

某些物质吸收光子的能量产生本征吸收或杂质吸收,从而改变物质电导率的现象,称为物质的光电导效应。利用半导体光电导效应制成的器件称为光电导探测器(Photoconductive,简称PC探测器),通常又称为光敏电阻(Photoresistance)。

光敏电阻种类繁多,因为所使用的材料不同,对光的敏感度也不同,有对紫外光敏感的、也有对红外敏感的和可见光敏感的。目前广泛使用的光敏电阻有硫化镉(CdS)、硒化镉(CdSe)、硫化铅(PbS)、硒化铅(PbSe)、硅(Si)、锗(Ge)、铟化钢(InSb)、碲镉汞(HgCdTe)等。光敏电阻的主要优点有:

- (1) 光谱响应范围宽;
- (2) 工作电流大,可达数毫安;
- (3) 所测光强范围宽,既可测弱光,也可测强光;
- (4) 灵敏度高,通过对材料、工艺和电极结构的适当选择和设计,光电导增益可大于1;
- (5) 无极性之分,使用方便。

由于光敏电阻在强光作用下线性较差,弛豫时间长,频率特性较差,其应用领域受到一定限制。光敏电阻常被应用于手机、照相机、光度计、光电自动控制、辐射测量、红外搜索与跟踪、红外成像和红外通信等领域。

本章主要介绍光电导探测器的原理与结构、基本特性参数、几种典型的光电导探测器及光电导探测器的偏置电路与应用。

3.1 光敏电阻的原理与结构

1. 光敏电阻的原理

在暗环境里,光敏电阻的电阻值很高,当本征半导体受到光照时,只要光子能量大于半导体材料的禁带宽度,则价带中的电子吸收一个光子的能量后可跃迁到导带,并在价带中产生一个带正电的空穴。由于光照产生的电子-空穴对增加了半导体材料中载流子的数目,使其电阻率变小,从而造成光敏电阻阻值下降。光照越强,阻值越低。入射光消失后,由光子激发产生的电子-空穴对将逐渐复合,光敏电阻的阻值会逐渐恢复原值。

图 3-1 所示是光敏电阻的原理图与电路符号。

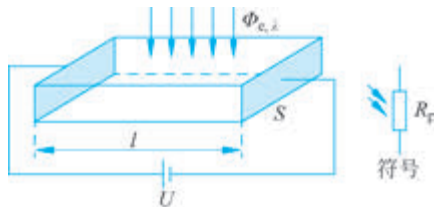


图 3-1 光敏电阻的原理图与电路符号



第 22 集
微课视频



图 3-1
动态效果

光敏电阻两电极加上一定电压,回路中便有了电流即亮电流 I 。对于本征半导体,当入射光波的能量大于半导体禁带宽度时,价带电子吸收光子能量从而产生光电子-空穴对,电子-空穴对在外电场作用下就会产生光电流 I_p ,回路亮电流就会随光强的增加而变大,从而达到光电转换的目的。

光敏电阻没有极性,使用时既可以加直流电压,也可以加交流电压。对于光敏电阻来讲,电流分为暗电流 I_d 、光电流 I_p 和亮电流 I 。电导分为暗电导 G_d 、光电导 G_p 和亮电导 G ,其关系为 $I = I_d + I_p$ 和 $G = G_d + G_p$ 。由于无光照时电导率很小,暗电流几乎为零,通常有亮电流近似等于光电流。

2. 光敏电阻的结构

光照射下光电流 I_p 与极间长度 l 的平方成反比,为了提高光敏电阻的光电导灵敏度,要尽可能地缩短光敏电阻两极间的距离。因此,将光电导探测器光敏面做成蛇形,电极做成梳状。这样的结构设计既可以保证有较大的受光表面,也可以减小电极间的距离 l ,从而可减少极间电子渡越时间,有利于提高灵敏度。光敏电阻结构示意图如图 3-2 所示。

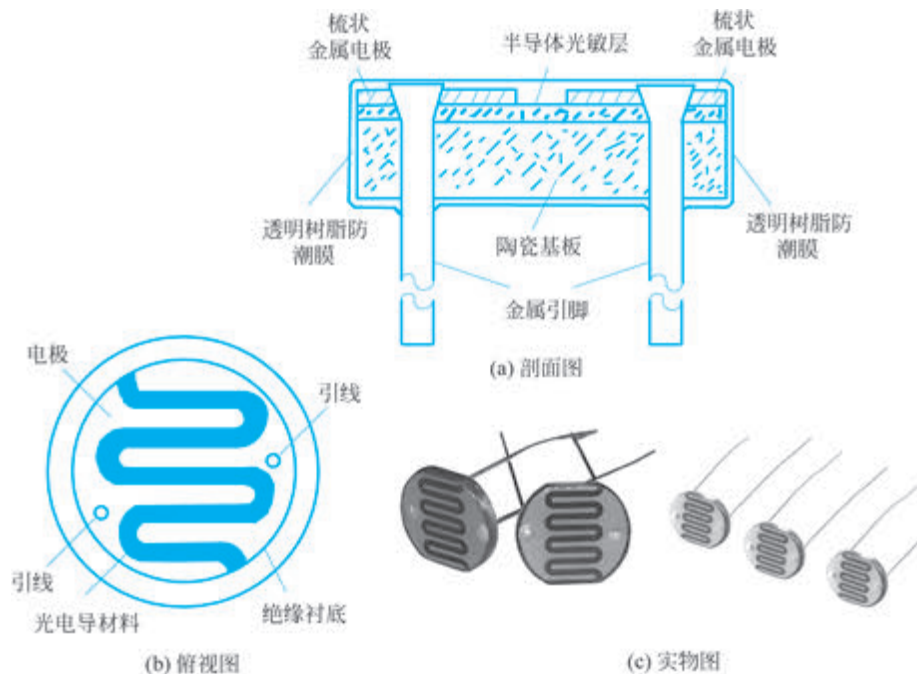


图 3-2 光敏电阻结构示意图

图 3-2(a)所示为光敏电阻的剖面图,在顶部有两片呈梳状的金属电极,且两片金属电极的梳齿间隙里露出半导体光敏层(实际上是通过涂抹、喷涂及烧结等方式,在陶瓷基板上形成的一层很薄的半导体光敏层),下面是陶瓷基板,两侧是两只金属引脚。在整个结构的外部由一层透明树脂防潮膜包裹着,起到透光、防潮及加固的作用。图 3-2(b)所示是光敏电阻的俯视图,可以看到光敏面被做成了蛇形,两端接有电极引线。光敏电阻的实物图如图 3-2(c)所示。



图 3-2
动态效果

3.2 光敏电阻的基本特性参数

光敏电阻的基本特性参数包含光电导增益、光电特性、响应时间、光谱特性、伏安特性与噪声特性等。

1. 光电导增益

光电导增益(Photoconductive Gain)描述在光作用下回路中电流的增强能力。定义为光电导材料中每产生一个光生载流子而在回路中所产生的载流子数,也即单位时间内流过回路横截面的载流子数与光生载流子数之比称为光电导增益,用 M 表示。假设辐通量 $\Phi_{e,\lambda}$ 入射到 N 型半导体上,频率为 ν ,量子效率为 η ,有

$$M = \frac{I_p/e}{\eta\Phi_{e,\lambda}/h\nu} \quad (3-1)$$

将式(2-54)代入式(3-1)有

$$M = \mu_n \tau_n \frac{U}{l^2} \quad (3-2)$$

由此可见,光电导增益与光电导材料上所加电压成正比,与材料长度平方成反比,减小材料长度可以提高增益。

光电导增益也可以表示为光生载流子平均寿命 τ_n 与载流子渡越时间 τ_t 之比,即

$$M = \frac{\tau_n}{\tau_t} \quad (3-3)$$

图 3-1 所示载流子渡越时间为

$$\tau_t = \frac{l}{\mu_n (U/l)} = \frac{l^2}{\mu_n U} \quad (3-4)$$

则有光电导增益与式(3-2)相同。

同理可得 P 型半导体和本征半导体的增益表达式为

$$M = \mu_p \tau_p \frac{U}{l^2} (P \text{ 型})$$

$$M = (\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p) \frac{U}{l^2} (\text{本征})$$

当 $M=1$ 时,光生载流子平均寿命刚好等于它在电极间的渡越时间,每产生一个光电子对外回路电流正好提供一个电子的电荷。当 $M<1$ 时,载流子的平均寿命小于渡越时间,显然每个光电子对外回路电流的贡献将小于一个电子的电荷 e 。当 $M>1$ 时,光电子渡越完毕,但平均寿命还未中止。这种现象可以解释为:光生电子向正极运动,空穴向负极移动,空穴在移动过程中很容易被半导体内晶体缺陷和杂质形成的陷阱所俘获。因此当光电子在阳极消失时,空穴仍留在体内,它将负极的电子感应到半导体中来,感应到体内的电子又在电场中运动到正极,如此循环,直到正电中心(俘获的空穴)消失。显然,这种效应相当于一个光子激发,可以有多个电子相继通过电极,因而在外回路对总的光电流贡献多于一个电子,相当于光电流被放大。 M 与器件的材料、结构尺寸及外加偏压有关。光电导探测器在正常工作电压范围内,通过适当地设计,一般可使其光电导增益 $M>1$,甚至远大于 1。对于光



第 23 集
微课视频

生载流子平均寿命长、迁移率大的光电导材料,极间距离小的光电导探测器, M 可达几千。目前,已研制出一种夹层型光敏电阻,它的电极间距只有 $15\mu\text{m}$,在电场强度为 900V/cm 和 11x 照度下其增益可达 10^8 。但是,如果极间距离变小而使受光面太小,对光探测也是不利的。

2. 光电特性

在黑暗的室温条件下,由于热激发产生的载流子使光敏电阻具有一定的电导,该电导称为暗电导(Dark Conduction),其倒数为暗电阻,一般的暗电导值都很小(或暗电阻值都很大),例如硫化镉材料的 GM20539 型光敏电阻暗电阻大于 $8\text{M}\Omega$ 。当有光照射在光敏电阻上时,它的电导将变大,这时的电导称为光电导(Photoconduction)。一般的光电导值都很大(或光电阻值都很小),例如 GM20539 型光敏电阻在 10x 光照下的光电阻为 $50\text{k}\Omega$ 。光敏电阻电导随着光照量变化而变化的特性称为光敏电阻的光电特性。显然,光敏电阻的暗电阻值越大越好,而光电阻越小越好,也就是说暗电流要小,光电流要大,这样光敏电阻的灵敏度就高。

强光照射时,光电导探测器的光电特性可以表示为

$$I_p = S_g U^a E_v^\gamma \quad (3-5)$$

式中, S_g 为光电导灵敏度(Photoconductive Sensitivity),与光电导探测器材料有关; U 为光电导探测器两端的电压; E_v 为光照度; I_p 为光电流,即光敏电阻两端加上一定电压后,亮电流 I 与暗电流 I_d 之差; a 为电压指数,它与光电导材料和电极材料之间的接触有关,欧姆接触时, $a=1$,非欧姆接触时, $a=1.1\sim 1.2$; γ 为光照指数(Light Index),它与材料和入射光照强弱有关,在弱光照($10^{-1}\sim 10^1\text{x}$)时, $\gamma=1$,称为线性光电导,在强光照时, $\gamma=0.5$,则为非线性光电导。

在欧姆接触、弱光照射的情况下,式(3-5)可表示为

$$I_p = S_g U E_v \quad (3-6)$$

从式(3-6)得出,弱光照射下,光电流 I_p 与光照度 E_v 具有良好的线性关系。

如图 3-3(a)所示的典型 CdS 光敏电阻的光电特性曲线反映了流过光敏电阻的电流 I_p 与入射光照度 E_v 间的变化关系。由图可见,它是由线性渐变到非线性的。因此,不适宜做检测元件,这是光敏电阻的缺点之一,在自动控制中它用作开关式光电传感器。

在实际使用时,常常将光敏电阻的光电特性曲线改用如图 3-3(b)所示的线性直角坐标系中光敏电阻的阻值 R 与入射光照度 E_v 的关系曲线,而图 3-3(c)所示为对数直角坐标系下的阻值 R 与入射光照度 E_v 的关系曲线。从图 3-3(b)可见,随着光照的增加,阻值迅速下降,然后逐渐趋向饱和。但在对数坐标中的某一段照度范围内,电阻与照度特性曲线基本上

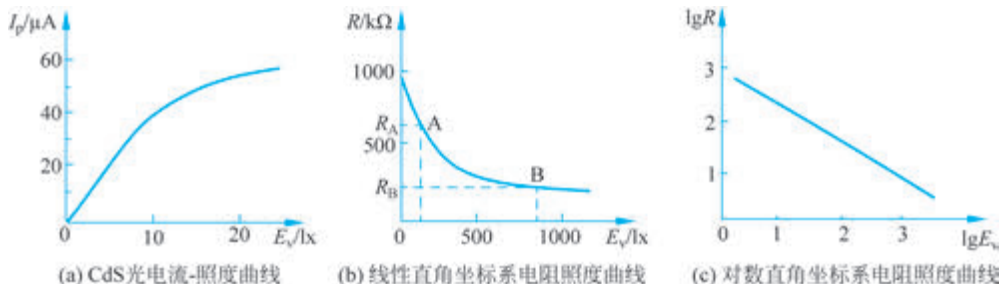


图 3-3 光敏电阻的光电特性

是直线,即 γ 值保持不变,因此 γ 值也可说成是对数坐标中电阻与照度特性曲线的斜率,即

$$\gamma = \frac{\lg R_A - \lg R_B}{\lg E_{vA} - \lg E_{vB}} \quad (3-7)$$

式中, R_A 、 R_B 为 E_{vA} 和 E_{vB} 所对应的光敏电阻阻值。

一般来说,对于同一光敏电阻, γ 值保持不变; γ 值大的光敏电阻,其暗电阻也高。如果同一光敏电阻在某一照度范围内通过几个照度测量点所计算出的几个 γ 值相同,就说明该光敏电阻线性较好(完全线性是不可能的)。显然,光敏电阻的 γ 值反映了在光照度范围变化不大或照度的绝对值较大甚至光敏电阻接近饱和情况下的阻值与光照度的关系。因此,定义光敏电阻 γ 值时必须说明其照度范围,否则 γ 值没有任何意义。例如,GM20539 型光敏电阻在 $10 \sim 100\text{lx}$ 时 $\gamma = 0.8$ 。

3. 光电导灵敏度

通常情况下,光敏电阻工作在弱光条件下,可以取电压指数 $a = 1$ 和照度指数 $\gamma = 1$ 。式(3-6)改写为

$$I_p = S_g U E_v = G_p U \quad (3-8)$$

式中, $G_p = S_g E_v$ 称为光电导,单位为 S(西门子)。按灵敏度定义有

$$S_g = \frac{G_p}{E_v} \text{ 或 } \left(\frac{G_p}{E_e} \right) \quad \text{或} \quad S_g = \frac{G_p}{\Phi_v} \left(\text{或 } \frac{G_p}{\Phi_e} \right) \quad (3-9)$$

式中, S_g 称为光电导灵敏度。用光度量单位时,其单位为 S/lx 或 S/lm ; 用辐射度量单位时,其单位为 $\text{S}/(\mu\text{W}/\text{cm}^2)$ 或 $\text{S}/\mu\text{W}$ 。

4. 温度特性

光敏电阻为多数载流子导电的光电器件,具有复杂的温度特性。光敏电阻的温度特性与光电导材料有着密切的关系,不同材料的光敏电阻有着不同的温度特性。光敏电阻的温度特性很复杂,在一定的照度下,亮电阻的温度系数 α 有正有负,表示为

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} \quad (3-10)$$

式中, R_1 、 R_2 为与温度 T_1 、 T_2 相对应的亮电阻。

一般来说,材料的禁带宽度越窄则对长波越敏感,但禁带很窄时,半导体中热激发也会使自由载流子浓度增加,复合运动加快,灵敏度降低。因此,可采取冷却灵敏面的办法来提高灵敏度。

图 3-4 所示为典型 CdS(虚线)与 CdSe(实线)光敏电阻在不同照度下的温度特性曲线。以室温(25°C)的相对光电导率为 100% ,观测光敏电阻的相对光电导率随温度的变化关系,可以看出光敏电阻的相对光电导率随温度的升高而下降,且随温度的变化率较大。因此,在温度变化大的情况下,应采取制冷措施。降低或控制光敏电阻的工作温度是提高光敏电阻工作稳定性的有效方法。

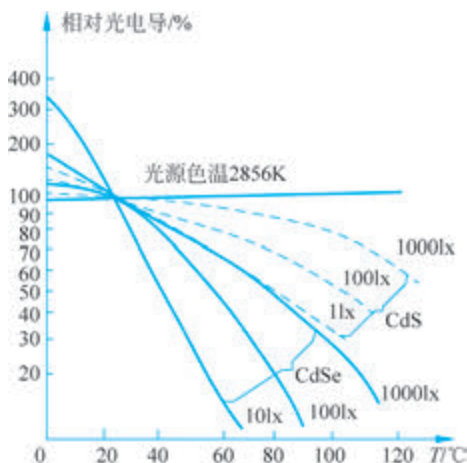


图 3-4 光敏电阻在不同照度下的温度特性曲线

5. 响应时间

在忽略外电路时间常量的影响时,光敏电阻的响应时间等于光生载流子的平均寿命。大多数常用的光敏电阻,其响应时间都比较大。例如,CdS 光敏电阻的响应时间为几十毫秒到几秒; CdSe 的响应时间为几毫秒到几十毫秒; PbS 的响应时间为几百微秒。因此,它们基本不适于窄脉冲光信号的检测。但近年来发展的采用平面结构和同轴结构的快速光电导器件,其上升时间也可达到几十皮秒量级。而且,光敏电阻总的响应时间由探测器本身响应时间决定,与外接负载电阻大小无关。CdSe 在照度小于 10^3 lx , CdSe 光敏电阻的响应时间

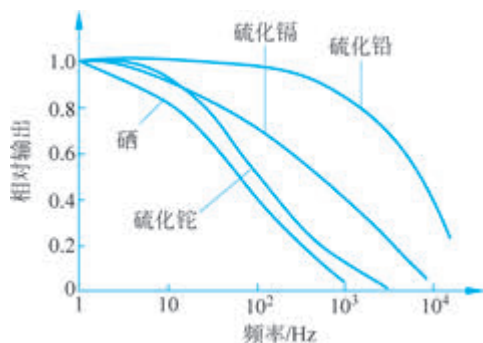


图 3-5 几种光敏电阻的频率响应曲线

平均值为 5.4 ms ,与外接负载电阻的阻值无关。

线性光敏电阻的响应时间由半导体材料内部的微观结构决定;探测器可等效为恒流源和光电电阻的并联;外接输出电路时,其总的响应时间与探测器的响应时间和光电检测电路的时间常数两个参数有关,一般应用中可近似取为探测器的响应时间。

当光敏电阻接收交变调制光时,随着调制光频率的增加,其输出会减小。图 3-5 表示出了几种光敏电阻的频率响应曲线。可见,光敏

6. 光谱特性

对于不同波长的入射光,光敏电阻的光谱特性是不相同的。光敏电阻的光谱响应主要与光敏材料禁带宽度、杂质电离能、材料掺杂比和掺杂浓度等因素有关。光谱特性多用相对灵敏度与波长的关系曲线表示。从这种曲线中可以直接看出灵敏范围、峰值波长位置和各波长下灵敏度的相对关系。每种材料都有特定的光谱响应波段并且可以运用到不同领域。图 3-6 和图 3-7 分别给出了可见光区和红外区灵敏度的几种光敏电阻的光谱特性曲线。从图中看出,硫化镉的光谱响应很接近人眼的视觉响应,峰值在可见光区域,峰值波长为 $515 \sim 600 \text{ nm}$,接近 555 nm ,可用于与人眼有关的仪器,如照相机、照度计、光度计等,加滤光片进行修正;而硫化铅的光谱响应范围为 $0.4 \sim 2.8 \mu\text{m}$,峰值在红外区域,常用于火点探测与火灾预警系统。因此,在选用光敏电阻时应当把元件和光源的种类结合起来考虑,才能获得满意的结果。目前研制的一种 GaN 紫外光电导探测器,其光谱响应范围为 $200 \sim 365 \text{ nm}$,覆盖了地球上大气臭氧层吸收光谱区($230 \sim 280 \text{ nm}$),非常适合于作为太阳盲区紫外光探测器,如火焰燃烧监视器、火箭羽烟探测器等。

常用的光敏电阻组合起来后可以覆盖从紫外、可见光、近红外、中红外延伸至极远红外波段的光谱响应范围。

7. 伏安特性

光敏电阻的本质是电阻,符合欧姆定律,因此它具有与普通电阻相似的伏安特性(Voltage-Current Characteristic),但是它的

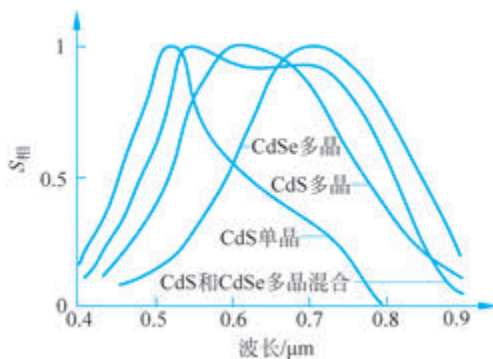


图 3-6 几种可见光区相对灵敏度-波长曲线

电阻值是随入射光照度而变化的。把不同光照下,加在光敏电阻两端的电压 U 与流过它的电流 I_p 的关系曲线,称为光敏电阻的伏安特性。如图 3-8 所示为典型 CdS 光敏电阻的伏安特性曲线。图中的虚线为允许功耗线或额定功耗线。使用光敏电阻时,应不使电阻的实际功耗超过额定值。在设计光敏电阻变换电路时,应使光敏电阻的工作电压或电流控制在额定功耗线内。从图上来说,就是不能使静态工作点居于虚线以内的区域。按这一要求在设计负载电阻时,应不使负载线与额定功耗线相交。

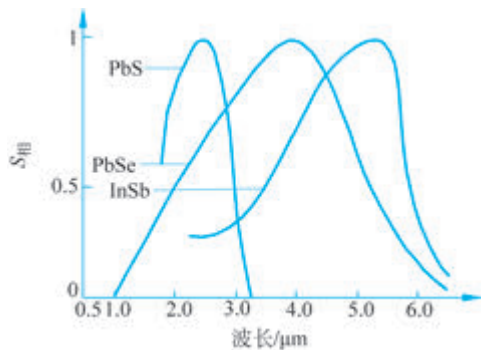


图 3-7 几种红外区相对灵敏度-波长曲线

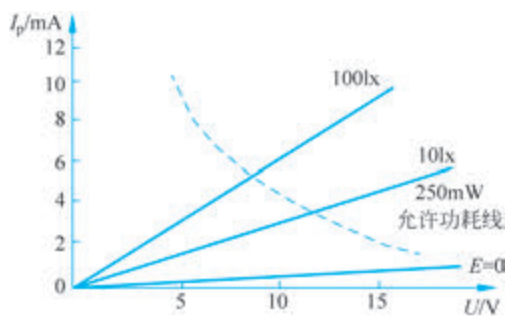


图 3-8 典型 CdS 光敏电阻的伏安特性曲线

8. 噪声特性

光敏电阻的主要噪声有热噪声、产生-复合噪声和低频噪声(或称 $1/f$ 噪声)。总的均方噪声电流或噪声功率为

$$\overline{i_n^2} = \overline{i_{nj}^2} + \overline{i_{ngr}^2} + \overline{i_{nf}^2} = \frac{4kT\Delta f}{R} + 4eMI\Delta f + \frac{cI^\alpha \Delta f}{f^\beta} \quad (3-11)$$

式中, I 为暗电流 I_d 、信号光电流 I_p 和背景光电流 I_b 之和; 对于工作于低温的光电导探测器, 式中的 I 为信号光电流 I_p 和背景光电流 I_b 之和。

对于不同的器件, 三种噪声的影响不同: 在几百赫兹以内以电流噪声为主; 随着频率的升高, 产生-复合噪声变得显著; 频率很高时, 以热噪声为主。光敏电阻的噪声与调制频率的关系如图 3-9 所示。

在红外探测中, 为了减小噪声, 一般采用光调制技术且将频率取得高一些, 一般在 $800 \sim 1000\text{Hz}$ 的范围内时可以消除 $1/f$ 噪声和产生-复合噪声的影响。还可采用制冷装置降低器件的温度, 这不仅减小热噪声, 而且也可降低产生-复合噪声, 提高比探测率。此外, 还可设计合理的偏置电路, 选择最佳偏置电流, 使探测器运用在最佳状态。

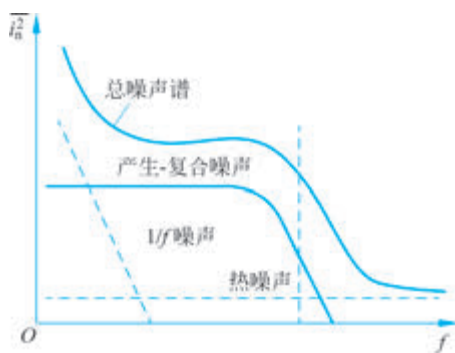


图 3-9 光敏电阻的噪声与调制频率的关系

3.3 典型光敏电阻

光敏电阻有多种类型, 其性能和要求的工作环境有很大差异, 主要是因所用的材料不同造成的。常用的光电导材料的特性参数如表 3-1 所示。



第 24 集
微课视频

表 3-1 常用的光电导材料的特性参数

光电导器件材料	禁带宽度/eV	光谱响应范围/nm	峰值波长/nm	光电导器件材料	禁带宽度/eV	光谱响应范围/nm	峰值波长/nm
硫化镉(CdS)	2.45	400~800	515~550	硅(Si)	1.12	450~1100	850
硒化镉(CdSe)	1.74	680~750	720~730	锗(Ge)	0.66	550~1800	1540
硫化铅(PbS)	0.4	500~3000	2000	铋化锑(InSb)	0.16	600~7000	5500
碲化铅(PbTe)	0.31	600~4500	2200	砷化锑(InAs)	0.33	1000~4000	3500
硒化铅(PbSe)	0.25	700~5800	4000				

光敏电阻的型号命名分为三部分,第一部分用字母表示主称,第二部分用数字表示用途或特征,第三部分用数字表示产品序号。各部分的含义如表 3-2 所示。

表 3-2 光敏电阻型号的含义

第一部分：主称		第二部分：用途或特征		第三部分：序号	例 子
字母	含义	含义	数字		
GM	光敏电阻	特殊	0	用数字表示序号,以区别该电阻器的外形尺寸及性能指标	GM5516(可见光敏电阻器) 其中,M表示敏感电阻器;G表示光敏电阻器;5表示可见光;516表示序号
		紫外光	1 2 3		
		可见光	4 5 6		
		红外光	7 8 9		

按照工作机理分类,光敏电阻可以分为本征型和掺杂型(非本征型)两种类型。通常,属于本征型的有硫化镉(CdS)、碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)、铋化锑(InSb)和硫化铅(PbS)光电导探测器等。

本征型光敏电阻入射光子的能量大于或等于半导体的禁带宽度时能激发电子-空穴对,它的截止波长为

$$\lambda_0 = \frac{1.24}{E_g} \mu\text{m} \tag{3-12}$$

目前,本征光敏电阻的长波限为 $10\sim14\mu\text{m}$ 。本征光敏电阻一般在室温下工作,适用于可见光和近红外辐射探测。

1. 硫化镉(CdS)光敏电阻

CdS 光敏电阻是最常见的光敏电阻,它体积小,可靠性好,而且它的光谱响应特性最接近人眼光谱光视效率,它在可见光波段范围内的灵敏度最高,因此,被广泛地应用于光电和光线控制,以及照相机的自动测光、光控音乐、工业控制和电子玩具等。CdS 光敏电阻常采用蒸发、烧结或黏结的方法制备,在制备过程中把 CdS 和 CdSe 按一定的比例制配成 Cd(S, Se)光敏电阻材料;或者在 CdS 中掺入微量杂质铜(Cu)和氯(Cl),使它既具有本征光电导器件的响应特性,又具有杂质光电导器件的响应特性,可使 CdS 光敏电阻的光谱响应向红外谱区延长,峰值响应波长也变长。

CdS 光敏电阻的峰值响应波长为 $0.52\mu\text{m}$,CdSe 光敏电阻的峰值响应波长为 $0.72\mu\text{m}$,一般调整 S 和 Se 的比例,可使 Cd(S, Se)光敏电阻的峰值响应波长控制在 $0.52\sim0.72\mu\text{m}$ 的范围内。

目前,光敏电阻分为环氧树脂封装和金属封装两款,同属于导线型(DIP 型),环氧树脂封装按陶瓷基板直径分为 $\phi 3\text{mm}$ 、 $\phi 4\text{mm}$ 、 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 7\text{mm}$ 、 $\phi 11\text{mm}$ 、 $\phi 12\text{mm}$ 、 $\phi 20\text{mm}$ 、 $\phi 25\text{mm}$ 。表 3-3 所示为 $\phi 5$ 系列 CdS 光敏电阻的特性参数。

表 3-3 $\phi 5$ 系列 CdS 光敏电阻的特性参数

型 号	光谱响 应范围 / μm	峰值 波长 / μm	允许 功耗 / mW	最高工 作电压 / V	响 应 时 间		光 电 特 性	
					t_r/ms	t_f/ms	暗电阻值 / $\text{M}\Omega$	亮电阻值 / $\text{k}\Omega$
GM5516	0.4~0.8	0.54	90	150	30	30	0.5	5~10
GM5528	0.4~0.8	0.54	100	150	20	30	0.6	10~20
GM5537-1	0.4~0.8	0.54	100	150	20	30	0.6	20~30
GM5537-2	0.4~0.8	0.54	100	150	20	30	0.7	30~50
GM5539	0.4~0.8	0.54	100	150	20	30	0.8	50~100
GM5549	0.4~0.8	0.54	100	150	20	30	0.9	100~200

CdS 的禁带宽度高达 2.4eV ,故可以在 $-20\sim 70^\circ\text{C}$ 的范围内工作,当温度上升,光灵敏度减小,在低照度时特别明显。

以前大多使用 CdS 光敏电阻,由于有害物质 Cd(镉)严重超标,使得出口产品因镉超标不断被出口国通报或召回,且由于 CdS 的一致性较差,给生产和使用带来不便。环保光敏电阻应运而生,环保光敏电阻又叫作环境光探测器,是适用于欧盟 RoHS^① 指令的光敏电阻。它可以在不改变原电路的情况下,直接替代 CdS 光敏电阻,同时具有很好的抗红外功能,可适用于太阳能灯、小夜灯等节能设备。

2. 硫化铅(PbS)光敏电阻

PbS 光敏电阻是近红外波段最灵敏的光电导器件。PbS 光敏电阻常用真空蒸发或化学沉积的方法制备,光电导材料是厚度为微米数量级的多晶薄膜或单晶硅薄膜。由于 PbS 光敏电阻在 $2\mu\text{m}$ 附近的红外辐射的探测灵敏度很高,因此,常用于红外测温、红外跟踪、红外制导、红外预警、红外天文观察等领域。

PbS 光敏电阻的光谱响应和比探测率等特性与工作温度有关,随着工作温度的降低其峰值响应波长和长波限将向长波方向延伸,同时比探测率 D^* 增加。例如,室温下的 PbS 光敏电阻光谱响应范围为 $1\sim 3.5\mu\text{m}$,峰值波长 $2.4\mu\text{m}$,峰值比探测率 D^* 高达 $1\times 10^{11}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。当温度降低到 195K 时,光谱响应范围为 $1\sim 4\mu\text{m}$,峰值响应波长移到 $2.8\mu\text{m}$,峰值波长的比探测率 D^* 也增加到 $2\times 10^{11}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。表 3-4 所示是 Judson 公司的 J13 系列的部分 PbS 光敏电阻的特性参数。

表 3-4 Judson 公司的 J13 系列的部分 PbS 光敏电阻的特性参数

类型	序号	工作 面积 / mm^2	峰值波长 $\lambda_p/\mu\text{m}$	$D^*(\lambda_p, 750, 1)$ / $(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1})$	黑体 D^* (500K, 750, 1) (min)/ $(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1})$	灵敏度@ $\lambda_p(\text{min})$ / $(\text{V}\cdot\text{W}^{-1})$	电阻 / $\text{M}\Omega$	时间常数 / μs	工作 温度 / K
PS3-0-01	1100012	1×1	2.5	7.7×10^{10}	7.7×10^8	3×10^5	0.5~2.5	150~350	298
PS3-0-02	1100020	2×2				1.5×10^5			
PS3-0-03	1100025	3×3				1×10^5			

① RoHS: 是 Restriction of Hazardous Substances 的英文缩写,是一种标准,全称为“关于限制在电子电器设备中使用某些有害成分的指令”。RoHS 一共列出 6 种有害物质,包括铅 Pb、镉 Cd、汞 Hg、六价铬 Cr^{6+} 、多溴二苯醚 PBDE、多溴联苯 PBB。

J13 系列 PbS 光敏电阻的光谱响应范围为 $1\sim 3.5\mu\text{m}$,峰值响应波长取决于操作温度。

3. 碲化铟(InSb)光敏电阻

InSb 光敏电阻是 $3\sim 5\mu\text{m}$ 光谱范围内的主要探测器件之一。InSb 光敏电阻由单晶材料制备,制造工艺比较成熟,经过切片、磨片、抛光后的单晶材料,再采用腐蚀的方法减薄到所需要的厚度,便于制成单晶 InSb 光敏电阻。光敏面的尺寸为 $0.5\text{mm}\times 0.5\text{mm}\sim 8\text{mm}\times 8\text{mm}$ 。大光敏面的器件由于不能做得很薄,其探测率较低。InSb 材料不仅适用于制造单元探测器件,也适宜制造阵列红外探测器件。

InSb 光敏电阻在室温下的长波限可达 $7.5\mu\text{m}$,峰值波长在 $6\mu\text{m}$ 附近,比探测率 D^* 约为 $1\times 10^{10}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。当温度降低到 77K(液氮)时,其长波长由 $7.5\mu\text{m}$ 缩短到 $5.5\mu\text{m}$,峰值波长也将移至 $5\mu\text{m}$,恰为大气的窗口范围,峰值比探测率 D^* 升高到 $2\times 10^{11}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。表 3-5 所示是 InSb 在不同温度下的性能。

表 3-5 InSb 在不同温度下的性能

参数 温度/K	光谱范围 / μm	峰值波长 / μm	响应时间 / μs	灵敏度 / $(\text{A}\cdot\text{W}^{-1})$	比探测率 $D^*/(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1})$	暗电阻 / $\text{k}\Omega$
300	$1\sim 7.5$	6	0.1	$0.05\sim 0.2$	1×10^{10}	0.05
77	$1\sim 5.5$	5	0.3	$1.0\sim 3.5$	$(1\sim 2)\times 10^{11}$	10

4. 碲镉汞(HgCdTe)光敏电阻

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 系列光敏电阻件是目前所有红外探测器中性能最优良最有前途的探测器件,尤其是对于 $4\sim 8\mu\text{m}$ 大气窗口波段辐射的探测更为重要。常用于激光雷达、激光测距、光电制导和光通信等领域。

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 系列光敏电阻是由 HgTe 和 CdTe 两种材料的晶体混合制造的,其中 x 表示 Cd 元素含量的组分。在制造混合晶体时选用不同 Cd 的组分 x ,可以得到不同的禁带宽度 E_g ,便可以制造出不同波长响应范围的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 探测器件。

一般 x 是 Cd 含量组分,变化范围为 $0.18\sim 0.4$,长波限的范围为 $3\sim 30\mu\text{m}$ 。其中当 $x=0.2$ 时,光谱响应的范围为 $8\sim 14\mu\text{m}$;当 $x=0.28$ 时,光谱响应的范围为 $3\sim 5\mu\text{m}$;当 $x=0.39$ 时,光谱响应的范围为 $1\sim 3\mu\text{m}$ 。表 3-6 所示是碲镉汞探测器的主要参数。

表 3-6 碲镉汞探测器的主要参数

波段	类型	比探测率 / $(\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1})$	响应 时间	暗电阻	灵敏度 / $(\text{V}\cdot\text{W}^{-1})$	量子效率	工作 温度/K
$3\sim 5(\mu\text{m})$ $x=0.25\sim 0.4$	PC	$D_{\lambda p}^*=1\times 10^9$ $\lambda_p=5\mu\text{m}, 300\text{K}$	400ns	$<10\Omega$	30	$>40\%$	77、200、300
$8\sim 14(\mu\text{m})$ $x=0.2$	PC	$D_{\lambda p}^*=2\times 10^{10}$ $\lambda_p=10\mu\text{m}$	$1\mu\text{s}$	$20\sim 400\Omega/\text{方}$	10 000	$>70\%$	77

Judson 公司的 J15 系列探测器是 HgCdTe 光敏电阻。例如,J15D 系列探测器是工作波长限为 $2\sim 26\mu\text{m}$ 的 HgCdTe 光敏电阻,峰值波长取决于合金的比例。所有的 J15D 系列探测器适用于低温操作,工作温度为 77K。J15TE 系列短波探测器主要用于工业和军事应用,当无液态氮冷却时,在 $2\sim 5\mu\text{m}$ 波长段敏感性好。J15TE 系列长波探测器主要针对

10.6 μm 的 CO_2 激光探测器和红外光谱。

人物介绍

褚君浩(1945年3月20日—), 红外物理学家, 中国科学院院士。长期从事红外光电子材料和器件的研究, 开展了用于红外探测器的窄禁带半导体碲镉汞(HgCdTe)和铁电薄膜的材料物理和器件研究, 提出了 HgCdTe 的禁带宽度关系式, 国际上称为 CXT 公式, 被认为与实验结果最符合。他发现 HgCdTe 的基本光电跃迁特性, 确定了材料器件的光电判别依据, 开展铁电薄膜材料物理和非制冷红外探测器研究, 研制成功 PZT 和 BST 铁电薄膜非制冷红外探测器并实现了热成像。



褚君浩

5. 碲锡铅(PbSnTe)光敏电阻

$\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ 系列光敏电阻是由 PbTe 和 SnTe 两种材料的混合晶体制备的, 其中 x 是 Sn 的组分含量。同样, 光敏电阻中的 Sn 的组分含量不同, 它的禁带宽度也不同, 随着组分的改变, 它的峰值波长及长波限也随之改变, 但它的禁带宽度变化范围不大, 因此只能制造出波长限大于 2.5 μm 的探测器。这类探测器目前能工作在 8~10 μm 波段, 由于探测率较低, 应用不广泛。

$\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ 系列器件中最常用的是 $\text{Pb}_{0.83}\text{Sn}_{0.17}\text{Te}$ 探测器, 它在 77K 条件下工作时峰值波长与 CO_2 激光波长 10.6 μm 非常吻合, 长波限为 11 μm , D^* 约为 $6.6 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 响应时间约为 10^{-8} s ; 当冷却到 4.2K 时, D^* 值可提高两个数量级, 约为 $1.7 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 长波限延伸至 15 μm 。



第 25 集
微课视频

3.4 光敏电阻的偏置电路

光敏电阻的阻值或电导随入射辐射量的变化而改变, 因此, 可以用光敏电阻将光学信息变为电学信息。但是, 电阻(或电导)值的变化信息不能直接被人们所接受, 需将电阻(或电导)值的变化转变为电流或电压信号输出, 完成这个转换工作的电路称为光敏电阻的偏置电路或变换电路。

3.4.1 光敏电阻的微变等效电路

图 3-10 所示为光敏电阻基本偏置电路。其微变等效电路(Micro-variation Equivalent Circuit)如图 3-11 所示。 R 、 C_p 分别为光敏电阻的等效内阻和等效电容。光敏电阻受光照时亮电阻比无光照射时的暗电阻小得多, R 实际就是亮电阻值。

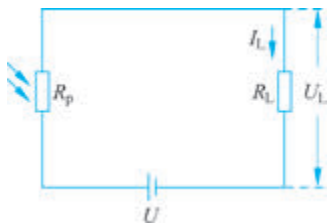


图 3-10 基本偏置电路

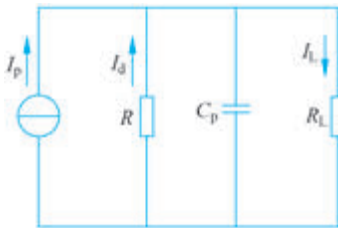


图 3-11 光敏电阻微变等效电路

3.4.2 基本偏置电路

如图 3-10 所示的基本偏置电路中,设在某照度 E_v 下,光敏电阻的阻值为 R_p ,电导为 g ,则流过偏置电阻 R_L 的电流为

$$I_L = \frac{U}{R_p + R_L} \quad (3-13)$$

用微变量表示,上式变为

$$dI_L = -\frac{U}{(R_p + R_L)^2} dR_p$$

而 $dR_p = d(1/g) = (-1/g^2)dg$, $dg = S_g dE_v$, 因此偏置电阻 R_L 两端的电流变化量为

$$dI_L = \frac{UR_p^2 S_g}{(R_p + R_L)^2} dE_v \quad (3-14)$$

偏置电阻 R_L 两端的输出电压的变化量为

$$dU_L = dI_L \cdot R_L = \frac{UR_p^2 R_L S_g}{(R_p + R_L)^2} dE_v \quad (3-15)$$

可以看出,当电路参数确定后,输出电压信号的变化量与弱辐射入射照度 dE_v 呈线性关系。

3.4.3 恒流偏置电路

当 $R_L \gg R_p$ 时,有 $dI_L = S_g U \left(\frac{R_p}{R_L} \right)^2 dE_v$, 流过光敏电阻的电流基本不变,此时的偏置电

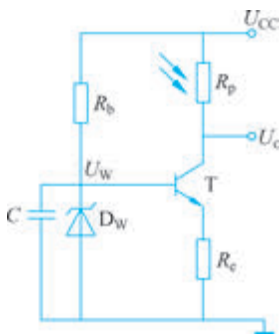


图 3-12 恒流偏置电压

路称为恒流电路。然而,光敏电阻自身的阻值已经很高,在满足恒流偏置的条件下,就难以满足电路输出阻抗的要求,为此,可引入图 3-12 所示的晶体管恒流偏置电路。该电路负载电压与光敏电阻无关,近似保持常数。而且该电路的输出信号电压取决于光敏电阻和负载电阻的比值,与偏置电压成正比;电压信噪比较高,适用于微弱光信号的探测。

稳压管 D_W 用于稳定晶体三极管的基本电压,即 $U_b = U_W$, 流过晶体三极管发射极的电流 I_e 为

$$I_e = \frac{U_W - U_{be}}{R_e} \quad (3-16)$$

式中, U_W 为稳压二极管的稳压值; U_{be} 为三极管发射结电压,在三极管处于放大状态时基本为恒定值; R_e 为发射极固定电阻。

因此,发射极的电流 I_e 为恒定电流。三极管在放大状态下集电极电流与发射极电流近似相等,所以流过光敏电阻的电流为恒流。

在晶体管恒流偏置电路中,输出电压为

$$U_o = U_{CC} - I_e R_p \quad (3-17)$$

对上式求微分有

$$dU_o = -I_e dR_p \quad (3-18)$$

将 $dR_p = -S_g R_p^2 dE_v$ 代入上式,可以得到

$$dU_o = \frac{U_w - U_{be}}{R_e} R_p^2 S_g dE_v \quad (3-19)$$

或

$$u_o \approx \frac{U_w}{R_e} R_p^2 S_g e_v \quad (3-20)$$

显然,恒流偏置电路中光敏电阻的电压灵敏度 S_u 为

$$S_u = \frac{dU_o}{dE_v} = \frac{U_w}{R_e} R_p^2 S_g \quad (3-21)$$

3.4.4 恒压偏置电路

恒压偏置电路是指当 $R_L \ll R_p$ 时,即 $dU_L = S_g R_L U dE_v$ 加在光敏电阻上的电压基本不变。利用晶体三极管很容易构成光敏电阻的恒压偏置电路。如图 3-13 所示为典型的光敏电阻恒压偏置电路。

光敏电阻在恒压偏置电路的情况下输出的电流 I_p 与处于放大状态的三极管发射极电流 I_e 近似相等。因此,恒压偏置电路的输出电压为

$$U_o = U_{CC} - I_e R_c \quad (3-22)$$

取微分,则得到输出电压的变化量为

$$dU_o = -dI_e R_c \approx -R_c dI_e \approx -R_c S_g U_w dE_v \quad (3-23)$$

上式说明恒压偏置电路的输出信号电压与光敏电阻的阻值 R 无关,仅取决于电导的相对变化。这一特性在采用光敏电阻的测量仪器中特别重要,在更换光敏电阻时只要使光敏电阻的光电导灵敏度 S_g 保持不变,即可以保持输出信号电压不变。

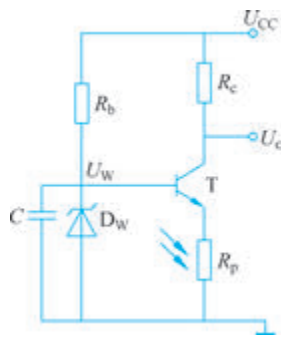


图 3-13 典型的光敏电阻恒压偏置电路



第 26 集
微课视频

3.4.5 恒功率偏置电路

在基本偏置电路中,若负载电阻和光敏电阻值相等,则光敏电阻消耗的功率为

$$P = I^2 R = \left(\frac{U}{R_L + R_p} \right)^2 R_p = \frac{U^2}{4R_p} \quad (3-24)$$

式中, P 为恒定值,故称为恒功率偏置电路。这种电路的特点是负载可获得最大的功率输出。但是,当入射光通量 Φ_1 和 Φ_2 相差几个数量级时,相应的 R_{p1} 和 R_{p2} 亦相差很大,如仍要保持阻抗匹配是困难的。经分析,在 $R_L = (R_{p1} R_{p2})^{1/2}$ 时可以得到最大的 ΔU_L 。

3.5 光敏电阻的应用

光敏电阻可以用在各种自动控制装置和光检测设备中,如生产线上的自动送料、自动门装置、航标灯、路灯、应急自动照明、自动给水停水装置、生产安全装置、烟雾火灾报警装置、照相机的自动调节、电子计算机的输入设备,以及医疗光电脉搏计、心电图等方面。此外,它还广泛应用于电子乐器及家用电器中。

3.5.1 声光自动控制电路

图 3-14 所示为光敏电阻的声光自动控制电路。该电路能够实现在光线较弱有声音时 LED 灯自动亮的功能。白天或光线较强时,光敏电阻阻值较小,两端分压较小,则与非门的 2 脚为低电平。无论有无声音,3 脚始终输出高电平。对于 555 构成的单稳态触发器来说,输入端 2 脚为高电平,无触发信号,输出端 3 脚保持低电平。此时,三极管 T_2 截止,LED 灯不亮。

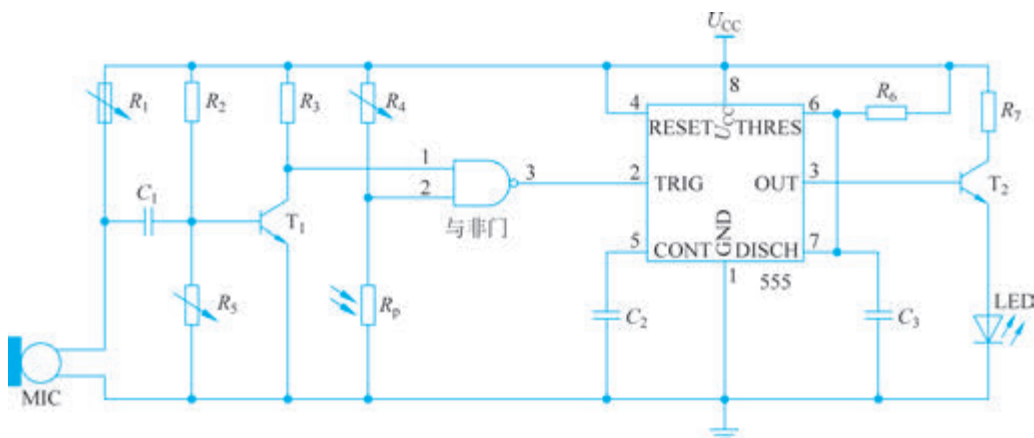


图 3-14 光敏电阻的声光自动控制电路

晚上或光线较弱时,光敏电阻阻值较大,两端分压较大,则与非门的 2 脚为高电平。此时若有声音信号, MIC 的阻值随着声波的振动而改变。经过 R_1 分压后转变为带有直流分量的交流信号。交流信号经 C_1 耦合后去除直流成分,交流负信号成分使三极管开关电路截止,集电极输出高电平,则与非门的 1 脚为高电平。由与非逻辑可知,3 脚输出由高电平向低电平跳变,产生的下降沿触发后续的单稳态触发器,电路进入暂稳态。555 构成的单稳态触发器 2 脚接收到下降沿后,3 脚输出固定脉冲宽度的方波,高电平使三极管 T_2 导通,LED 灯发光。发光时间由方波脉冲宽度控制, $\tau = 1.1(C_3 R_6)$ 。此后一段时间若无声音被 MIC 接收,与非门的 3 脚恢复为高电平,则触发器 3 脚输出低电平,三极管 T_2 截止,LED 灯熄灭。下次再有声音触发时如此循环往复。

3.5.2 照明灯自动控制电路

图 3-15 所示是利用光敏电阻控制的照明灯自动控制电路。该电路由两部分组成: 电

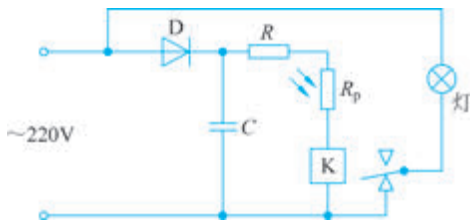


图 3-15 利用光敏电阻控制的照明灯自动控制电路

阻 R 、电容 C 和二极管 D 组成半波整流电路; CdS 光敏电阻 R_p 和限流电阻 R 以及继电器绕组构成的测光与控制电路。照明灯接在继电器常闭触点上,由光控继电器控制灯的点燃和熄灭。晚上光线很暗,CdS 光敏电阻阻值很大,流过继电器的电流很小,使继电器不动作,照明灯接通电源点亮。早上,天渐渐变亮,即照度逐渐



图 3-14
动态效果

增大, CdS 光敏电阻受光照后, 阻值变小, 流过继电器的电流逐渐增大, 当照度达到一定值时, 流过继电器的电流足以使继电器动作, 使其闭合, 常闭触点断开, 照明灯熄灭。

3.5.3 火焰报警电路

图 3-16 所示为采用光敏电阻为探测元件的火焰探测报警器电路图。PbS 光敏电阻的暗电阻的阻值为 $1\text{M}\Omega$, 亮电阻的阻值为 $0.2\text{M}\Omega$ (辐照度 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 下测试), 峰值响应波长为 $2.2\mu\text{m}$, 恰为火焰的峰值辐射光谱。由 U_{CC} 、电阻 R_1 和 R_2 、稳压二极管 D_{W} 和 T_1 构成对光敏电阻 R_{p} 的恒压偏置电路。恒压偏置电路具有更换光敏电阻方便的特点, 只要保证光电导灵敏度 S_{g} 不变, 输出电路的电压灵敏度就不会因为更换光敏电阻的阻值而改变, 从而使前置放大器的输出信号稳定。当被探测物体的温度高于燃点或被点燃发生火灾时, 物体的火焰将发出波长接近于 $2.2\mu\text{m}$ 的红外辐射, 该红外辐射光将被 PbS 光敏电阻 R_{p} 接收, 使 T_1 前置放大器的输出 A 点信号发生变化, 并经电容 C_2 耦合, 发送给由 T_2 、 T_3 组成的高输入阻抗放大器放大。火焰引起的变化信号被放大后发送给中心站放大器, 并由中心站放大器发出火灾报警信号或执行灭火动作 (如喷淋出水或灭火泡沫)。

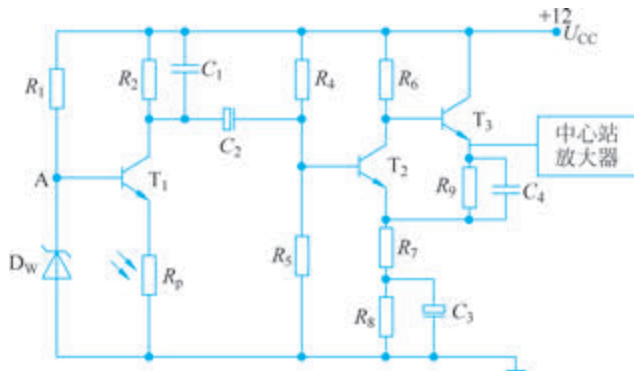


图 3-16 采用光敏电阻为探测元件的火焰探测报警器电路图

3.5.4 照相机自动曝光控制电路

图 3-17 所示为利用光敏电阻构成的照相机自动曝光控制与光路控制电路, 其中照相机自动曝光控制电路也称为照相机电子快门。电子快门的测光器件常采用与人眼光谱响应接近的硫化镉光敏电阻。照相机曝光控制电路是由充电电路 (光敏电阻 R 、开关和电容 C 构成)、时间检出电路 (电压比较器)、驱动放大电路 (三极管 T 构成) 和电磁铁 M 带动的开门叶片 (执行单元) 等组成。景物经光学镜头成像, 经过后帘、前帘后到图像传感器 CCD/CMOS 采集, 其中电磁铁吸引后帘向左运动, 快门开关控制前帘向右运动。

在初始状态, 开关 K 处于图 3-17 所示的位置, 即 K_1 闭合, K_2 断开, 电压比较器的正输入端的电压为 $U_{\text{th}} = U_{\text{CC}} R_{\text{W}1} / (R_{\text{W}1} + R_1)$, 而电压比较器的负输入端的电压 U_{r} 近似为电源电压 U_{CC} , 显然电压比较器负输入端的电位高于正输入端的电位, 比较器输出为低电平, 三极管截止, 电磁铁不吸合, 开门叶片闭合。前帘被快门挂钩钩住, 通光孔偏离光轴。电磁铁未通电, 无磁性, 后帘通光孔偏离光轴, 光线无法进入相机。

当按动快门的按钮时, 即 K_2 闭合, K_1 断开, 前帘脱钩, 并被弹簧拉到右边, 通光口位于

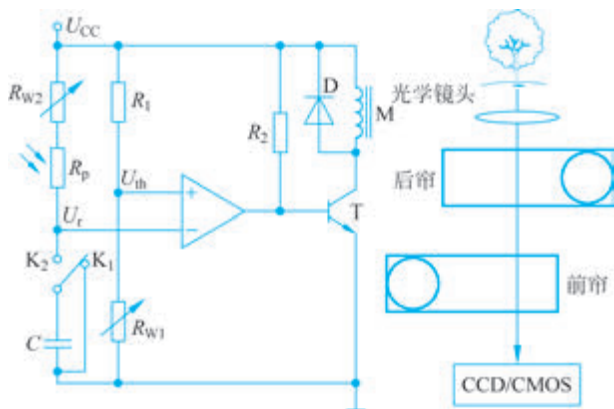


图 3-17 照相机自动曝光控制与光路控制电路

光轴上。开关与光敏电阻 R_p 及 R_{W2} 构成的测光与充电电路接通,这时,电容 C 两端的电压 U_c 为 0,由于电压比较器的负输入端的电位低于正输入端而使其输出为高电平,使三极管 T 导通,电磁铁通电,后帘在电磁铁吸引下往左移动,通光孔位于光轴上,图像进入相机,照相机开始曝光。快门打开的同时,电源 U_{CC} 通过电位器 R_{W2} 与光敏电阻 R_p 向电容 C 充电,且充电的速度取决于景物图像的光照度,景物照度越高,光敏电阻 R 的阻值越低,充电速度越快。 U_r 的变化规律可由电容 C 的充电规律得到,即

$$U_r = U_{CC} [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (3-25)$$

式中, τ 为电路的时间常数, $\tau = (R_{W2} + R)C$ 。

光敏电阻的阻值 R_p 为

$$R_p = \frac{1}{g} = \frac{1}{S_g E^\gamma} \quad (3-26)$$

当电容 C 两端的电压 U_c 充电到电位 $U_r \geq U_{th}$ 时,电压比较器的输出电压将从高变低,三极管 T 截止而使电磁铁断电,无磁性,后帘回到初态,通光孔偏离光轴,光线无法进入相机,曝光结束。前帘在联动装置作用下回到左边,重新被快门挂钩钩住。快门的开启时间 t 的表达式为

$$t = (R_{W2} + R_p)C \cdot \ln\left(\frac{U_{CC}}{U_{CC} - U_{th}}\right) = (R_{W2} + R_p)C \cdot \ln\left(1 + \frac{R_{W1}}{R_1}\right) \quad (3-27)$$

显然,快门开启的时间 t 取决于景物的照度,景物照度越低,快门开启时间越长;反之,快门开启的时间变短,从而实现照相机曝光时间的自动控制。当然,调节电位器 R_{W1} 可以调节阈值电压 U_{th} ,调节电位器 R_{W2} ,可以适当地修正电容的充电速度,都可以达到适当地调整照相机曝光时间的目的,使照相机曝光时间的控制适应 CCD/CMOS 感光度的要求。

思考题与习题

- 3.1 光电导内增益与哪些量有关?
- 3.2 光电导探测器灵敏度与工作偏置电压是否有关? 它在实际应用中的重要意义是什么?
- 3.3 对于同一种型号的光敏电阻来讲,在不同光照度和不同环境温度下,其光电导灵



图 3-17
动态效果

敏度与时间常数是否相同？为什么？当照度相同而温度不同时情况又会如何？

3.4 试说明为什么掺杂型光敏电阻需要低温使用。

3.5 总结选用光电导探测器的一般原则。

3.6 设某只 CdS 光敏电阻的最大功耗为 30mW ，光电导灵敏度 $S_g = 2 \times 10^{-6} \text{S/lx}$ ，暗电导为零。试求当 CdS 光敏电阻上的偏置电压为 20V 时的极限照度。

3.7 设光敏电阻 GM20539 在 10lx 的光照下的阻值为 $50\text{k}\Omega$ ，且已知它在 $10 \sim 100\text{lx}$ 时的 $\gamma = 0.8$ 。试求该光敏电阻在 90lx 光照下的阻值。

3.8 如图 3-18 所示，设光敏电阻的光电导灵敏度为 $S_g = 2 \times 10^{-5} \text{S/lx}$ ， $R_L = 2\text{k}\Omega$ ， $U_{CC} = 30\text{V}$ 。若光敏电阻所受的光照度 $E_v = 15 + 2\sin\omega t (\text{lx})$ ，求负载电阻 R_L 输出的交流电压有效值 V_L 。

3.9 在如图 3-19 所示的电路中，已知 $R_b = 820\Omega$ ， $R_e = 3.3\text{k}\Omega$ ， $U_W = 4\text{V}$ ， $U_{CC} = 12\text{V}$ ，光敏电阻为 R_p ，当光照度为 40lx 时输出电压为 6V ， 80lx 时为 9V 。设该光敏电阻为 $30 \sim 100\text{lx}$ 的 γ 值不变。试求：

- (1) 输出电压为 8V 时的照度。
- (2) 若 R_e 增加到 $6\text{k}\Omega$ ，输出电压仍然为 8V ，求此时的照度。

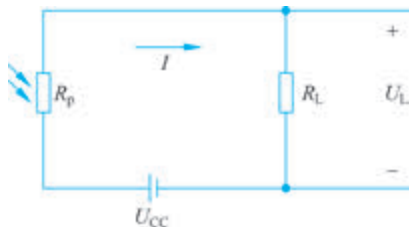


图 3-18 习题 3.8 图

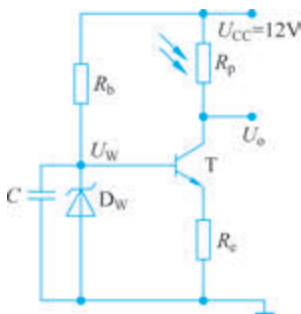


图 3-19 习题 3.9 图

(3) 若光敏面上的照度为 70lx ，求 $R_e = 3.3\text{k}\Omega$ 与 $R_e = 6\text{k}\Omega$ 时输出的电压。

3.10 如图 3-20 所示的电路，耦合电容 C 足够大，在交流回路中其容抗可以忽略不计。光敏电阻 R_p 的参数为 $S_g = 2 \times 10^{-5} \text{S/lx}$ ， $\tau = 10^{-3} \text{s}$ ， $R_1 = 4\text{k}\Omega$ ， $R_2 = 2\text{k}\Omega$ ， $U_{CC} = 50\text{V}$ ，暗电阻 $R_d = 1\text{M}\Omega$ ，若光敏电阻所受的光照度为 $e = 16 + 4\sin\omega t (\text{lx})$ 。

- (1) 画出等效电路图。
- (2) 求通过 R_2 电流的有效值。
- (3) 求输出电压 U_{out} 的有效值。
- (4) 求上限截止频率 f_{HC} 。

3.11 上网查找光敏电阻的应用实例，并说明原理。

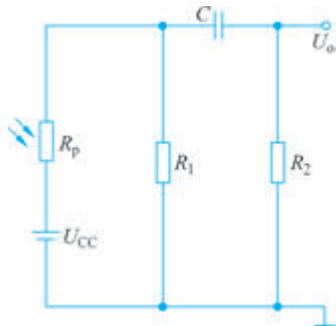


图 3-20 习题 3.10 图