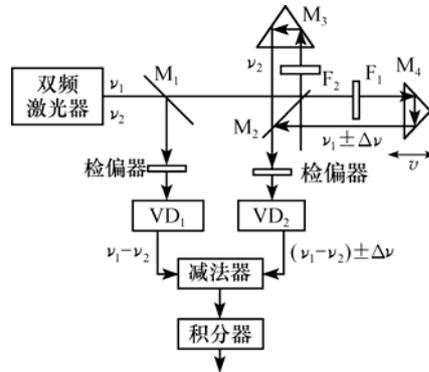


图 9-19 双频激光干涉仪原理示意图

**单频激光测长工作原理：**单频激光干涉测长常采用迈克尔孙干涉仪，如图 9-18 所示。正/反向移动角锥棱镜时，探测器 4 输出的信号电流分别超前/落后探测器 5 的相位为  $\pi/2$ 。将探测器 4 和 5 的输出信号放大整形后，送入方向判别电路，即可判别角锥棱镜 3 的移动方向。

单频激光测长公式：

$$I_{hs4} = Sa_0^2 \cos \left[ 2\pi n(N + m) + \frac{\pi}{2} \right] \quad (9-67)$$

$$I_{hs5} = Sa_0^2 \cos [2\pi n(N + m)] \quad (9-68)$$

**双频激光测长工作原理：**图 9-19 所示双频激光测长中，双频激光装置利用塞曼效应实现激光频移。光电探测器  $VD_1$  上混频得到的差频信号作为参考信号，角反射镜  $M_4$  的运动引起的多普勒频移在光电探测器  $VD_2$  上对双频激光的光学差频信号进行了频率调制。将  $VD_1$  和  $VD_2$  中检测到的两路外差信号经过电信号混频或作频率计数相减运算，即可得到表征物体运动速度的光学差频信号。

双频激光测长公式：

$$L = \frac{\lambda}{2} N \quad (9-71)$$

**波前相位调制** 当将相干光扩束成平面波或其它规则波面照射到被测物体时，干涉仪的相干场上会形成由干涉条纹组成的二维干涉图。这是对二维单频光波前的各点形成相位调制的结果，称为波前相位调制。

**二次相位调制** 将参考光的相位人为地调制成随时间变化，使干涉图上各点处的光学相位变换为相应点处时序电信号的相位，以进行动态相位检测。

**条纹扫描干涉法基本原理：**在图 9-20 所示的泰曼—格林干涉仪中，若使用压电陶瓷等驱动参考反射镜周期性地随时间成比例地移动  $\lambda/2$ ，干涉条纹的各点上将形成同样周期的正

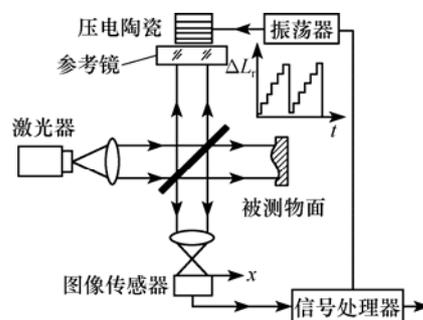


图 9-20 阶梯波条纹扫描干涉法二次相位调制原理图

弦型强度变化。在不同位置上时序信号的初始相位与该点被测波面的初始相位对应。用光电方法比较各点电信号的相位就可以计算出被测表面的形状分布。

## 2. 激光多普勒测速

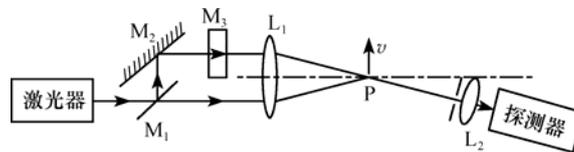


图 9-21 参考光束式多普勒测速原理图

散射光:  $E_s(t) = a_s \sin(2\pi\nu t + \varphi_s)$

参考光:  $E_r(t) = a_r \sin(2\pi\nu_r t + \varphi_r)$

探测器输出交流信号:  $E_r(t) = a_r \sin(2\pi\nu_r t + \varphi_r)$

## 3. CO<sub>2</sub>激光外差通信

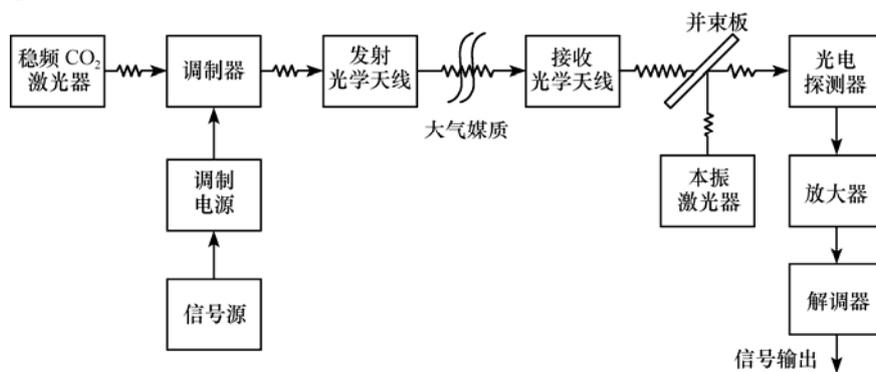


图 9-22 CO<sub>2</sub>激光外差通信系统的原理示意图

CO<sub>2</sub>激光外差通信系统与光纤通信系统的区别:

	CO <sub>2</sub> 激光外差通信系统	光纤通信系统
光源	CO <sub>2</sub> 气体激光器	半导体激光器
调制方法	频率调制、相位调制	光强调制
探测方法	相干探测法	直接探测法

## 第9章 直接探测和相干探测

### 9.3 探测方法的改进

#### 9.3.1 平衡探测

**平衡探测法** 在相干探测时，在将信号光和参考光进行混频的分光镜的两侧对称地放置两个光电探测器，一个探测器接收信号光的部分透射光和参考光的部分反射光，另一探测器接收信号光的部分反射光和参考光的部分透射光，从而可以充分利用这两束光的能量。

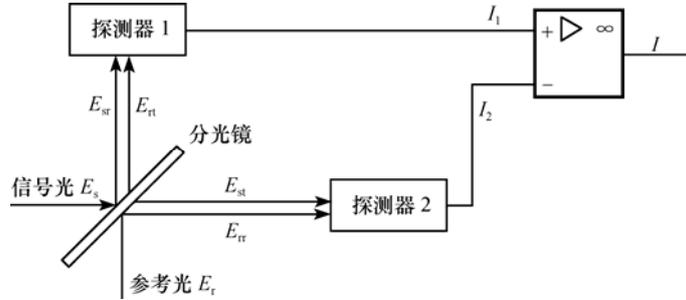


图 9-23 平衡探测原理图

$$\text{探测器 1 输出光电流: } I_1 = \frac{S}{2} [ra_s^2 + (1-r)a_r^2 + 2a_s a_r \sqrt{r(1-r)} \cos(\varphi_s - \varphi_r - \frac{\pi}{2})]$$

$$\text{探测器 2 输出光电流: } I_2 = \frac{S}{2} [(1-r)a_s^2 + ra_r^2 + 2a_s a_r \sqrt{r(1-r)} \cos(\varphi_s - \varphi_r + \frac{\pi}{2})]$$

$$\text{取分光比 } 1:1, \text{ 输出信号: } I = I_1 - I_2 = Sa_s a_r \sin(\varphi_s - \varphi_r)$$

#### 9.3.2 光前置放大探测

**光前置放大探测** 在信号光达到探测器之前，经过光放大器对光信号进行放大。它可以极大地提高直接探测系统的灵敏度。

**光放大器** 光放大器在结构上是一个没有反馈或反馈较小的激光器，信号光通过一个外部的（电或光）源泵浦增益介质后其能量得到增强。若光放大器的增益为  $G$ ，则经过光放大器后输入到探测器的辐射通量比输入到介质的提高了  $G$  倍。

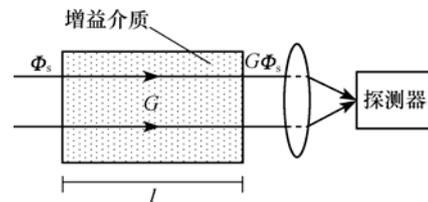


图 9-24 光前置放大探测原理图

**放大自发辐射 (ASE)** 实际应用中，即使是入射到放大器上的辐射通量  $\Phi_s=0$ ，光放大器也会输出自发辐射。它是光前置放大探测系统中的主要噪声源。

探测器输出信噪比：

$$\text{SNR}_d = \frac{G\Phi_s}{4h\nu\Delta f} \quad (9-93)$$

只要满足  $G>4$ ，采用光前置放大的直接探测系统具有与相干探测系统相当的灵敏度。

## 第 10 章 光电检测电路与信号处理

### 10.0 本章知识要点

#### 1. 光电检测电路的基本结构:

光电探测器、偏置电路、前置放大器

#### 2. 光电检测电路的基本技术要求:

- 最大的输出动态范围
- 快速的动态响应能力
- 最佳的信号检测能力
- 长期工作的稳定性和可靠性

#### 3. 光电检测电路的几个重要参数:

带宽、频率特性、噪声特性

#### 4. 光电检测电路的噪声源:

探测器自身噪声、偏置电路噪声、前置放大器附加噪声

#### 5. 光电检测电路的噪声估算方法:

- 确定探测器件和前置放大器的噪声源，画出检测电路的噪声等效电路；
- 计算等效电路的噪声等效带宽；
- 根据噪声等效电路计算噪声输出电流(电压)、信噪比和要求的最小输出光功率。

#### 6. 微弱光电信号相关检测的理论及方法:

自相关检测、互相光检测

#### 7. 微弱光电信号检测设备的工作原理及工作特性:

	理论基础	适用信号形式	输出信号形式
锁定放大器	互相关	周期性信号	信号幅度
取样积分器	自相关	周期性信号	幅度、波形
光子计数器	探测量子限	离散脉冲	信号幅度

## 第 10 章 光电检测电路与信号处理

### 10.1 光电检测电路的带宽和频率特性

#### 10.1.1 光电检测电路的基本结构及技术要求

光电检测电路的基本结构：光电探测器、偏置电路、前置放大器

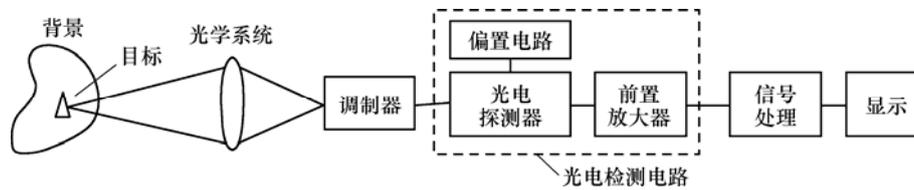


图 10-1 光电检测电路基本结构

光电检测电路的基本技术要求：

- 较强的光电转换能力——使给定的输入光信号在允许的非线性失真条件下有最佳的信号传输系数，得到最大的功率、电压或电流输出，即输出信号有最大的动态范围。
- 快速的动态响应能力——满足信号通道所要求的频率选择性或对瞬变信号的快速响应。
- 最佳的信号检测能力——具有可靠检测所必需的信噪比或最小可检测信号功率。
- 长期工作的稳定性和可靠性。

## 第 10 章 光电检测电路与信号处理

### 10.1 光电检测电路的带宽和频率特性

#### 10.1.2 光电检测电路的带宽

**光电检测电路的带宽** 检测电路上限和下限截止频率所包括的频率响应范围。

$$\Delta f = f_{\text{HC}} - f_{\text{LC}} \approx f_{\text{HC}} \quad (10-1)$$

**带宽对信号质量的影响：**

- 带宽过小——使某些谐波分量的幅度和相位发生变化导致合成波形的畸变，即引起频率失真。
- 带宽过大——引入过多的噪声，导致输出信噪比变差。

**带宽选择的原则：**

保持信号频谱中绝大部分能量通过而削掉部分频谱能量较低的高频分量。

**几种调制信号的带宽选择：**

- 正弦调幅信号：  $\Delta f = B = 2F$
- 正弦调频信号：  $\Delta f = B = 2(m_f + 1)F$
- 脉冲波信号：  $\Delta f = B = 2(m_f + 1)F$

对于各种形状的脉冲而言，获得信噪比最佳的带宽满足： $\Delta f t_d = 0.25 \sim 0.75$

## 第 10 章 光电检测电路与信号处理

### 10.1 光电检测电路的带宽和频率特性

#### 10.1.3 光电检测电路的频率特性分析与设计

光电检测电路的频率特性由输入级电路、前置放大器和后续放大器等单元环节确定。

##### 1. 输入级电路的频率特性

输入级电路通常由光电探测器及它的偏置电阻和负载电阻（包括前置放大器的输入电阻）构成。由于探测器的固有时间常数和电路时间常数的影响，其频率特性突出表现在对高频光信号响应的衰减上。

以光电导探测器为例。

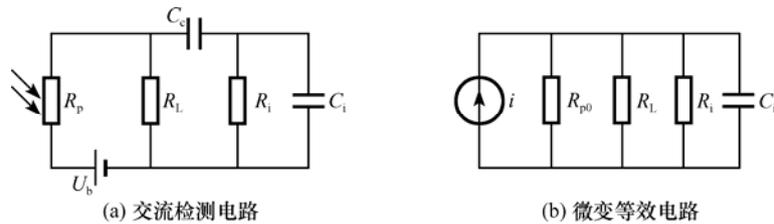


图 10-4 光电导探测器电路

设入射光辐射通量： $\Phi = \Phi_0 e^{j\omega t}$

输出交变光电流： $i(t) = \frac{I_{p0}}{1 + j\omega\tau_c} e^{j\omega t}$

输出电压幅值： $U_m = \frac{I_{p0} R_L'}{\sqrt{(1 + \omega^2 \tau_c^2)(1 + \omega^2 \tau_e^2)}} = \frac{U_0}{\sqrt{(1 + \omega^2 \tau_c^2)(1 + \omega^2 \tau_e^2)}}$

实际应用中，可根据光电导探测器的固有响应时间常量  $\tau_c$  和电路时间常量  $\tau_e$  决定：

$$\text{当 } \tau_c \gg \tau_e \text{ 时: } U_m = \frac{U_0}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_c^2}}, \quad f_{\text{HC}} = \frac{1}{2\pi\tau_c}$$

$$\text{当 } \tau_c \ll \tau_e \text{ 时: } U_m = \frac{U_0}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_e^2}}, \quad f_{\text{HC}} = \frac{1}{2\pi\tau_e}$$

##### 2. 光电检测电路综合频率特性的设计

###### 主要步骤：

- 对输入光信号进行傅里叶频谱分析，得到信号的频谱分布，从而确定带宽。
- 确定多级光电检测电路的允许通频带宽和上限截止频率。
- 根据级联系统的带宽计算方法，确定单级检测电路的阻容参数。

## 第 10 章 光电检测电路与信号处理

### 10.2 光电检测电路的低噪声设计

#### 10.2.1 前置放大器的噪声

##### 1. 放大器 $E_n - I_n$ 噪声模型

**$E_n - I_n$  噪声模型** 将放大器内部的所有噪声源都折算到输入端，也就是用阻抗为零的噪声电压发生器  $E_n$  和输入端串联，用阻抗为无限大的噪声电流发生器  $I_n$  和输入端并联，而放大器本身则假设为一个无噪声的理想放大电路。

等效输入噪声： $E_{ni}^2 = E_{ns}^2 + E_n^2 + I_n^2 R_s^2$

$E_n$  的测量方法：在信号源内阻  $R_s = 0$ （即放大器输入端短路）条件下测量总输出噪声，即为  $K_v E_n$ ，然后除以放大器增益  $K_v$ ，就得到  $E_n$ 。

$I_n$  的测量方法：采用大的（信号）源电阻（或输入端开路）条件下，测得放大器输出噪声电压，除以系统增益  $K_v$  和  $R_s$ ，就得到  $I_n$ 。

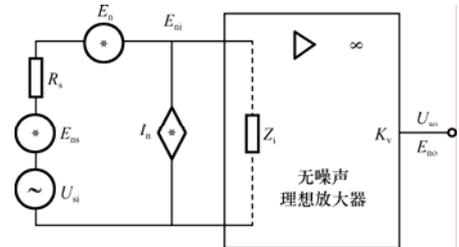


图 10-6 放大器  $E_n - I_n$  噪声模型

##### 2. 噪声系数

**噪声系数** 衡量放大器噪声性能好坏的重要指标，能够反映出放大器的噪声使系统信噪比变坏的程度。

$$F = \frac{\text{放大器输入信噪比 } (S/N)_i}{\text{放大器输出信噪比 } (S/N)_o} = \frac{S_{Pi}/N_{Pi}}{S_{Po}/N_{Po}} \quad (10-17)$$

用分贝 (dB) 表示： $NF = 10 \lg F$

对于级联放大器：

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{K_{P1}} + \frac{F_3 - 1}{K_{P1} \cdot K_{P2}} + \dots + \frac{F_n - 1}{K_{P1} \cdot K_{P2} \cdot \dots \cdot K_{P(n-1)}} \quad (10-18)$$

##### 3. 最佳源电阻与噪声匹配

**最佳源电阻** 噪声系数  $F$  与源电阻  $R_s$  有关，选择适当的源电阻  $R_s$  可使噪声系数  $F$  最小。通常称这个适当的源电阻为最佳源电阻。

$$R_{s\text{opt}} = \frac{E_n}{I_n} \quad (10-21)$$

**噪声匹配** 当源电阻  $R_s = R_{s\text{opt}}$  时，噪声系数  $F$  达到最小值，这就是说，当信号源（探测器）的内阻等于放大器的最佳源电阻值时，放大器对检测电路附加的噪声最小，此时，称为信号源（探测器）与放大器之间达到了噪声匹配。

**噪声匹配与功率匹配的概念区别：**

- 噪声匹配——信号源的内阻等于放大器的最佳源电阻时放大器引入的噪声最小化。
- 功率匹配——信号源的内阻等于放大器的输入电阻（阻抗）时信号源与放大器之间功率传输达到最大。

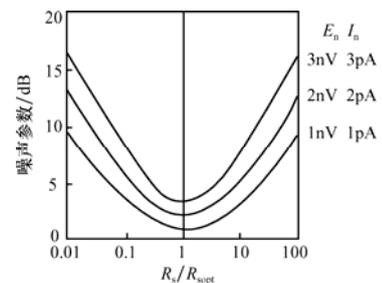


图 10-7 噪声系数与源电阻关系

## 第 10 章 光电检测电路与信号处理

### 10.2 光电检测电路的低噪声设计

#### 10.2.2 光电检测电路的噪声

光电检测电路的噪声主要来自探测器本身的噪声、偏置电路的噪声和前置放大器的附加噪声。

##### 1. 光电检测电路的 $E_n - I_n$ 噪声模型

在光电检测电路中，信号源为光电探测器，其信号源噪声除了源内阻的热噪声外，还应包括探测器本身的其他噪声，如光伏探测器的散粒噪声、光敏电阻的产生-复合噪声等。

光电检测电路中信号源总噪声增大时，放大器的噪声使系统信噪比变坏的程度相对降低；其噪声匹配电阻  $R'_{\text{sopt}}$  向增大的方向偏离最佳源电阻  $R_{\text{sopt}}$  值。

##### 2. 光电探测器与前置放大器的噪声匹配

首先，根据使用要求，如光谱响应范围、响应频率、使用温度、最小可探测功率等，选定探测器。一旦探测器类型选定后，其内阻也就确定了。再根据最佳源电阻匹配原则，选择低噪声有源器件作前置放大器，以得到最大的输出信噪比。

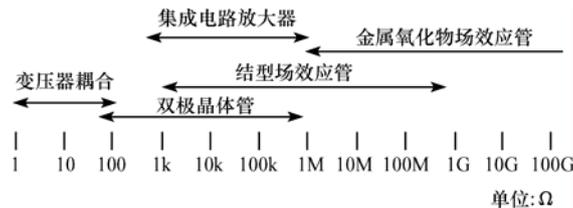


图 10-10 常用器件最佳源电阻分布示意图

##### 3. 偏置电路和负反馈电路的噪声影响

**偏置电路的噪声影响：**探测器的偏置电路，如光电倍增管、光电二极管、光敏电阻的偏置电阻，对检测电路的噪声贡献等效于偏置电阻与探测器的并联。

**负反馈电路的噪声影响：**串联负反馈的噪声贡献等效于负反馈合成电阻与探测器的串联；并联负反馈的噪声贡献等效于负反馈合成电阻与探测器的并联。

**阻抗元件参数选择准则：**

- 与探测器串联的阻抗元件，应满足：
$$\begin{cases} R_{\text{cs}} \ll E_n / I_n \\ X_{\text{cs}} \ll E_n / I_n \end{cases}$$
- 与探测器并联的阻抗元件，应满足：
$$\begin{cases} R_{\text{cp}} \gg E_n / I_n \\ X_{\text{cp}} \gg E_n / I_n \end{cases}$$
- 接口电路电阻两端的直流电压应尽量减小，以减小电阻元件的  $1/f$  噪声。

##### 4. 检测电路的低噪声设计要点

- 选择低噪声放大器；
- 减小偏置电路和反馈电路的噪声影响；
- 降低前置放大器的附加噪声影响；
- 选择工作频率和带宽。

## 第 10 章 光电检测电路与信号处理

### 10.2 光电检测电路的低噪声设计

#### 10.2.3 光电检测电路的噪声估算

**噪声估算的目的：**确定器件和电路的固有噪声电平，计算信噪比，估算出为保证可靠检测所必需的最小输入光功率值。

**等效处理** 将检测电路各种器件的噪声等效为相同形式的均方值（或有效值）电流源的形式，以便与其他电路器件一起以统一的方式建立起等效噪声电路。

##### 1. 等效噪声带宽

**等效噪声带宽** 最大增益矩形带宽。表示为：

$$\Delta f_e = \frac{1}{A_p} \int_0^{\infty} A_p(f) D(f) df \quad (10-28)$$

对于光电探测器输入电路中的并联  $RC$  电路，等效噪声带宽为：

$$\Delta f_e = \frac{1}{4RC} \quad (10-34)$$

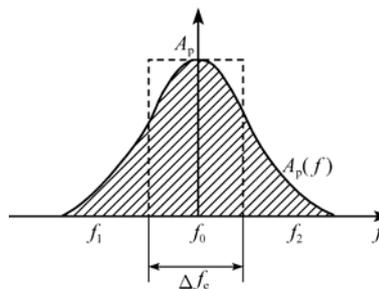


图 10-11 等效带宽物理意义

##### 2. 噪声估算方法

- 确定探测器件和前置放大器的噪声源，画出检测电路的噪声等效电路；
- 计算等效电路的噪声等效带宽；
- 根据噪声等效电路计算噪声输出电流（电压）、信噪比和要求的 minimum 输入光功率。

## 第 10 章 光电检测电路与信号处理

### 10.3 微弱光电信号的检测与处理

#### 10.3.1 相关检测理论

##### 1. 相关函数

**自相关函数** 度量一个变化量或随机过程在  $t$  和  $t-\tau$  两个时刻线性相关的统计参量。

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t-\tau)dt \quad (10-37)$$

自相关函数的性质:

- $R_{xx}(\tau) = R_{xx}(-\tau)$ ，即  $R_{xx}(\tau)$  为  $\tau$  的偶函数。
- $R_{xx}(\tau)$  在原点  $\tau=0$  处最大， $R_{xx}(0)$  为  $x(t)$  的平均功率。
- 若变化量  $x(t)$  不包含周期性分量， $R_{xx}(\tau)$  将从  $\tau=0$  的最大值随  $\tau$  的增大单调地下降，到  $\tau \rightarrow \infty$ ，趋近于  $x(t)$  平均值的平方。如果平均值为零，则  $R_{xx}(\infty)$  随着  $\tau$  增大而趋于零，表示不相关。

- 若变化量  $x(t)$  为规则函数，即包含有周期性信号分量，则自相关函数  $R_{xx}(\tau)$  也将包含有周期性信号分量。

**互相关函数** 度量两个随机过程  $x(t)$ 、 $y(t)$  间的相关性函数。

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t-\tau)dt \quad (10-38)$$

**互相关函数的性质:** 如果两个随机过程互相完全没有关系，则其互相关函数将为一个常数，并等于两个变化量平均值的乘积。若其中一个变化量平均值为零，则两个变化量互相关函数  $R_{xy}(\tau)$  将处处为零，即完全独立不相关。

##### 2. 相关检测

**相关检测** 利用信号具有良好的时间相关性和噪声的不相关性（或仅在短时间内部分相关），使信号进行积累而噪声不进行积累的原理，从而把被噪声淹没的信号提取出来。

**自相关检测** 利用延时器对被噪声干扰的信号进行自相关处理。

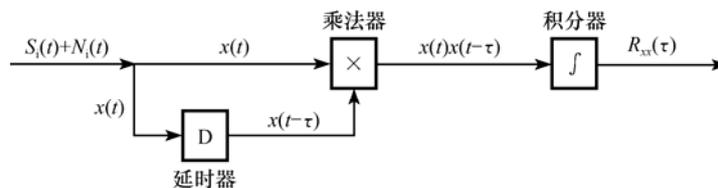


图 10-14 自相关检测的原理方框图

**互相关检测** 利用一个与待测信号同频率的信号，对被噪声干扰的信号作互相关处理。

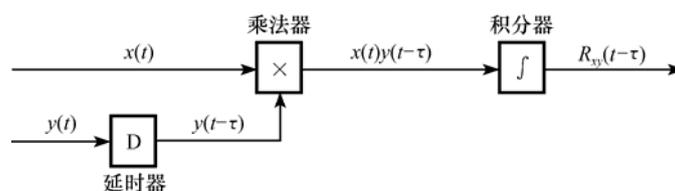


图 10-15 互相关检测原理方框图

## 第 10 章 光电检测电路与信号处理

### 10.3 微弱光电信号的检测与处理

#### 10.3.2 锁定放大器

**锁定放大器 (LIA)** 也称为锁相放大器, 是一种基于互相关接收理论的弱信号检测设备。它利用相敏检波器大大压缩等效噪声带宽, 从而有效地抑制噪声, 并检测出周期信号的幅值和相位。

##### 1. 锁定放大器的结构原理

锁定放大器由信号通道、参考通道和相敏检波等三个主要部分组成。信号通道的输入信号与参考通道的参考信号在相敏检波器中混频, 经过低通滤波器后得到一个与输入信号幅度成比例的直流输出分量。

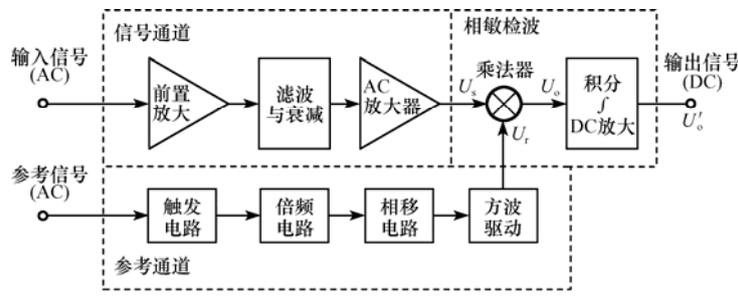


图 10-16 锁定放大器的组成框图

输入信号:  $U_s = U_{sm} \cos \omega t$

参考信号:  $U_r = U_{rm} \cos(\omega t + \varphi)$

低通滤波器输出信号:  $U'_o = \frac{1}{2} U_{sm} U_{rm} \cos \varphi$

##### 2. 信噪比的改善

一阶 RC 滤波器的等效噪声带宽:  $\Delta f_e = \int_0^\infty K^2 df = \int_0^\infty \frac{df}{1 + \omega^2 R^2 C^2} = \frac{1}{4RC}$

锁定放大器的信噪改善比:  $SNIR = \frac{SNR_o}{SNR_i} = \frac{\sqrt{\Delta f_i}}{\sqrt{\Delta f_e}}$

##### 3. 锁定放大器检测弱光信号的应用特点:

- 锁定放大器适用于调幅信号的检测, 使用时要求对入射光束进行斩光或光源调制。
- 锁定放大器是一种极窄带高增益的放大器, 增益可高达  $10^{11}$  (220dB), 滤波器带宽可窄到 0.0004Hz, 品质因数  $Q$  值可达  $10^8$  或更大。但它不象带通放大器那样, 能恢复原有信号的波形。
- 锁定放大器是 AC/DC 信号变换器, 其输出信号正比于输入信号的幅度和它与参考电压相位差的余弦。
- 可以补偿背景辐射噪声和检测电路的固有噪声, 信噪比改善可达 1000 倍。

## 第 10 章 光电检测电路与信号处理

### 10.3 微弱光电信号的检测与处理

#### 10.3.3 取样积分器

**取样积分器** 又称为 Boxcar 平均器，一种基于自相关接收理论的弱信号检测设备。利用取样和平均化技术测定深埋在噪声中的周期性信号。对于稳定的周期性电信号，若在每个周期的同一相位处多次采集波形上某点的数值，其算术平均的结果与该点处的瞬时值成正比例，而随机噪声的长时间平均值将收敛为零；各个周期内取样平均信号的总体可展现待测信号的真实波形。

**取样积分器的分类：** 定点式、扫描式。

##### 1. 定点式取样积分器

**工作原理：** 取样脉冲在连续周期性信号的同位置采集信号，测量周期信号的某一瞬态平均值。由取样开关和 RC 积分电路组成的门积分器是取样积分器的核心。

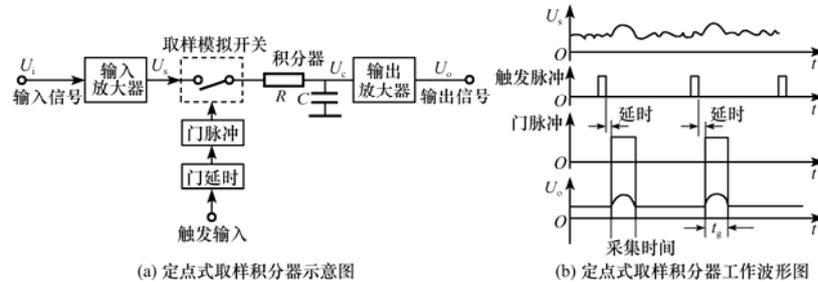


图 10-18 定点式取样积分器及工作波形

##### 2. 扫描式取样积分器

**工作原理：** 取样积分器门延迟的时间借助慢扫描电压缓慢而连续地改变，使取样脉冲和相应触发脉冲之间的延时依次增加，于是对每一个新的触发脉冲，取样脉冲缓慢移动，逐次扫描整个输入信号。这种情况下积分器的输出变成信号波形的展开复制。

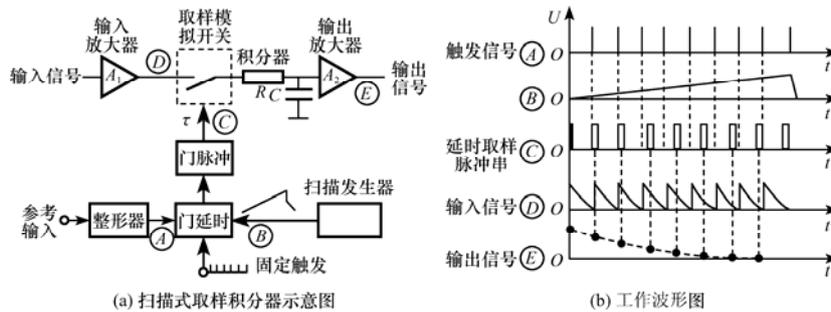


图 10-19 扫描式取样积分器及工作波形

##### 3. 取样积分器检测弱光信号的应用特点：

- 适用于脉冲光源产生的连续周期性变化的信号测量或单个光脉冲的幅度测量。
- 取样积分器在每个信号脉冲周期内只取一个输入信号值。
- 在多次取样过程中，门积分器对被测信号的多次取样值进行线性叠加，而对随机噪声是矢量相加的，所以，对信号有恢复和提取的作用。
- 在测量占空比小于 50% 的窄脉冲光强度时，要比锁定放大器有更好的信噪比。
- 用扫描方式测量信号波形时能得到 100ns 的时间分辨力。
- 双通道系统能提供自动背景和辐射源补偿。

## 第 10 章 光电检测电路与信号处理

### 10.3 微弱光电信号的检测与处理

#### 10.3.4 光子计数器

**光子计数器** 一种基于直接探测量子限理论的极微弱光脉冲检测设备。它利用光电倍增管的单光子检测技术，通过电子计数器鉴别并测量单位时间内的光子数，从而检测离散的弱光脉冲信号功率。

**光子计数器的分类：**基本型、背景补充型、辐射源补偿型。

##### 1. 基本的光子计数器

**工作原理：**入射到光电倍增管阴极上的光子引起输出信号脉冲，经放大器输送到一个脉冲高度鉴别器上。由放大器输出的信号除有光子脉冲之外还包括器件噪声和多光子脉冲。后者是由时间上不能分辨的连续光子集合而成的大幅度脉冲。峰值鉴别器的作用是从中分离出单光子脉冲，再用计数器计数光子脉冲数，计算出在一定的时间间隔内的计数值，以数字和模拟信号的形式输出。数模转换用于给出正比于计数脉冲速率的连续模拟信号。

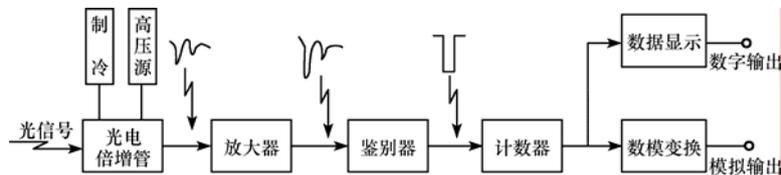


图 10-21 基本光子计数器原理

##### 2. 背景补偿的光子计数器

**工作原理：**斩光器用来通断光束，分别产生交变的“信号+背景”和“背景”的光子计数率，同时为光子计数器 A、B 提供选通信号。当斩光器叶片挡住输入光线时，放大鉴别器输出的是背景噪声 N，这些噪声脉冲在定时电路的作用下由计数器 B 收集。当斩光器叶片允许入射光通向倍增管时，鉴别器的输出包含了信号脉冲和背景噪声(S+N)，它们被计数器 A 收集。这样在一定的测量时间内，经多次斩光后计算电路就给出了信号脉冲和总脉冲两个输出量。

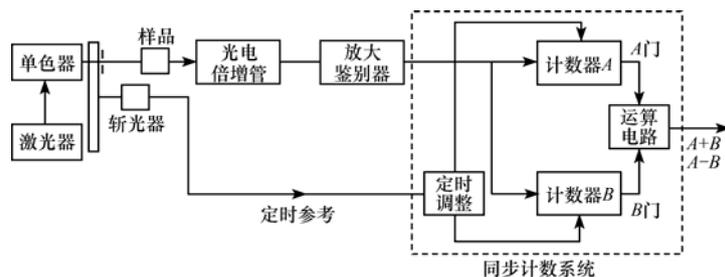


图 10-24 背景补偿的光子计数器

##### 3. 光子技术器检测弱光信号的应用特点：

- 只适合于极弱光的测量，光子通量限制在大约每秒  $10^9$  个（相当于  $1\text{nW}$  的光功率）以内，不能测量包含许多光子的短脉冲光。
- 光电倍增管检测电路应按照低噪声和宽动态响应范围等要求合理设计，并需装备有制冷作用的特种外罩。
- 不论是检测连续的、斩光的或者脉冲的弱光信号都可以使用，能获得良好的信噪比。
- 不需 A/D 转换，即可提供数字量输出。

## 第 11 章 典型光电系统的分析与设计

### 11.0 本章知识要点

#### 1. 分布式光纤测温系统的工作原理:

光学时域反射定位技术、自发拉曼散射—温度效应

#### 2. 三种光谱测量系统的原理结构:

光谱辐射仪、光学多通道分析仪、傅里叶变换（红外）光谱仪

#### 3. CCD 玻璃管尺寸测控仪的原理结构及系统设计:

器件选择方法、光学系统的设计、检测电路的设计

#### 4. 两种光电精确指导系统的原理结构:

红外电源寻的制导系统、激光制导系统

#### 5. 光测图像系统的三个关键技术:

图像特征检测、摄像机标定、三维数据处理

## 第 11 章 典型光电系统的分析与设计

### 11.1 分布式光纤测温系统

#### 11.1.1 拉曼分布式光纤测温系统的工作原理

##### 1. 光学时域反射定位技术

**工作原理：**激光器发出的激光脉冲注入到光纤中，产生多种散射光，其中部分散射光会沿着光纤反射回来（称为后向散射），并被光电探测器接收。工作时，激光器与探测器同步触发，并利用高速采集卡进行采样计时。光电探测器接收到后向散射光信号的时刻（以采集卡采集周期  $1/f$  的序列数  $i$  计算）乘以光波在光纤中的传输速度即为光波从发出到接收所经过的距离，该距离的一半处即为发生后向散射的位置。

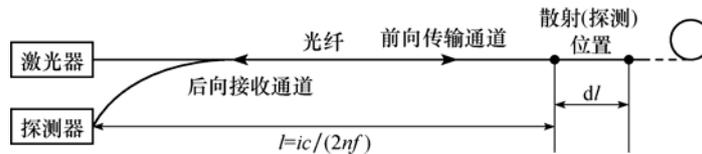


图 11-1 光学时域反射定位技术原理示意图

**定位公式：**

$$l = v \cdot i \cdot \Delta t / 2 = c \cdot i \cdot \Delta t / (2n) = ic / (2nf) \quad (11-1)$$

##### 2. 基于自发拉曼散射—温度效应的温度传感器与解调原理

**工作原理：**在光纤内传输的多种散射光中，反斯托克斯光通量对温度特别敏感。因此，当光纤受到外部温度的调制时，会使反斯托克斯光通量发生变化，利用光电技术检测反斯托克斯光通量即可对温度进行测量。在实际的光纤测温系统中，通常以对温度敏感的反斯托克斯散射光作为信号光，而以对温度不敏感的斯托克斯散射光或瑞利散射光作为参考光，检测信号光和参考光两者光通量的比值，可解调出散射区的温度信息。

**测温公式（以瑞利散射光作参考光）：**

$$T(l) = \frac{h \cdot \Delta \nu}{k \cdot \ln \left( 1 + \frac{R(T_0, l)}{R(T, l)} \cdot \{ \exp[h \cdot \Delta \nu / (kT_0)] - 1 \} \right)} \quad (11-7)$$

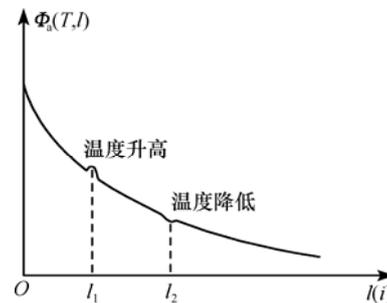


图 11-4 反斯托克斯后向散射光通量与温度、位置的关系示意图

在光纤内传输的多种散射光中，瑞利散射光的频率即为入射激光脉冲的频率  $\nu_0$ ，而自发喇曼散射光有两种情形：一种称为斯托克斯（Stocks）光，它是由于一部分光能转换为光纤分子的热能，使散射光的波长比入射激光的波长要长，频率减小为  $\nu_s = \nu_0 - \Delta \nu$ （其中  $\Delta \nu$  为喇曼频移量）；另一种称为反斯托克斯（Anti-Stocks）光，它是由于光纤分子的一部分热能转换为光能，使散射光的波长比入射激光的波长要短，频率增大为  $\nu_{as} = \nu_0 + \Delta \nu$ 。

## 第 11 章 典型光电系统的分析与设计

### 11.1 分布式光纤测温系统

#### 11.1.2 实用的分布式光纤测温系统

**优点：**抗电磁干扰、可实现远距离测量、空间定位精度和自动化程度高。

**应用：**电力电缆的测温报警、输油输气管道、堤坝泄露检测、煤矿安全报警。

#### 1. 系统结构

图 11-5 为中国计量学院研制的 FGC-W30 型分布式光纤温度传感器示意图，系统包括主机、光纤传感头和信号采集处理三大部分。

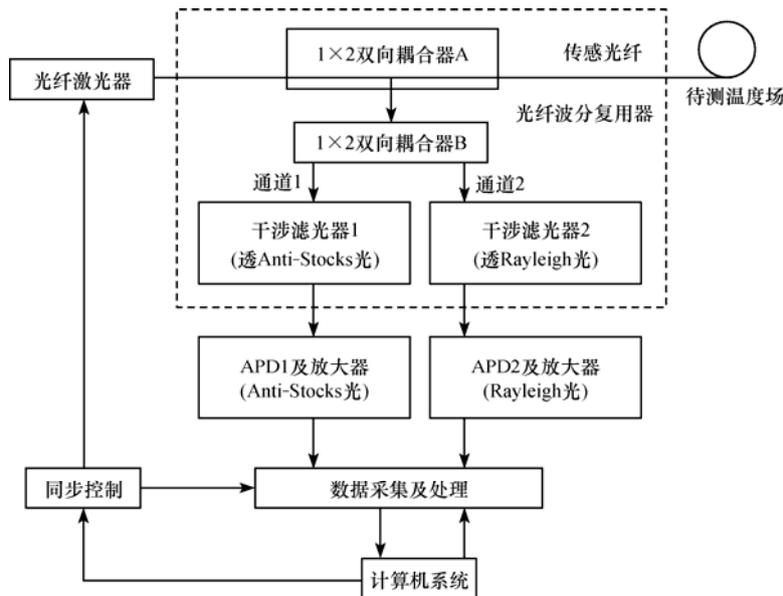


图 11-5 分布式光纤测温系统的功能结构示意图

**工作过程：**由计算机系统发出同步控制脉冲，光纤激光器发出的激光脉冲经  $1 \times 2$  双向耦合器 A 注入传感光纤中，在光纤中产生的后向散射光依次经双向耦合器 A、B 后，进入通道 1、2，再经窄带干涉滤光器 1、2 滤波，分离出反斯托克斯散射光与瑞利散射光，这两种散射光分别由雪崩光电二极管 APD1、APD2 组件接收并进行光电转换和信号处理，最后由计算机系统数据进行采集、解调等，其中数据采集与触发激光器发光同步进行。

#### 2. 系统的主要部分

- **主机：**由光源、光纤波分复用器（OWDM）模块以及光电接收与信号放大模块三个部分组成。光源采用脉冲掺铒光纤激光器；光纤波分复用器模块由两个  $1 \times 2$  双向耦合器和两个光纤光学干涉滤光器等组成；光电接收与信号放大模块由 2 个雪崩光电二极管和高性能低噪声宽带放大器组成。
- **光纤传感头：**采用 G652 单模光纤（31km 长）作为系统的光束传输与温度传感光纤，可根据不同应用的需要而采取接触式或非接触式的测温方式。
- **信号采集与处理部分：**由硬件和软件组成。硬件包括双通道数据采集累加卡（采样频率 50MHz、带宽为 100MHz）、计算机系统、高速瞬态数字示波器、BOXCAR；软件包括数据采集、累加（累加  $N$  次，可使信噪比提高  $N^{1/2}$  倍）与同步控制、各种降噪算法（如小波变换去噪法）、测量结果显示等程序。

## 第 11 章 典型光电系统的分析与设计

### 11.2 光谱测量系统

#### 11.2.1 基于 PMT 的光谱辐射仪

**优点：**灵敏度高、测量精度高。

**应用：**分子吸收光谱、荧光等强度相对稳定或慢变化的微弱光光谱测量。

##### 1. 光谱辐射仪的系统结构

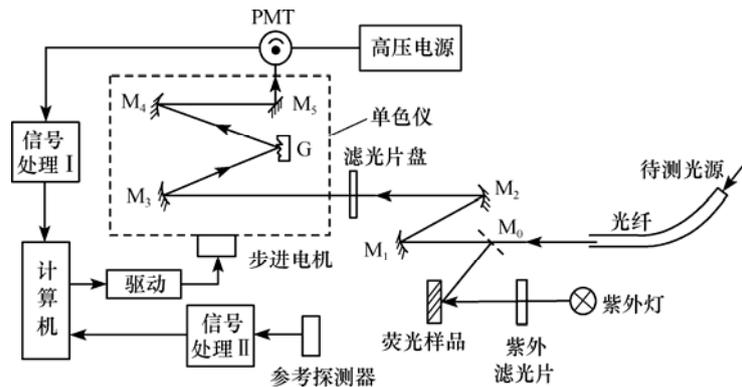


图 11-6 一种光谱辐射仪原理示意图

**工作过程：**测量光源时，将反光镜  $M_0$  移开。由待测光源发出的光束通过光纤进入测量系统，再经单色仪内的光栅  $G$  分光后，出射光谱由光电倍增管（PMT）接收。PMT 输出的光电流，经信号处理电路放大和 A/D 转换后送入计算机，完成该种光谱成分的测量。然后由计算机发出控制信号，驱动单色仪的步进电机，使单色仪对入射光束进行光谱扫描，如此下去，PMT 就逐一接收到待测光源所含各种波长的光谱信号。仪器通过标准光源（已知其光谱功率分布）和待测光源的比较测量，获得待测光源的光谱功率分布。

##### 2. 光电倍增管的应用

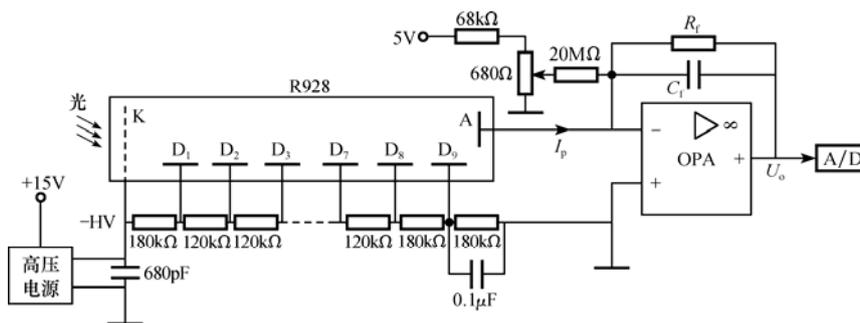


图 11-7 一种光谱辐射仪的光电检测电路

光谱辐射仪光谱测量范围：200~800nm

PMT 型号：R928 型

PMT 光谱响应范围：185~900nm

PMT 电压：-600~-1100V

PMT 线性度误差：~0.2%

PMT 入射最大光通量： $5 \times 10^{-10}$  lm

## 第 11 章 典型光电系统的分析与设计

### 11.2 光谱测量系统

#### 11.2.2 光学多通道分析仪 (OMA)

**优点:** 单次测量光谱范围宽、响应速度快、灵敏度高、数据采集处理方便。

**应用:** 闪光灯等快变光源的瞬态光谱测量、荧光光谱测量、磷光光谱测量。

##### 1. OMA 的基本结构和工作原理

**基本结构:** 光学分光模块、光电转换和信号放大模块、数据采集与处理模块

**工作过程:** 待测光源发出的光束经聚焦、空间滤波、准直后照射到光谱仪中的光栅上, 被光栅色散后在空间上分离开, 再经透镜聚焦在 CCD 的光敏面上。根据光栅色散原理可知: CCD 各像元的位置分别对应着光束色散后的不同波长, 一个像元对应极小一段光谱范围, 称为一个通道。由采样电路对 CCD 的输出信号进行逐位采样, 由所得的采样位置结果, 就可求得信号所对应的波长, 而信号的幅度对应着该波长下的光谱辐射能量。这样, 只要对 CCD 的所有像元进行一次完整的采样 (即获得一幅图像), 就可得到待测光源在一定波长范围内的光谱分布曲线。

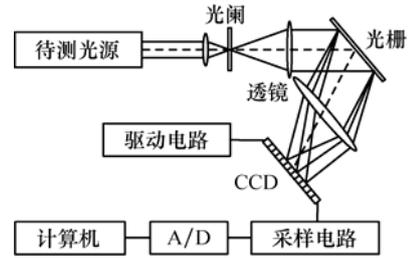


图 11-9 OMA 的基本结构图

##### 2. CCD 的选择因素

CCD 参数	对应的影响测量因素
像元位置测量精度	光谱测量精度
像元尺寸	最小可分辨波长、光谱轮廓的精细程度
靶面尺寸 (像元尺寸 $\times$ 像元数) + 灵敏度	光谱测量范围
光谱特性	测量波段
线性度	入射光照度

## 第 11 章 典型光电系统的分析与设计

### 11.2 光谱测量系统

#### 11.2.3 傅里叶变换（红外）光谱仪

**优点：**信噪比高、多通道探测、分辨率高、抑制杂散光影响、能够探测极弱光。

**应用：**近红外、远红外乃至毫米波段的光谱分析，可见光和紫外区域也有新的拓展。

##### 1. 傅里叶变换光谱仪的基本结构

**系统结构：**以迈克尔孙干涉仪为主要光学部件，并具有光电信号采集和信息处理功能。

**工作过程：**先利用干涉仪测量由同一光源分出的两束光的干涉图，再利用快速傅里叶变换技术对干涉图进行计算处理得到光源的光谱分布。

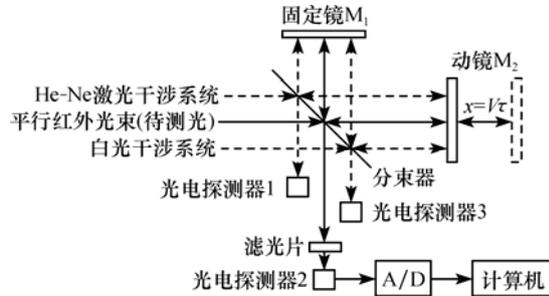
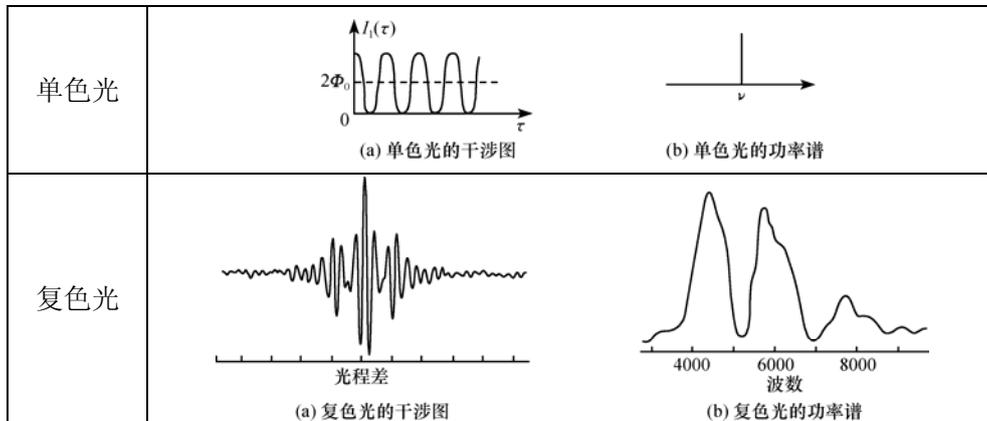


图 11-10 一种傅里叶变换（红外）光谱仪的系统结构示意图

##### 2. 傅里叶变换光谱学

**傅里叶变换光谱技术** 单色光或复色光的双光束干涉图的强度分布交变项与光功率谱之间呈余弦傅里叶变换关系，可从干涉图中提取光源的光谱分布信息；也可利用光电探测器得到干涉图随时间变化的电信号，再从电信号中提取光源的光谱分布信息。因此，这种光谱测量技术称为傅里叶变换光谱技术。

**技术核心：**光谱分布是干涉图的傅里叶变换。



##### 3. 傅里叶变换光谱仪的特点

- 高通光能力和高信噪比——不需要分光，没有缝宽限制，光通量比常规光谱仪大得多，因此具有更高的灵敏度和信噪比，特别适合于研究极弱光的光谱。
- 具有多通道探测的优点——只用一个探测器，不同光谱成分的调制频率不同，它们被同一光电探测器同时接收时就相当于多通道的测量情况。
- 高分辨本领——原则上，增加两镜间的光程差即可提高分辨率。
- 减少了杂散光的影响——信号光被调制，杂散光不被调制，有效抑制杂散光。

## 第 11 章 典型光电系统的分析与设计

### 11.3 CCD 尺寸测量系统

#### 11.3.1 CCD 玻璃管测控仪的系统设计及工作原理

**优点：**自扫描、高分辨率、高灵敏度、像素位置信息准确、结构紧凑、非接触式测量。

**应用：**工件尺寸的在线检测和高精度、高速度的检测技术领域。

##### 1. 系统设计

**待测物理量：**玻璃管的外径与壁厚值。

**测量原理：**玻璃管不同部位对光束的透射率不同，上、下边缘处的透射光强相对较弱，形成两条暗带，而中间部分的透射光强相对较强，形成亮带。CCD 拍摄信号中，两条暗带（波谷）最外面的边界距离为玻璃管外径像的大小，中间亮带的宽度为玻璃管内径像的大小，暗带的宽度则是玻璃管的管壁像的大小。

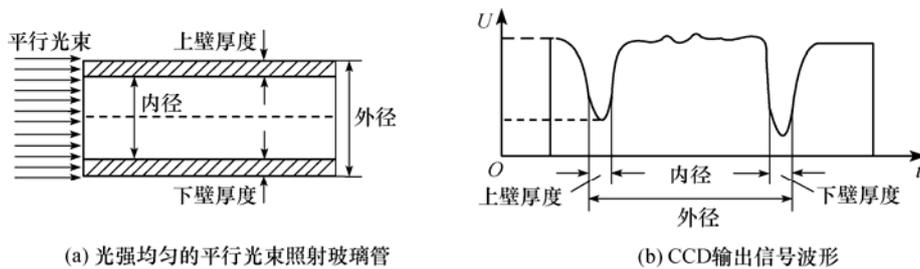


图 11-13 线阵 CCD 输出信号波形及其与玻璃管尺寸的对应关系图

**系统构成：**照明系统、被测玻璃管、成像物镜、CCD、计算机测控系统

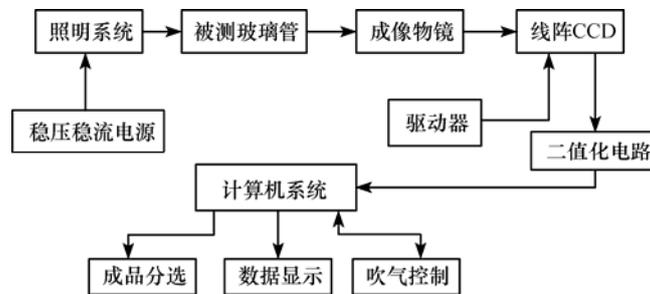


图 11-14 CCD 玻璃管尺寸测控仪原理框图

##### 2. 工作过程

线阵 CCD 输出的视频信号经二值化电路处理后，在时钟脉冲的作用下（对应 CCD 的空间分辨率），分别得到外径和壁厚尺寸的脉冲信号。将外径、壁厚信号传输到计算机数据采集接口电路，由配套的计算机系统（含处理软件）算出玻璃管的外径和壁厚值。将计算值与设定的公差值进行比较，得到偏差量。计算值、偏差量一方面可以保存、显示和输出，另一方面可根据偏差情况对玻璃管生产设备施加相应的控制信号，调整玻璃管的拉制速度和吹气量等参数，并挑选出合格品。

## 第 11 章 典型光电系统的分析与设计

### 11.3 CCD 尺寸测量系统

#### 11.3.2 CCD 玻璃管测控仪的参量确定

##### 1. 仪器的技术要求

- 测量范围：被测玻璃管的外径有  $\Phi 20\text{mm}$  和  $\Phi 28\text{mm}$  两种。
- 测量尺寸及精度要求：外径  $\Phi 20 \pm 0.3\text{mm}$ 、 $\Phi 28 \pm 0.4\text{mm}$ ；  
壁厚  $(1.2 \pm 0.05)\text{mm}$ 、 $(2 \pm 0.07)\text{mm}$ 。
- 显示内容：外径值、壁厚值、偏差值，并能在产品尺寸偏差超过允许的基准时报警。
- 过程控制：拉制速度、吹气量以及玻璃管合格产品的筛选。

##### 2. 线阵 CCD 摄像器件的选择方法

- 选择依据：测量精度 ( $>1.76\%$ )、测量范围 ( $>28.4\text{mm}$ )
- 对应指标：像素尺寸 ( $\Delta \leq 25\ \mu\text{m}$ )、像素个数 ( $\geq 28400/\Delta$ )
- 选择型号：TCD1206 SUP 型双沟道线阵 CCD

##### 3. 光学系统的设计

- 设计要求：像方视场 ( $>30.24\text{mm}$ )、成像分辨率 ( $\geq 73\text{lp/mm}$ )
- 光学系统参数：物镜焦距 ( $f=130\text{mm}$ )、数值孔径 ( $\text{NA}=0.5$ )  
像方视场 ( $2\omega'=20^\circ$ )、系统的放大率  $\beta=-0.8$
- 照明光源：柯拉照明光源 (光强均匀)

##### 4. 检测电路的设计

- CCD 输出视频信号的处理电路：浮动阈值二值化电路
- 玻璃管外径和壁厚的检测电路：同步脉冲触发锁存电路

##### 5. 微机数据采集接口

电路集成至数据采集卡，并将三态锁存器的数据输出端与 PC 总线的的数据总线并联。

##### 6. 系统的长线传输

采用光电耦合器进行两次光电隔离，以消除长线传输带来的噪声，解决阻抗匹配问题，提高系统稳定性。

##### 7. 系统设计过程

- 根据测量范围和精度选择适当的 CCD (线阵或面阵)；
- 设计匹配的照明系统和光学成像系统；
- 设计 CCD 视频信号处理电路和数据采集接口以及配套的计算机处理与控制软件。

## 第 11 章 典型光电系统的分析与设计

### 11.4 光电精确制导系统

#### 11.4.1 红外点源寻的制导系统

**点源** 对系统的张角小于系统的瞬时视场且其细节无法分辨的目标信号源。

**红外点源寻的制导** 利用活动目标本身的红外辐射作为导引信号，将被攻击目标当作热辐射点源进行探测，经过处理后实现对目标的跟踪和对制导武器的控制，使制导武器飞向目标的一种被动寻的技术。

**优点：**系统结构简单、体积小、重量轻、角分辨率高、工作可靠、效费比较高。

##### 1. 红外点源导引头

**系统结构：**红外点源导引头由红外搜索与跟踪系统组成。

**搜索系统工作过程：**搜索系统扫描导弹或飞机前方一定的空域，当发现辐射红外线的目标后，经红外检测、变换，并以一定的信号形式驱动，使系统由搜索状态转换成跟踪状态。

**跟踪系统工作过程：**目标在视场内运动时，光学接收系统将目标红外辐射收集并聚焦至红外探测器。探测器输出的电信号携带着目标的角坐标信息，此信号经过处理后一方面送至陀螺跟踪机构使跟踪系统光轴盯住目标；另一方面形成控制信号给执行机构，控制全系统跟踪目标。

##### 2. 红外探测系统

**系统结构：**红外探测系统由光学系统、调制盘和光敏电阻等组成。

**工作过程：**由无穷远目标辐射来的红外辐射能量透过整流罩照射到主反射镜上，经聚焦并反射到次反射镜上，由次反射镜反射后，再经校正透镜进一步聚焦，最后成像于调制盘上，红外辐射经调制盘调制后成为调制信号，目标像点在调制盘上所处的位置与目标在空间相对光轴的位置是一一对应的，因此，通过光学系统聚焦以及调制盘调制后的信号，可以确定目标偏离光轴的大小和方位。

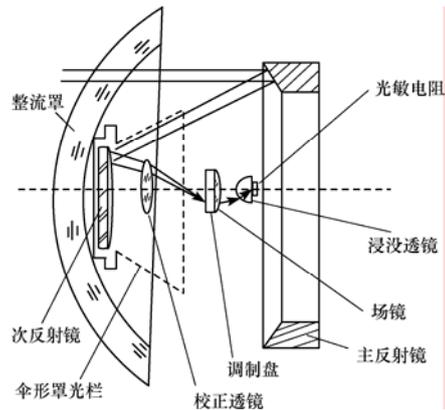


图 11-21 红外探测系统结构示意图

##### 3. 红外导引头作用距离估算

**作用距离** 与红外导引系统正常工作所需最小信噪比所对应的距离。它与目标辐射到探测器上的辐射功率、探测器的响应特性及背景辐射等因素有关。

$$R = [\tau_0 I]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \frac{\pi}{2} D_0 (NA) \tau_1 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot [D^*]^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \frac{1}{(\Omega \Delta f)^{1/2} (I_s / I_n)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11-18)$$

通常，每平方厘米只要有约  $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ W}$  的红外功率就足以将内置有红外导引头的导弹引向目标，导引距离可以从几百米到几十公里。

## 第 11 章 典型光电系统的分析与设计

### 11.4 光电精确制导系统

#### 11.4.2 激光制导系统

**激光制导技术** 以激光为信息载体，把导弹、炮弹或炸弹引向目标而实施精确打击的一种主动或半主动式寻的技术。

**优点：**抗干扰能力强、分辨率高、命中率高、射程远、结构简单、轻小。

**缺点：**易受云、雾、雨、雪和烟尘等影响，不能全天候使用；易暴露于敌方火力之下。

##### 1. 半主动式激光制导系统

**特点：**激光器和寻的器分开放置，寻的器在弹上，激光器放在弹外的载体上。

**系统构成：**武器系统主要有目标指示器、弹上寻的器、弹上控制单元和战斗部等几部分。

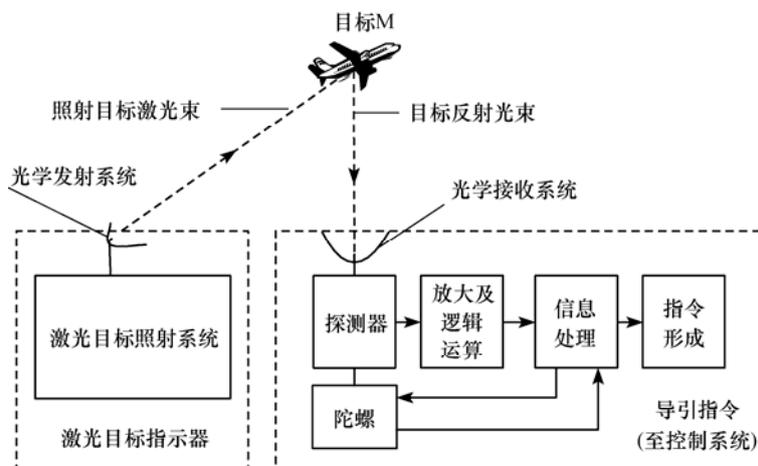


图 11-23 激光半主动寻的系统的的工作原理图

**工作过程：**激光探测器通过光学系统接收由目标反射来的微弱的激光束后转换成电信号，从而发现激光束指示的目标并测量目标所处的位置。放大器把电信号进一步放大，并经过逻辑运算产生角误差信号，信息处理器依据角误差信号求出导引信息；指令形成器依据导引信息产生导引指令，控制导弹沿着正确的弹道飞向目标。

##### 2. 关键部件

- **激光目标指示器：**通常由光学瞄准镜和激光器组成，两者同光轴。
- **激光寻的器：**一般由探测器、放大及逻辑运算器、信息处理器、指令形成器和陀螺稳定平台组成。其中，探测器一般采用四象限光电探测器。

## 第 11 章 典型光电系统的分析与设计

### 11.5 光测图像系统

**优点：**非接触、全场测量；高精度、高速度、高自动化程度、高可靠度。

**应用：**航空航天、军事侦察、工程建设、安防监控、灾害监测、机器人等领域。

#### 11.5.1 模拟图像与数字图像

**模拟图像：**用连续函数描述。

**数字图像：**用元素离散的矩阵描述。矩阵元素的排列位置对应像素点在图像上的空间位置，矩阵元素的数值对应像素点的亮度值。

**采样** 将连续的模拟图像在空间上按一定方式离散划分为多个小区域（即像素）。

**量化** 将对应各像素点上的灰度函数值进行数字化。

#### 11.5.2 光测图像系统的组成

**系统组成：**光学成像设备、图像数字化设备、存储设备、计算机、显示与输出设备

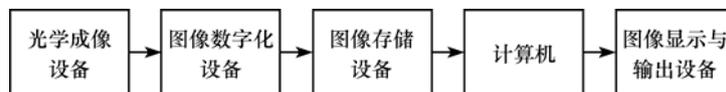


图 11-26 光测图像系统的系统组成

#### 11.5.3 光测图像系统的关键技术

- 图像特征检测——从图像中抽取包含目标位置信息的过程。
- 摄像机标定——为了从图像中提取空间物体的几何信息，通过实验与计算建立图像中像点位置和空间物体表面点位置的相互对应关系的过程。
- 三维数据处理——为了确定目标点的空间位置，使用不同位置的两台摄像机对目标点成像，各自确定一条通过目标点的直线，两条直线的交点即是目标点的位置。

#### 11.5.4 典型光测图像系统举例

待发段火箭倾倒光测图像系统：通过实时检测箭体轮廓线等图像特征，并进行三维解算，可以实时得到箭体的三维姿态——倾倒角度、倾倒角速度和箭体顶部的倾倒线位移、倾倒线速度，从而使系统能同时提供塔架和箭船组合体的实况图像和火箭倾倒的定量参数，为逃逸指挥员提供准确、直接和完整的火箭倾倒信息。



图 11-34 待发段的火箭实测图像