

利用半导体光伏效应制作的器件称为光伏(Photovoltaic, PV)探测器,由于光伏探测器是由对光敏感的结构成的,因此也称结型光电器件。根据所用结的种类不同,可以分PN结型、PIN结型、异质结型和肖特基势垒型等。常用的光伏探测器件有光电池、光敏二极管、光敏晶体管、PIN光敏二极管、色敏探测器、雪崩光敏二极管、位置敏感传感器、象限探测器等。光伏探测器与光电导探测器相比较,主要区别在于:①产生光电变换的位置不同;②光电导探测器没有极性,工作时必须有外加电压,而光伏器件有确定的极性,不需要外加电压也可以把光信号转换为电信号;③光电导探测器为均质型探测器,均质型探测器的载流子弛豫时间比较长、响应速度慢、频率特性差,而结型探测器响应速度快、频率响应特性好。

光伏探测器广泛应用于光度测量、光电开关预警、光电检测、图像获取、光通信和自动控制等方面。本章主要讲解光伏探测器的工作原理、性能特点、偏置电路及典型应用等。

5.1 光电池

光电池(Photoelectric Cell)是一种不需加偏置电压就能把光能直接转换成电能的结型光电器件。

光电池按功用可将其分为两大类:太阳能光电池和测量光电池。构成光电池的材料种类繁多,主要有锗、硅(单晶硅、多晶硅和非晶硅)、碲化镉(CdTe)、硒化镉、Ⅲ-V族和Ⅱ-VI族的元素等。光电池制造上可以分为基板式(Substrate Type)和薄膜式(Thin-film Type)等。薄膜式和物体有较好的结合性,它具有曲度,有可挠、可折叠等特性。

光电池的发展经历了四个阶段。第一阶段为基板硅晶,种类可分为单晶硅(Monocrystalline Silicon)、多晶硅(Polycrystalline Silicon)、非晶硅(Amorphous Silicon)。第二阶段为薄膜光电池,种类可分为碲化镉、铜铟硒化物、铜铟镓硒化物、砷化镓等。第三阶段是制造过程中导入有机物和纳米颗粒,种类有光化学太阳能电池(Photochemical Solar Cells)、染料光敏化太阳能电池(Dye Sensitized Solar Cells, DSSCs)、钙钛矿太阳能电池(Perovskite Solar Cell, PSC)、高分子太阳能电池、纳米结晶太阳能电池。第四阶段是复合多层薄膜材料,便于对光的吸收。

太阳能光电池主要用作向负载提供电源,对它的要求主要是光电转换效率高、成本低。由于它具有结构简单、体积小、质量轻、可靠性高、寿命长、可在空间直接将太阳能转换成电

能等特点,因此,成为航天工业中的重要电源,而且还被广泛地应用于供电困难的场所和一些日用便携电器中。

测量光电池的主要功能是光电探测,即在不加偏置的情况下将光信号转换成电信号,此时对它的要求是线性范围宽、灵敏度高、光谱响应合适、稳定性高、寿命长等。它常被应用在光度、色度、光学精密计量和测试设备中。本节以硅光电池为例讲解光电池工作原理与基本结构、特性参数、典型光电池、偏置电路和应用。

5.1.1 硅光电池的工作原理与基本结构

1. 硅光电池的工作原理

硅光电池的工作原理如图 5-1 所示。当光作用于硅光电池时,受光面 N 区通常很薄,厚度约为微米量级。如果入射光子能量大于硅半导体材料的禁带宽度,光子就会在 PN 结中不同区域被吸收而产生电子—空穴对。如果入射光为短波长,光子会在表面 N 型区域被吸收从而产生光电子—空穴对,在 N 区,空穴是少数,光生空穴会使该区域空穴浓度大量增加,从而发生由于浓度不均匀引起的扩散运动,当空穴扩散到耗尽层后,在内建电场的作用下到达 P 区;如果入射光为中波长,光子会在耗尽层被吸收从而产生光电子—空穴对,电子—空穴对会在内建电场的作用下向相反的方向运动,空穴到达 P 区,电子到达 N 区;如果入射光为长波长,光子会在较深的 P 型区域被吸收从而产生光电子—空穴对,在 P 区,电子是少数,光生电子会使该区域电子浓度大量增加,从而发生电子扩散运动,当电子扩散到耗尽层后,在内建电场的帮助下到达 N 区。这样在 N 区域边界就积累了负电荷, P 型区域边界积累正电荷,外接负载电阻 R_L 后,在闭合的电路中将产生如图 5-1 所示的输出电流 I ,且在负载电阻 R_L 产生的电压降为 V 。

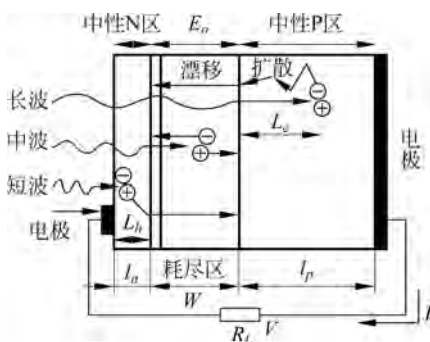


图 5-1 硅光电池的工作原理

2. 硅光电池的结构和符号

硅光电池按衬底材料(Substrate Material)的不同可分为 2DR 型和 2CR 型。图 5-2(a)所示为 2DR 型硅光电池的结构,它是以 P 型硅为衬底,然后在衬底上扩散磷而形成 N 型层并将其作为受光面。2CR 型硅光电池则是以 N 型硅作为衬底,然后在衬底上扩散硼而形成 P 型层,并将其作为受光面,构成 PN 结,再经过各种工艺处理,分别在衬底和光敏面上制作输出电极,涂上二氧化硅作为保护膜,即成硅光电池。

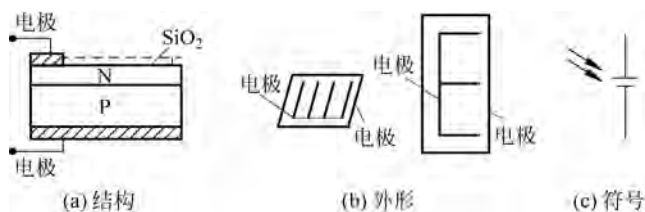


图 5-2 硅光电池的结构和符号



5.1.1
微课视频



图 5-1
动态效果

硅光电池受光敏面的输出电极多做成如图 5-2(b)所示的梳齿状或 E 形电极,目的是减小硅光电池的内电阻。另外,在光敏面上涂一层极薄的二氧化硅透明膜,它既可以起到防潮、防尘等保护作用,又可以减小硅光电池的表面对于入射光的反射,增加对入射光的吸收。图 5-2(c)所示为光电池的电路符号。

3. 硅光电池的等效电路、短路电流与开路电压

图 5-1 所示的等效电路(Equivalent Circuit)如图 5-3(a)所示,硅光电池等效于一个电流源和一个普通二极管的并联。普通二极管包括结电流 I_d (即扩散电流与漂移电流之差)、结电阻 R_{sh} (也称漏电阻)、结电容 C_j 及串联电阻 R_s 。 R_{sh} 的阻值很大,约 $1\text{M}\Omega$,故流过的电流很小,往往可以忽略。 R_s 为引线电阻、接触电阻等之和,为几欧姆,可以忽略。如果作为光能用,结电容可以忽略。这样等效电路就可以简化为图 5-3(b)所示。



图 5-3
动态效果

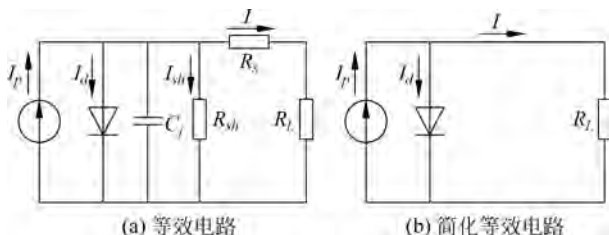


图 5-3 硅光电池等效电路

图 5-4 所示为硅光电池接负载电阻 R_L 后的电路图。图 5-4(a)规定逆时针方向为电路的电流正方向,图 5-4(b)表示硅光电池短路时电流,图 5-4(c)表示硅光电池接负载时回路电流。

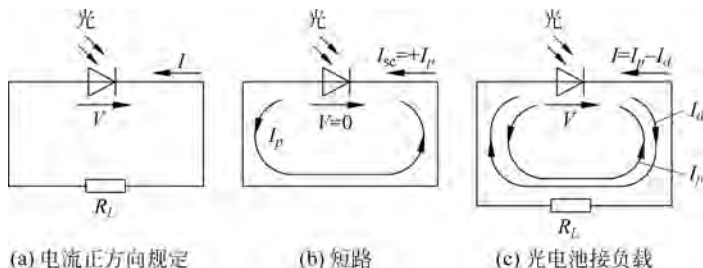


图 5-4 硅光电池接负载时的电流与电压

回路电流方程可以表示为

$$I = I_p - I_d - I_{sh} = I_p - I_s (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) - I_{sh} \quad (5-1)$$

式中: I_p —— 光电流, 可以表示为 $I_p = e\eta\Phi/h\nu$ 或 $I_p = S \cdot E$;

I_d —— 二极管加电压 V 后的正向导通电流;

I_{sh} —— 流过漏电阻 R_{sh} 的电流。

通常情况下 $I_{sh} \approx 0$, 则回路电流方程可以简化为

$$I = \frac{e\eta\Phi}{h\nu} - I_s (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) \quad (5-2)$$

开路时, 回路电流为 $I = 0$, 由式(5-2)得到开路电压(Open-circuit Voltage)为

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_p}{I_s} + 1\right) \quad (5-3)$$

短路时,外电路电压 $V=0$,由式(5-2)得到短路电流(Short-circuit Current)为

$$I_{sc} = I_p = \frac{e\eta\Phi}{h\nu} \quad (5-4)$$

4. 硅光电池的输出功率与转换效率

由欧姆定律可得,PN 结两端的偏置电压为

$$V = IR_L \quad (5-5)$$

当以 I 的方向为电流和电压的正方向时,可以得到如图 5-5 所示的伏安特性曲线。从该曲线可以看出,负载电阻 R_L 所获得的功率为

$$P_L = IV \quad (5-6)$$

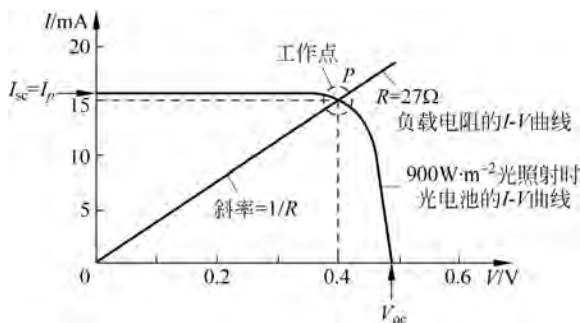


图 5-5 硅光电池的 I - V 特性曲线

将式(5-5)代入式(5-6),得到负载所获得的功率为

$$P_L = I^2 R_L \quad (5-7)$$

由上式可知,功率 P_L 与负载电阻的阻值有关,当 $R_L = 0$ (电路为短路)时, $V = 0$, 输出功率 $P_L = 0$; 当 $R_L = \infty$ (电路为开路)时, $I = 0$, 输出功率 $P_L = 0$; 当 $0 < R_L < \infty$ 时, 输出功率 $P_L > 0$ 。显然,存在着最佳负载电阻 R_{opt} , 在最佳负载电阻情况下负载可以获得最大输出功率 P_{max} 。通过对式(5-7)求关于 R_L 的一阶导数,令其等于零,可求得最佳负载电阻 R_{Lopt} 的阻值。

当负载电阻为 R_{Lopt} , 对应的电流为 I_m 、电压为 V_m , 则最大输出功率(Output Power)为

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (5-8)$$

光电池的转换效率(Transfer Efficiency)为光电池输出的最大功率与入射光功率之比,即

$$\eta = \frac{P_m}{\Phi} \quad (5-9)$$

例题 假设光电池驱动一个 27Ω 的负载电阻。用光照度为 $900\text{W}/\text{m}^2$ 的光照射直径为 5mm 的光电池。图 5-5 给出了光电池的 I - V 特性曲线。求:(1)回路中的电流和电压;(2)求输出给负载的功率;(3)求光电池的效率。

解 (1) 图中直线的斜率为 $1/27$, 由图可知, $I' = 15\text{mA}$, $V' = 0.4\text{V}$ 。

(2) 输出给负载的功率为

$$P_{out} = I'V' = 15 \times 10^{-3} \times 0.4 = 0.006\text{W}$$

(3) 输入的太阳光功率为

$$P_{\text{in}} = EA = 900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times (0.005 \text{ m})^2 \times \pi = 0.07065 \text{ W}$$

效率为

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{0.006}{0.07065} = 8.49\%$$



5.1.2
微课视频

5.1.2 硅光电池的基本特性参数

1. 光电特性

光电池的光电特性(Optical and Electrical Properties)主要有照度—电流电压特性和照度—负载电阻特性。光电池的照度—电流电压特性是指光电池的短路光电流 I_{sc} 和开路电压 V_{oc} 与入射光照度之间的关系。光电池的短路电流 I_{sc} 与入射光照度成正比,而开路电压 V_{oc} 与入射光照度的对数成正比。如图 5-6 所示为硅光电池的照度—电流电压特性曲线。对于硅光电池, V_{oc} 一般为 $0.45 \sim 0.6 \text{ V}$, 最大不超过 0.756 V 。实际使用中,常标明特定测试条件下硅光电池的开路电压 V_{oc} 与短路光电流 I_{sc} 参数。光电池的照度—负载电阻特性是指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。在外接负载电阻相对于光电池内阻很小的情况下,可认为光电池是被短路的。而光电池在不同照度下的内阻是不同的,所以,在不同照度时可用不同大小的负载近似满足短路条件。图 5-7 给出了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,而且线性范围也越宽。此外,在一定负载电阻的条件下,光照越弱,其线性关系越好。

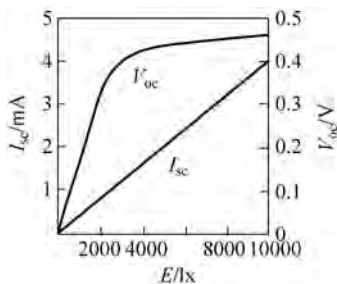


图 5-6 硅光电池的照度—电流电压特性

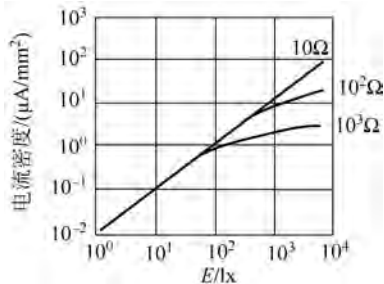


图 5-7 光电池的光照—负载电阻特性

2. 光谱特性

光电池对不同波长光的灵敏度是不同的。光电池的光谱响应特性表示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,一般用相对光电灵敏度表示。图 5-8 给出了常见的几种硅光电池的光谱特性(Spectral Properties)曲线。其中,普通 2CR 型硅光电池光谱响应范围为 $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$, 峰值波长为 $0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 。已研制的 2CR1133-01 型和 2CR1133 型蓝硅光电池光谱响应特性在 $0.48 \mu\text{m}$ 处的相对灵敏度仍大于 50%,可应用在视见函数或色敏探测器件中。

3. 伏安特性

硅光电池伏安特性(Voltage-Current Characteristic)表示在一定的光照下,硅光电池在连接不同负载电阻时,所输出的电流和电压的关系。伏安特性曲线如图 5-9 所示。

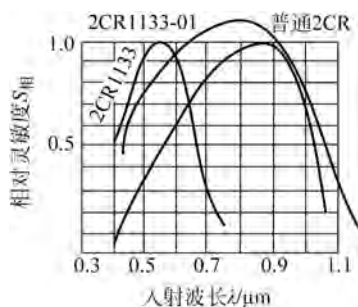


图 5-8 常见的几种硅光电池的谱曲线

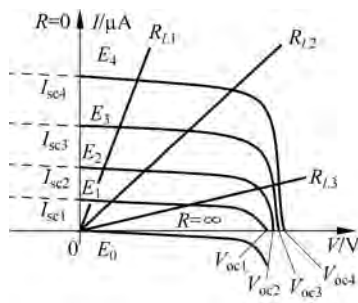


图 5-9 硅光电池的伏安特性曲线

4. 频率特性

光电池的响应频率一般不太高。硅光电池的最高截止频率仅为数十千赫兹。其频率响应不高的主要原因是光敏面一般较大,故其极间电容较大,使电路时间常量较大;另外,光电池内阻随着光功率的变化而变化,当功率较小时,相应的内阻较大,频率特性(Frequency Characteristic)较差。此外光电池的工作频率还受负载电阻 R_L 的限制,如图 5-10 所示,当 R_L 较大时,输出电压较大,但响应时间却增大,使频率特性变差。所以在实际使用时,特别是当光电池在入射功率很小的条件下工作时,需折中考虑。

为了提高频率响应,光电池可在光电导模式下使用。例如,只要加 1~2V 的反向偏置电压,响应时间就可以从微秒下降到几百纳秒。

5. 温度特性

光电池的参数都是在室温(25~30℃)下测得的,参数值随工作环境温度改变而变化。光电池的温度特性(Temperature Property)曲线主要指光照射光电池时开路电压 V_{oc} 与短路电流 I_{sc} 随温度变化的关系,如图 5-11 所示。由图可以看出,开路电压 V_{oc} 具有负温度系数,即随着温度的升高 V_{oc} 值反而减小,其值为 2~3mV/℃;短路电流 I_{sc} 具有正温度系数,即随着温度的升高, I_{sc} 值增大,但增大比例很小,为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ mA/℃ 数量级。

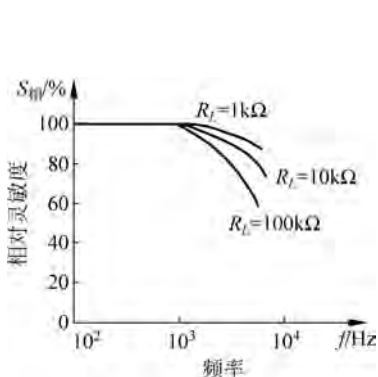


图 5-10 硅光电池的频率特性

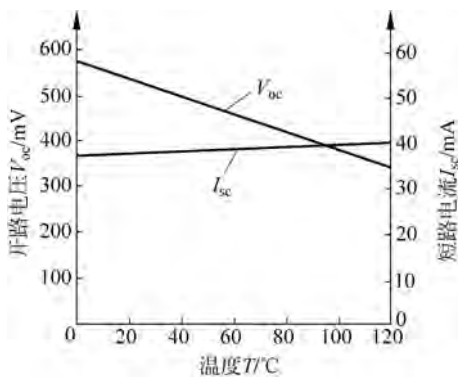


图 5-11 光电池的温度特性曲线

因此,光电池作为探测器件时,测量仪器应考虑温度的漂移从而对其进行补偿,以保证测量精度。

5.1.3 几种常用的光电池

1. 砷化镓太阳能电池

在化合物半导体中,对砷化镓的研究比较多,工艺比较成熟。由于砷化镓的 E_g 值比硅大,从光谱响应角度来说,更适合做太阳能电池,工作温度也可以比硅的高,在聚光高温条件下工作,具有独特的优点。图 5-12 显示了典型的 GaAs/AlGaAs 太阳能电池结构。这种太阳能电池具有高效、长寿命的特点,主要用于太空。目前实验室最高效率已达到 50%,产业生产转化率可达 30% 以上,抗辐照性能优良(10 年后功率输出降至原来的 83%)。



图 5-12 GaAs/AlGaAs 太阳能电池的构造

2. II-VI 族化合物太阳能电池

在 II-VI 族半导体化合物太阳能电池中,目前转换效率最高的是 N 型硫化镉(CdS)和 P 型碲化镉(CdTe)组成的太阳能电池。这种电池的优点是,从 PN 结到电极全部可以用丝网印刷和烧结制成,制造方法简单,制造成本控制得很低,转换效率可达 13% 左右,但同其他化合物太阳能电池一样,有由镉(Cd)引起的公害问题,所以至今不能普及。

3. 铜铟硒太阳能电池

铜铟硒是以铜(Cu)、铟(In)、硒(Se)三元化合物半导体为基本材料制成的太阳能电池,因此简称 CIS 太阳能电池。CIS 材料的理论研究始于 20 世纪 80 年代中期。研究者从价带理论角度对三元黄铜矿化合物的能带和晶格结构进行分析,对 CIS 材料内部各种缺陷(点缺陷、第二相等)的生长与材料组分的关系进行了深入研究。CIS 体材料造价昂贵,不适用于大规模生产。

太阳能电池的转换效率受反射损失、光损失、能量损失和复合所造成的损失等因素影响。其中复合所造成的损失由光伏材料的性能决定。研究表明,延长少数载流子的寿命可以增大 CIS 太阳能电池的开路电压和 CIS 材料的性能。本征缺陷、杂质、错配及第二相等材料少数载流子寿命等因素都将对 CIS 太阳能电池的转换效率产生影响。

CIS 光伏材料优异的性能吸引世界众多专家,但直到 2000 年才初步产业化,其主要原因在于工艺的重复性差,高效电池成品率低。CIS 薄膜是多元化合物半导体,原子配比及晶格匹配性往往依赖于制作过程中对主要半导体工艺参数的精密控制。目前,CIS 薄膜的基本特性及晶化状况还没有完全弄清楚,无法预测 CIS 材料性能和器件性能的关系。CIS 膜与 Mo 衬底间较差的附着性也是成品率低的重要因素。同时,在如何降低成本方面还有很大的提升空间。以上这些都是世界各国研究 CIS 光伏材料的发展方向。

表 5-1 所示为典型硅光电池的基本特性参数。

表 5-1 典型硅光电池的基本特性参数

型号	开路电压 V_{oc}/mV	光敏面积 S/mm^2	短路电流 I_{sc}/mA	输出电流 I_s/mA	时间响应(τ_r)		时间响应(τ_f)		转换效率 /%
					$R_L=500\Omega$	$R_L=1\text{k}\Omega$	$R_L=500\Omega$	$R_L=1\text{k}\Omega$	
2CR11	450~600	2.5×5	2~4		15	20	15	20	≥ 6
2CR21	450~600	5×5	4~8		20	25	20	25	≥ 6
2CR31	550~600	5×10	9~15	6.5~8.5	30	35	35	35	6~8
2CR32	550~600	5×10	9~15	8.5~18.3	30	35	35	35	8
2CR41	150~600	10×10	18~30	17.6~22.5	35	40	40	70	~ 10
2CR44	550~600	10×10	27~30	27~35	35	40	40	70	≥ 12
2CR51	450~600	10×20	36~60	35~45	60	150	80	150	6~8
2CR54	550~600	10×20	54~60	54~60	60	150	80	150	≥ 12
2CR61	450~600	$\phi 17$	45~65	30~40	70	100	90	150	6~8
2CR64	550~600	$\phi 17$	61~65	61~65	70	100	90	150	≥ 12
2CR71	450~600	20×20	72~120	72~120	100	120	120	150	≥ 6
2CR81	450~600	$\phi 25$	88~140	88~140	150	200	170	250	6~8
2CR84	500~600	$\phi 25$	132~140	132~140	150	200	170	250	≥ 12
2CR91	450~600	5×20	18~30	18~30	30	35	35	35	≥ 6

5.1.4 光电池的偏置电路

光电池按功用可分为两大类：太阳能光电池和测量光电池。作为能源用时，其偏置电路主要是自偏置电路(Self-bias Circuit)。作检测用时主要是零伏偏置电路(Zero Bias Circuit)。

光电池工作时无须外加偏压，直接与负载电阻连接，其输出电流 I 通过外电路负载电阻产生的压降 IR_L 就是它自身的正向偏压，故称为自偏压，其电路称为自偏置电路，如图 5-13 所示。光电池回路方程为

$$V(I) = IR_L \quad (5-10)$$

由于无外加偏压，其伏安特性实际上表示的是它在某一光照度下输出电流和电压随负载电阻变化的关系。由于电流的实际方向和二极管正向电流方向相反，为了分析和讨论的方便，将其伏安特性曲线旋转到第一象限，如图 5-14 所示。根据式(5-10)，在图 5-14 中作出不同负载电阻 R_{L1} 、 R_{L2} 和 R_{Lopt} 的直流负载线。在图 5-14 中，这些负载线将光电池的工作状态分为 I、II、III 三个区域。下面讨论光电池实用的几个工作区域。

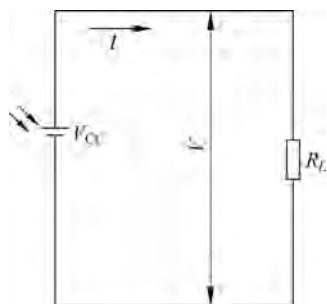


图 5-13 光电池自偏置电路

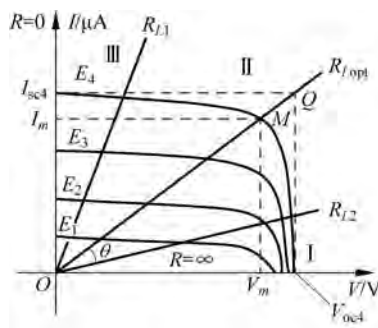


图 5-14 光电池直流负载线


 5.1.4
微课视频

1. 线性电流放大区

光电池工作在Ⅲ区域时,负载电阻较小,其输出电流与光照有较好的线性关系,该区域称为短路或线性电流放大区(Current Amplification Region)。负载电阻越小,电流的线性越好,这与图 5-7 中光电池的照—负载电阻特性是一致的。当负载短路($R_{L0}=0$)时,由式(5-4)得到光电池输出短路电流 I_{sc} 。

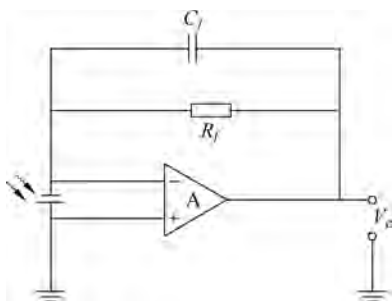


图 5-15 光电池电流放大电路

图 5-15 给出了一种光电池的线性电流放大电路。光电池与运算放大器相连,运算放大器输入端的输入阻抗 Z_{in} 就是光电池的负载电阻,其输入阻抗为

$$Z_{in} = \frac{R_f}{1 + A} \quad (5-11)$$

式中: R_f ——反馈电阻;

A ——放大器开环增益。

因 $A=10^4$, $R_f < 100\text{k}\Omega$, 所以 $Z_{in}=0 \sim 10\Omega$ 。 Z_{in} 相当于光电池的负载 R_L , 可以认为光电池是处于短路工作状态。处于电流放大状态的运算放大器,其输出电压与输入光电流成比例,即

$$V_o = I_{sc} R_f = R_f S E \quad (5-12)$$

这种电路不仅线性好,输出光电流大,而且暗电流近似为零,信噪比好,适合于弱光信号的检测。

2. 电压放大区

光电池工作在区域Ⅰ时,负载电阻很大,近似于开路($R_L \rightarrow \infty$),光电池输出电流 $I=0$,该区域称为空载电压输出区。由式(5-3)可知,当入射光信号从“无”到“有”做跳跃式变化时,硅光电池输出电压从 0 跳跃到 $0.45 \sim 0.6\text{V}$ 。在不要求电压随光通量线性变化的情况下,光电池开路输出具有很高的光电转换灵敏度,而且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。这种使用方式的不足之处是,频率特性不好,受温度影响也较大。

图 5-16 给出了一种光电池空载电压放大电路(Voltage Amplifier Circuit)。光电池的正端接在运算放大器的同向端。运算放大器的漏电流比光电流小得多,具有很高的输入阻抗。当负载电阻 R_L 取 $1\text{M}\Omega$ 以上时,光电池处于接近开路的状态。可以得到与开路电压成正比的输出信号,即

$$V_o = A V_{oc} = A \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{SE}{I_s} - 1\right) \quad (5-13)$$

式中, $A = (R_1 + R_2)/R_1$ 是该电路的电压放大倍数。

3. 功率放大区

光电池工作在Ⅱ区域时,负载电阻线与光电池伏安特性曲线交点所围成的矩形面积就是该负载线下光电池的输出功率。负载电阻变化时,相应的矩形面积随之变化。过点 $(V_{oc4}, 0)$ 和点 $(0, I_{sc4})$ 作伏安特性曲线的切线,两切线相交于 Q 点,连接 OQ 与伏安特性曲

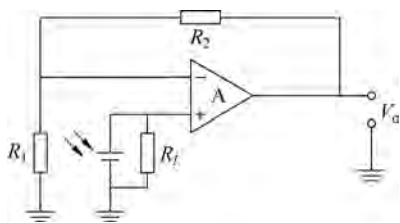


图 5-16 光电池电压放大电路

线相交 M 点,则有

$$\tan\theta = \frac{I_m}{V_m} = \frac{1}{R_{Lopt}} \quad (5-14)$$

$$R_{Lopt} = \frac{1}{\tan\theta} \quad (5-15)$$

此时,相应的矩形面积最大,当入射光功率增大时,由于 V_{oc} 增加缓慢,而 I_{oc} 明显增加,伏安特性曲线向电流轴方向延伸,因此, R_{opt} 随照射光功率增大而减小。当负载电阻取阻值 R_{Lopt} 时,可使光电池具有最大的输出功率,该区域称为功率放大区(Power Amplification Region)。光电池工作在这个区域时,能将光能有效地转换成电能给负载供电。这一区域的特性体现了太阳能光电池的特点。

总之,光电池输出电流大,无须加任何偏置电源,可工作在 II 区域,具有太阳能光电池的功能;也可工作在 I 和 III 区域,具有光电探测的功能。但光电池作为线性测量使用时,只有 III 区域才是最佳的工作状态。

5.1.5 光电池的应用

1. 太阳能光电源装置

光电池要将太阳能直接转变成电能供给负载。单片光电池的电压很低,输出电流很小,因此不能直接用作电源。一般要把很多片光电池组装成光电池组作为电源使用。

通常在用单片光电池组装成电池组时,可以采用增加串联片数的方法来提高输出电压,用增加并联片数的方法来增大输出电流。为了在无光照时仍能正常供电,往往把光电池组合蓄电池装在一起使用,通常,把这种组合装置称为太阳能电源。

这种装置有两种连接方式,如图 5-17 所示。

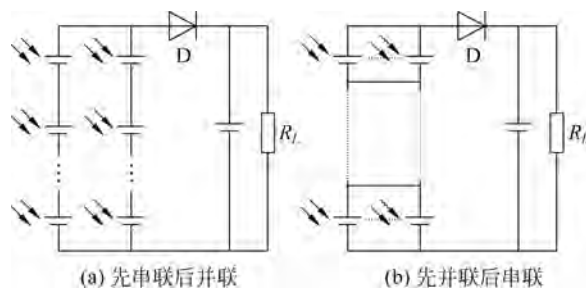


图 5-17 光电池的连接方式

R_L 是负载电阻, D 是防逆流二极管。因为辐照度减弱会造成光电池组输出电压降低,加了防逆流二极管可以阻止蓄电池对光电池放电。

太阳能光电池材料有单晶硅、多晶硅、非晶硅、 CdS 、 $GaAlAs/GaAs$ 等,现在单晶硅太阳能电池的效率高,光谱范围宽,频率特性好,噪声低,它已广泛地用于光电读出、光电耦合、光栅测距、激光准直、电影还音、紫外光监视器和燃气轮机的熄火装置等方面。

2. 检测用光电池的几种基本应用电路

光电池作为光电探测使用时,由于光电池工作时不需要外加偏压,而且光电转换效率高,光谱范围宽,频率特性好,噪声低,它已广泛地用于光电读出、光电耦合、光栅测距、激光准直、电影还音、紫外光监视器和燃气轮机的熄火装置等方面。

图 5-18 所示为光电池构成的光电跟踪电路。用两只性能相似的同类型光电池作为光电接收器件,当入射光能量相同时,执行机构按预定的方式工作或进行跟踪。当系统略有偏差时,电路输出差动信号 V 。执行纠正,以此达到跟踪的目的。

图 5-19 光电开关

图 5-20 光电池触发电路

5.2 光敏二极管

光敏二极管(Photodiode)是将光信号变成电信号的半导体器件,是一种重要的光电探测器。它的核心部分是一个 PN 结。和普通二极管相比,在结构上为了便于接收入射光照,PN 结面积尽量做的大一些,电极面积尽量小些,而且 PN 结的结深很浅,一般小于 $1\mu\text{m}$ 。它与光电池的光电转换有许多相似之处,而主要区别如下:①结面积大小不同,光敏二极管的结面积远小于光电池;②PN 结工作状态不同,光电池 PN 结工作在零偏置状态下,而二极管工作于反偏工作状态下,需要外加电压。因此光敏二极管的内建电场强,结区较宽,结电容很小,频率特性比较好。PN 型硅光敏二极管是最基本和应用最广的光敏二极管。

5.2.1 硅光敏二极管的工作原理与基本结构

1. 硅光敏二极管的工作原理

图 5-21 所示为平面扩散型光敏二极管的工作原理图。如果入射光子能量大于 Si 半导体材料的禁带宽度,就会在 PN 结中不同区域产生电子—空穴对。当短波长光入射时,光子会在表面附近 P^+ 型区域被吸收从而产生光电子—空穴对,在 P^+ 区光生电子会使该区域电子浓度大量增加,电子因浓度不均匀产生扩散运动,当电子扩散到耗尽层后,在内建电场的作用下到达 N 区;当长波长光入射时,光子会在 PN 结比较深的 N 型区域被吸收从而产生光电子—空穴对,在 N 区,空穴是少数,光生空穴会使该区域空穴浓度大量增加,从而发生扩散运动,当空穴扩散到耗尽层后,在内建电场的作用下到达 P^+ 区。这样在 N 区域边界就积累了负电荷, P 型区域边界积累正电荷。如果外接负载电阻 R_L ,回路中就会产生反向电流,即光电流。

2. 硅光敏二极管的分类、结构和符号

光敏二极管种类很多,按制造工艺可以分为平面型、生长型、合金型和台面型;按特性可以分为 PN 结、PIN 结型、异质结型、肖特基势垒型等;按对光的响应可以分为紫外、可见光和红外;按工作基础可以分为耗尽型和雪崩型。

光敏二极管可分为以 P 型硅为衬底的 2DU 型与以 N 型硅为衬底的 2CU 型两种结构形式。图 5-22 所示为 2CU 型光敏二极管的结构图与电路符号。利用 N 型硅材料作为衬底,在高阻轻掺杂 N 型硅片上通过扩散或注入的方式生成很浅(约为 $1\mu\text{m}$)的 P^+ 型层,形成 PN 结。为保护光敏面,在 P^+ 型硅的上面氧化生成极薄的 SiO_2 保护膜,它既可保护光敏面,又可增加器件对光的吸收。衬底镀镍蒸铝之后引出电极。

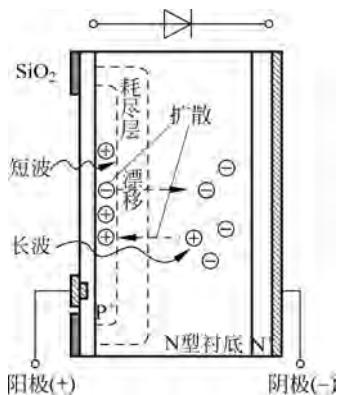


图 5-21 硅光敏二极管的工作原理图

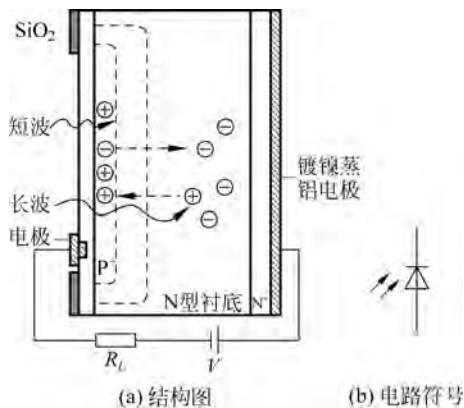


图 5-22 硅光敏二极管的结构图与电路符号

3. 硅光敏二极管的等效电路与光照伏安特性

硅光敏二极管的等效电路图与光电池一样,如图 5-23 所示,等效于一个电流源和一个普通二极管的并联。硅光敏二极管简化等效电路如图 5-24 所示。

在无光辐射作用的情况下(暗室中),PN 结硅光敏二极管的伏安特性曲线与普通 PN 结二极管的伏安特性曲线一样,如图 5-25 所示。其电流方程为



5.2.1
微课视频



图 5-22
动态效果

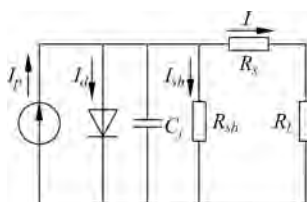


图 5-23 无偏置光电二极管等效电路

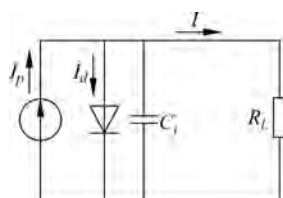


图 5-24 无偏置光电二极管简化等效电路

$$I_d = I_s (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) \quad (5-16)$$

式中：\$V\$——加在光敏二极管两端的电压；

\$T\$——器件的工作温度；

\$k\$——玻尔兹曼常数；

\$e\$——电子电荷量；

\$I_s\$——二极管反向饱和电流，反向偏置时 \$I_s\$ 和 \$V\$ 均为负值，且有 \$|V| \gg kT/e\$（室温下 \$kT/q \approx 26\text{mV}\$）；

\$I_d\$——二极管正向导通电流或暗电流。



图 5-25
动态效果

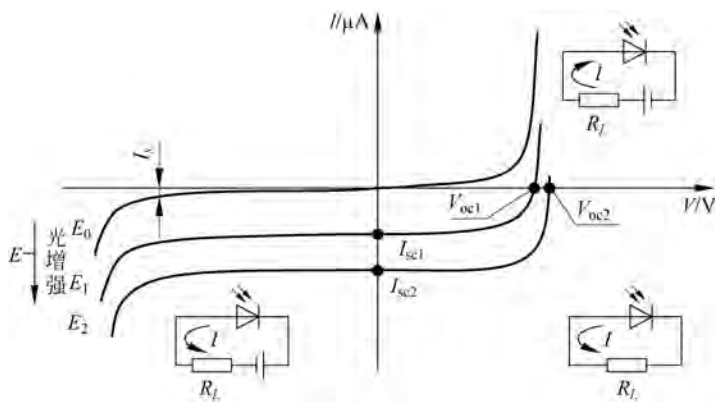


图 5-25 光敏二极管伏安特性曲线

当光辐射作用到如图 5-22 所示的光敏二极管上时，光生电流可以表示为

$$I_p = S \cdot E \quad (5-17)$$

式中：\$S\$——光电灵敏度；

\$E\$——光照度。

光电流方向为逆时针，选逆时针为正。

这样，光敏二极管的全电流方程为

$$I = S \cdot E - I_s (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) \quad (5-18)$$

由式(5-18)可以画出光敏二极管在不同照度下的伏安特性曲线。

无光照时，即图 5-25 中 \$E_0\$ 曲线，它与普通二极管的伏安特性曲线相同；有光入射到受光面后，曲线沿纵轴向下平移，平移的幅度与光照的变化成正比，即 \$\Delta I_p = S \Delta E\$。

图 5-25 中，第一象限 PN 结外加正向偏压。正向导通电流随外加电压增大而成指数急

剧增大,远大于光电流。光敏二极管和普通二极管一样呈现单向导电性,光电效应不明显。光敏二极管工作在这个区域是没有意义的。

第三象限 PN 结外加反向偏压。正向导通电流随反偏电压的增加有所增大,最后等于反向饱和电流,其值远小于光电流。而光电流几乎与反向电压的高低无关。所以回路总电流与光照的变化成正比。

第四象限 PN 结无外加偏压。流过光敏二极管的电流仍为反向电流,随光照变化,其电流与电压出现明显的非线性。

5.2.2 硅光敏二极管的基本特性

1. 光电特性

光电特性指外加偏置电压一定时,光敏二极管输出电流和光照度的关系。光敏二极管光电特性的线性通常较好。如图 5-26 所示是某种型号的光敏二极管的光电特性。

2. 光谱特性

以等功率的不同单色辐射波长的光作用于光敏二极管时,其响应程度或电流灵敏度与波长的关系称为光敏二极管的光谱响应。图 5-27 所示为几种典型材料的光敏二极管光谱响应曲线。由光谱响应曲线可以看出,典型硅光敏二极管光谱响应长波限约为 $1.1\mu\text{m}$,短波限接近 $0.4\mu\text{m}$,峰值响应波长约为 $0.9\mu\text{m}$ 。硅光敏二极管光谱响应长波限受硅材料的禁带宽度 E_g 的限制,短波限受材料 PN 结厚度的影响,减薄 PN 结的厚度可提高短波限的光谱响应。GaAs 材料的光谱响应范围小于硅材料的光谱响应,锗(Ge)的光谱响应范围较宽。

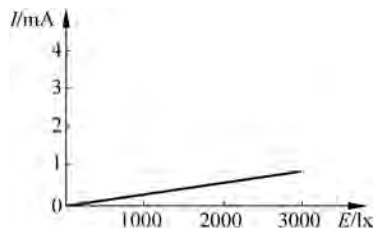


图 5-26 光敏二极管的光电特性曲线

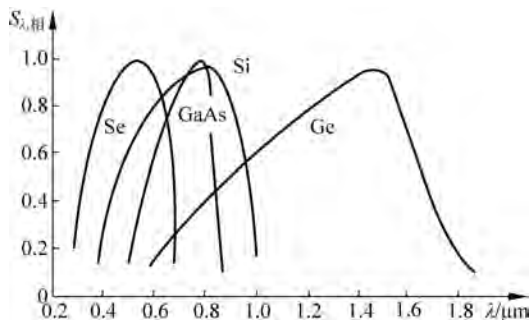


图 5-27 典型材料的光敏二极管的光谱特性曲线

3. 伏安特性

光电流是指光敏二极管在受到一定光照时,在最高反向工作电压下产生的电流。图 5-28 所示为硅光敏二极管在不同照度下的伏安特性曲线。由图中可以看出光敏二极管在反向偏压下的伏安特性。当反向偏压较低时,光电流随电压变化比较敏感,这是由于反向偏压加大了耗尽层的宽度和电场强度。当反向偏压加大到一定程度时,光敏二极管对载流子的收集达到极限,光电流趋于饱和,这时光电流与所加偏压几乎无关,只取决

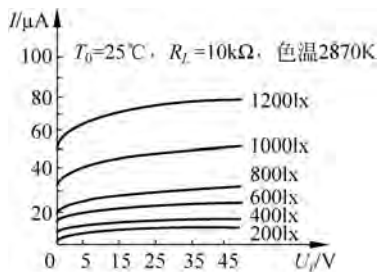


图 5-28 光敏二极管的伏安特性曲线



5.2.2
微课视频

于光照强度。

另外,从中还可以看出,在无偏压时,光敏二极管仍有光电流输出,这是由光敏二极管的光电效应性质所决定的。

4. 频率特性

频率 f 调制的辐射作用于 PN 结硅光敏二极管光敏面时,PN 结硅光敏二极管电流的产生要经过三个过程:

(1) 在 PN 结区内产生的光生载流子渡越结区的时间 τ_{dr} ,称为漂移时间(Drift Time)。

(2) 在 PN 结区外产生的光生载流子扩散到 PN 结区内所需要的时间 τ_p ,称为扩散时间(Diffusion Time)。

(3) 由 PN 结电容 C_j 、管芯电阻 R_i 及负载电阻 R_L 构成的 RC 延迟时间(Delay Time) τ_{RC} 。

设载流子在结区内的漂移速度为 v_d ,PN 结区的宽度为 W ,载流子在结区内的最长漂移时间为

$$\tau_{dr} = W/v_d \quad (5-19)$$

一般的 PN 结硅光敏二极管,内电场强度 E_i 都在 10^5 V/cm 以上,载流子的平均漂移速度要高于 10^7 cm/s ,PN 结区的宽度一般约为 $100 \mu\text{m}$ 。由式(5-19)可知,漂移时间 $\tau_{dr} = 10^{-9} \text{ s}$,为 ns 量级。

对于 PN 结硅光敏二极管,入射辐射在 PN 结势垒区以外激发的光生载流子经过扩散运动到势垒区内,受到内建电场的作用,分别被拉向 P 区和 N 区。载流子的扩散运动往往很慢,因此扩散时间 τ_p 很长,约为 100 ns ,它是限制 PN 结硅光敏二极管时间响应的主要因素。

另一个因素是 PN 结电容 C_j 和管芯电阻 R_i 及负载电阻 R_L 构成的时间常数 τ_{RC} ,有

$$\tau_{RC} = C_j (R_i + R_L) \quad (5-20)$$

普通 PN 结硅光敏二极管的管芯内阻 R_i 约为 250Ω ,PN 结电容 C_j 常为几个 pF,在负载电阻 R_L 低于 500Ω 时,时间常数 τ_{RC} 也在 ns 量级。但是,当负载电阻 R_L 很大时,时间常数 τ_{RC} 将成为影响硅光敏二极管时间响应的一个重要因素,应用时必须注意。

由以上分析可见,影响 PN 结硅光敏二极管时间响应的主要因素是 PN 结区外载流子的扩散时间 τ_p ,如何扩展 PN 结区是提高硅光敏二极管时间响应的重要措施。增大反向偏置电压会提高内建电场的强度,扩展 PN 结的耗尽区。同时,从 PN 结的结构设计方面考虑如何在使偏压增大的情况下使耗尽区扩展到整个 PN 结器件,才能消除扩散时间。

5. 温度特性

光敏二极管的温度特性曲线反映的是光敏二极管的暗电流及光电流与温度的关系。图 5-29 给出了硅光敏二极管的电流—温度特性曲线。暗电流是指光敏二极管在无光照及最高反向工作电压条件下的漏电流。暗电流越小,光敏二极管的性能越稳定,检测弱光的能力越强。

从中可以看出,暗电流随温度升高而增加,主要原因是热激发造成的。光敏二极管的暗电流在电路中是一种噪声电流。在高照度下工作时,由于光电流比暗电流大得多,温度的影响比较小。但在低照度下工作时,因为光电流比较小,暗电流的影响就不能不考虑。因此在使用时,交流放大器之前要增加隔直电容,这样可以最大限度地避免温度升高以致暗电流增

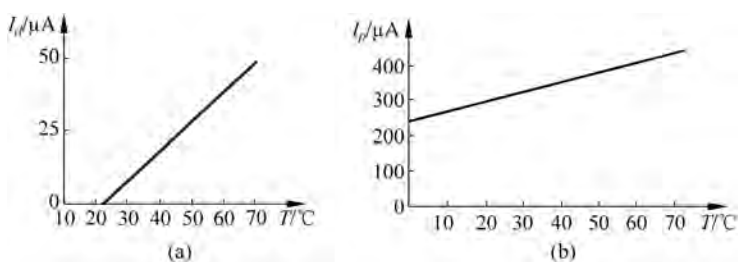


图 5-29 光敏二极管的温度特性曲线

加引起的对输出特性的影响,省去了温度补偿措施。

6. 噪声

与光敏电阻一样,光敏二极管的噪声也包含低频噪声 i_{nf} 、散粒噪声 i_{ns} 和热噪声 i_{nj} 三种噪声。其中,散粒噪声是光敏二极管的主要噪声。散粒噪声是由于电流在半导体内的散粒效应引起的,它与电流的关系为

$$\overline{i_{ns}^2} = 2qI\Delta f \quad (5-21)$$

光敏二极管的电流包括暗电流 I_D 、信号电流 I_s 和背景辐射引起的背景光电流 I_b ,因此散粒噪声应为

$$\overline{i_{ns}^2} = 2q(I_D + I_s + I_b)\Delta f \quad (5-22)$$

根据电流方程,将式(5-18)代入式(5-22)得到反向偏置的光敏二极管电流与入射辐射的关系,即

$$\overline{i_{ns}^2} = \frac{2q^2\eta\lambda(\Phi_s + \Phi_b)}{hc}\Delta f + 2qI_D\Delta f \quad (5-23)$$

另外,当考虑负载电阻 R_L 的热噪声时,光敏二极管的噪声应为

$$\overline{i_n^2} = \frac{2q^2\eta\lambda(\Phi_s + \Phi_b)}{hc}\Delta f + 2qI_D\Delta f + \frac{4kT\Delta f}{R_L} \quad (5-24)$$

7. 入射特性

由于光敏二极管入射窗口的不同封装而造成的灵敏度随入射角的不同而变化。入射窗由玻璃或塑料制成,一般有聚光透镜和平面玻璃。聚光透镜入射窗的优点是能够把入射光会聚于面积很小的光敏面上,以提高灵敏度。由于聚光位置与入射光位置有关,仅当入射光与透镜光轴重合时($\theta=0^\circ$)灵敏度最大。如果入射光偏离光轴,灵敏度就会下降,这给使用带来了麻烦,在做检测控制时,发光源要放在合适的位置,否则就会使灵敏度下降,甚至检测不到信号,如图 5-30 所示。

平面玻璃入射窗使用比较简单,但易受到杂散光的干扰,聚光作用差,光易受到反射,极值灵敏度下降。

5.2.3 常用光敏二极管

1. InSb 光敏二极管

J10 系列探测器是高品质 InSb 光敏二极管,有效波段为 $1\sim 5.5\mu\text{m}$ 。主要应用在热成像、热寻制导、辐射计、光谱测定、FTIR 中。该系列光敏二极管温度特性比较稳定,大于

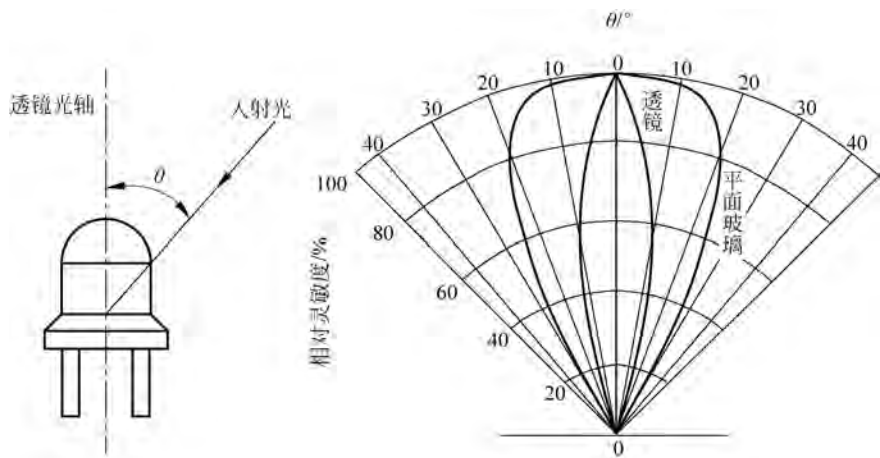


图 5-30 入射光方向与透镜光轴线夹角对相对灵敏度的影响

120℃性能开始出现下滑。

2. Ge 光敏二极管

J16 系列探测器是高品质 Ge 光敏二极管,有效波段为 800~1800nm。该系列主要应用在光功率计、光纤测试、激光二极管控制、温度传感器等方面。

温度改变在峰值下波长对 Ge 光敏二极管响应率的影响很小,但是在长波长时却显得很重要。

3. InAs 光敏二极管

J12 系列探测器是高品质 InAs 光敏二极管,有效波段为 1~3.8μm。主要应用在激光告警接收、过程控制监视、温度传感器、脉冲激光监视、功率计等方面。

表 5-2 所示为几种不同材料光敏二极管的基本特性参数,供实际应用时选用。

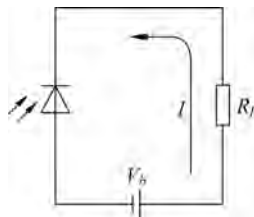
表 5-2 几种不同材料光敏二极管的基本特性参数

型号	材料	光敏面积 S/mm^2	光谱响应 $\Delta\lambda/\text{nm}$	峰值波长 λ_m/nm	时间响应 τ/ns	暗电流 I_D/nA	光电流 $I_p/\mu\text{A}$	反向偏压 V_R/V
2AU1A~D	Ge	0.08	0.86~1.8	1.5	≤ 100	1000	30	50
2CU1A~D	Si	$\phi 8$	0.4~1.1	0.9	≤ 100	200	0.8	10~50
2CU2	Si	0.49	0.5~1.1	0.88	≤ 100	100	15	30
2CU5A	Si	$\phi 2$	0.4~1.1	0.9	≤ 50	100	0.1	10
2CU5B	Si	$\phi 2$	0.4~1.1	0.9	≤ 50	100	0.1	20
2CU5C	Si	$\phi 2$	0.4~1.1	0.9	≤ 50	100	0.1	30
2DU1B	Si	$\phi 7$	0.4~1.1	0.9	≤ 100	≤ 100	≥ 20	50
2DU2B	Si	$\phi 7$	0.4~1.1	0.9	≤ 100	100~300	≥ 20	50
2CU101B	Si	0.2	0.5~1.1	0.9	≤ 5	≤ 10	≥ 10	15
2CU201B	Si	0.78	0.5~1.1	0.9	≤ 5	≤ 50	≥ 10	50
2DU3B	Si	$\phi 7$	0.4~1.1	0.9	≤ 100	300~1000	≥ 20	50

5.2.4 光敏二极管的偏置电路

1. 反向偏置电路

光敏二极管在外加偏压时,若N区接正端,P区接负端,偏置电压与内建电场的方向相同则称光敏二极管处于反向偏置状态,对应的电路称为反向偏置电路,如图5-31所示。光敏二极管反向偏置时,PN结势垒区加宽,内建电场增强,从而减小了载流子的渡越时间,降低了结电容,进而得到较高的灵敏度、较大的频带宽度和较大的光电变化线性范围。光敏二极管工作时通常都采用反向偏置电路。



5.2.4
微课视频

1) 基本反向偏置电路

图5-31所示为光敏二极管的基本反向偏置电路。其中,设 V_{CC} 为偏置电压, R_L 为偏置电阻(负载电阻), I 为光敏二极管的输出电流。由此,可得到反偏光敏二极管的回路电流方程为

$$I = I_p - I_s (e^{\frac{eV}{kT}} - 1) \quad (5-25)$$

由于反向偏压,常温下 $V \gg \frac{kT}{e}$, 则式(5-25)可以表示为

$$I = I_p + I_s \quad (5-26)$$

回路电压方程可以表示为

$$V(I) = V_b - IR_L \quad (5-27)$$

式中: $V(I)$ ——光敏二极管的端电压。

当入射到光敏二极管光通量 Φ 变化时,会引起回路中电流和电压的变化,由式(5-25)有电流与光通量的变化关系为

$$I = I_p + I_s \approx I_p = \frac{e\eta}{h\nu} \Phi \quad (5-28)$$

由式(5-27),反向偏置电路的输出电压与入射光通量的关系为

$$V(I) = V_b - R_L \frac{e\eta}{h\nu} \Phi \quad (5-29)$$

当入射光通量变化时,输出信号电压的变化为

$$\Delta V = -R_L \frac{e\eta}{h\nu} \Delta \Phi \quad (5-30)$$

2) 反向偏置光敏二极管的阻抗变换电路

图5-32所示是反向偏置光敏二极管的阻抗变换放大电路。反偏光敏二极管具有恒流源性质,内阻很大,且饱和光电流与入射光照度成正比,在很高负载电阻的情况下可以得到较大的信号电压。但如果将处于反向偏压状态下的光敏二极管直接接到实际的负载电阻上,则会因阻抗的失配而削弱信号的幅度。因此需要有阻抗变换器将高阻抗的电流源变换成为低阻抗的电压源,然后再与负载相连。图5-32中所示的以场效应管为前级的运算放大器就是这样的阻抗变换器。场效应管

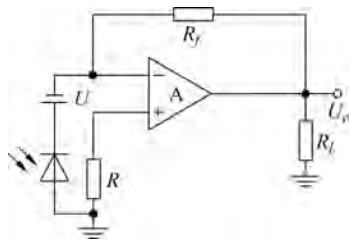


图 5-32 反偏阻抗变换电路图

有很高的输入阻抗,光电流是通过反馈电阻形成压降的。放大器的输入阻抗 $r_i = 0 \sim 10\Omega$, 输出电压为

$$V_o = -IR_f = -I_p R_f = -R_f S\Phi \quad (5-31)$$

式中: I_p ——光敏二极管的输出电流;

R_f ——放大器的反馈电阻,即输出电压与输入光通量成正比。

该电路与基本反向偏置电路相比,它具有极小的负载电阻(r_i),不易出现信号失真,同时由于运放的放大作用,又能输出较大的电压信号;与零伏偏置电路相比,它具有较高的反向工作偏压(V_{CC}),光敏二极管结电容较小,响应速度快,又有较大线性响应动态范围。

2. 零伏偏置电路

光敏二极管零伏偏置电路的伏安特性曲线对应于图 5-25 中第三象限和第四象限的交界处, $U=0$, 即纵轴。光伏探测器采用零伏偏置电路时,它的 $1/f$ 噪声最小,暗电流为零,可以获得较高的信噪比。因此,即使质量较好(反向饱和电流小,正、反向特性好)的光敏二极管也常采用零偏置电路,可避免偏置电路引入的噪声。

另外,光谱响应在中远红外波段的光伏探测器,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,由窄禁带(E_g 很小)半导体材料制成。其性能受热激发的影响较大,能承受的反向偏压不大(一般为几百毫伏至一点几伏),常工作在零伏偏置或接近于零伏偏置的状态。

图 5-33 给出了一种由运算放大器实现的零伏偏置电路,它与图 5-15 所示光电池的线性电流放大电路完全相同。

图 5-34 所示是 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产生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。

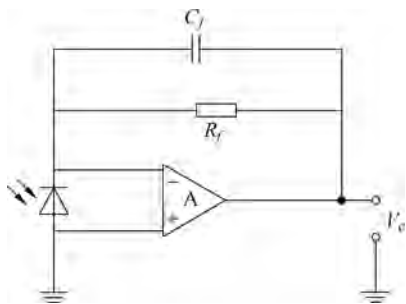


图 5-33 光敏二极管零伏偏置电路图

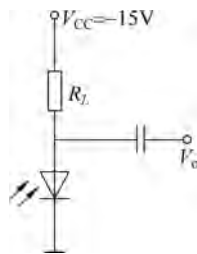


图 5-34 PV-InSb 光伏探测器的零偏置电路

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

$$V_D = V_{CC} - I_D R_L \quad (5-32)$$

这里,要使探测器处于零偏置状态,则取 $V_D = 0$, $I_D = I_s$, I_s 为探测器的反向漏电流。已知探测器的 $I_s = 50\mu\text{A}$, 若取 $V_{CC} = -15\text{V}$, 根据直流负载线方程就可以求得负载电阻 $R_L = 300\text{k}\Omega$ 。

除了上式的零伏偏置电路外,还可以利用变压器的阻抗变换功能构成零伏偏置电路。将光伏探测器接到变压器的低阻抗端(线圈匝数少),形成直流零伏偏置,而光的波动产生的

交变信号经变压器输出；另外，还可以利用电桥的平衡原理设置直流或缓变信号的零伏偏置电路。

值得指出的是，这些零伏偏置电路都属于近似的零伏偏置电路，它们都具有一定大小的等效偏置电阻，当信号电流较强或辐射强度较高时，将使其偏离零伏偏置。故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。若要获得大范围的线性光电信息变换，应该尽量采用光伏探测器的反向偏置电路。

5.2.5 光敏二极管的应用

光敏二极管的作用是进行光电转换，在光控、红外遥控、光探测、光通信、光电耦合等方面有广泛的应用。

(1) 光敏二极管可以用作光控开关。电路图如图 5-35 所示，无光照时，光敏二极管 VD_1 因接反向电压而截止，晶体管 VT_1 、 VT_2 因无基极电流也截止，继电器处于释放状态。当有光线照射到光敏二极管 VD_1 时， VD_1 从截止转变为导通，使 VT_1 、 VT_2 相继导通，继电器 K 吸合，从而接通被控电路。

(2) 光敏二极管可以用作光信号接收。图 5-36 所示为光信号放大电路，光信号由光敏二极管 VD 接收并转换为电信号，经 VT 放大后通过耦合电容 C 输出。

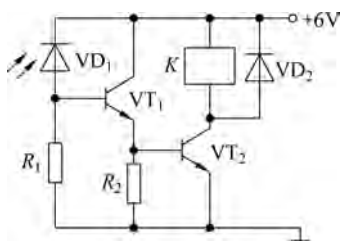


图 5-35 光控开关电路

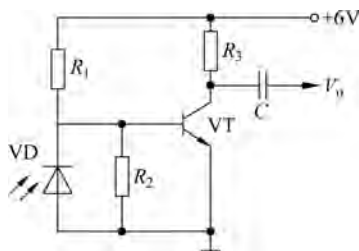


图 5-36 光信号放大电路

(3) 光敏二极管可以用作红外光到可见光的转换。电路如图 5-37 所示，红外光信号由光敏二极管 VD_1 接收，经晶体管 VT_1 、 VT_2 放大后，驱动发光二极管 VD_2 发出可见光。

(4) 光敏二极管可以用作光强测量。电路如图 5-38 所示，由稳压管、光敏二极管和电桥组成。无光照时， U_A 很大， VT 导通，调整 R_W 使电桥平衡，即指针为 0；有光照时， U_A 下降， R_2 上电流下降， U_B 减小。光照不同， U_A 不同， R_2 上压降不同，光强可以通过电流计读数显示出来。

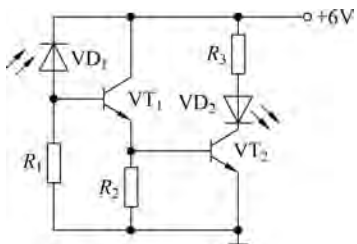


图 5-37 红外光到可见光的转换电路

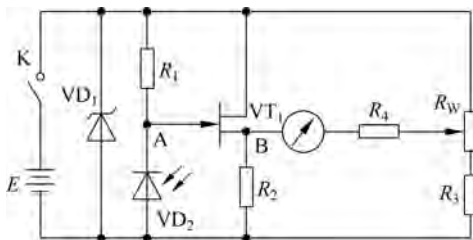


图 5-38 光强测量电路



5.3
微课视频

5.3 光敏晶体管

光敏晶体管(Phototriode)又称为光电晶体管(Phototransistor,PT),是一种具有电流内增益的光伏探测器。它的制作材料一般为半导体硅。

5.3.1 硅光敏晶体管的工作原理与基本结构

1. 硅光敏晶体管的工作原理

光敏晶体管的工作原理分为两个过程:一是光电转换;二是光电流放大。下面以 NPN 型硅光敏晶体管为例讨论其基本工作原理。

当光敏晶体管不受光照射时,相当于一般三极管基极开路状态,这时集电结处于反向偏置状态,因此集电极电流较小,这时的集电极电流称为光敏晶体管的暗电流。

当光照射到集电极上时就会产生电子—空穴对。由于集电结处于反向偏置状态,在结内有很强的内建电场。光激发产生的电子—空穴对在反向偏置的 PN 结内电场的作用下,电子漂移到集电区被集电极所收集,而空穴流向基区与正向偏置的发射结发射的电子流复合,形成基极电流 I_p 。基区内电荷的变化改变了发射结电位,造成电子由发射区向基区注入,由于发射区电子是多数载流子,发射区正偏,因此扩散作用大于漂移运动,大量电子越过发射结到达基区,在基区扩散受到内建电场作用到达集电极,如果基极没有引线,集电极电流等于发射极电流。基极电流将被集电极放大 β 倍,这与一般半导体三极管的放大原理相同。不同的是—般三极管是由基极向发射结注入空穴载流子,控制发射极的扩散电流,而光敏晶体管是由注入发射结的光生电流控制的。集电极输出的电流为

$$I_c = I_e = (1 + \beta)I_p \quad (5-33)$$

可以看出,光敏晶体管的电流灵敏度是光敏二极管的 β 倍。相当于将光敏二极管与三极管接成如图 5-39(c)所示的电路形式,光敏二极管的电流 I_p 被三极管放大 β 倍。在实际的生产工艺中也常采用这种形式,以便获得更好的线性和更大的线性范围。3CU 型光敏晶体管在原理上和 3DU 型相同,只是它以 P 型硅为衬底材料构成 PNP 的结构形式,其工作时的电压极性与之相反,集电极的电位为负。

2. 硅光敏晶体管的结构和符号

光敏晶体管与普通半导体三极管一样有两种基本结构,即 NPN 结构和 PNP 结构。用 N 型硅材料为衬底制作的光敏晶体管为 NPN 结构,称为 3DU 型;用 P 型硅材料为衬底制作的光敏晶体管为 PNP 结构,称为 3CU 型。图 5-39(a)所示为 3DU 型 NPN 光敏晶体管的原理结构,图 5-39(b)所示为光敏晶体管的电路符号。从图中可以看出,它们虽然只有两个电极(集电极和发射极),常不把基极引出来,但仍然称为光敏晶体管,因为它们具有半导体三极管的两个 PN 结的结构和电流的放大功能。

为了提高光敏晶体管的频率响应、增益,减小光电器件体积,常将光敏二极管、光敏晶体管或三极管制作在一个硅片上构成集成光电器件。如图 5-40(a)所示为光敏二极管与三极管集成而构成的集成光电器件,它比图 5-39(c)所示的光敏晶体管具有更大的动态范围,因为光敏二极管的反向偏置电压不受三极管集电结电压的控制。图 5-40(b)所示的电路为由图 5-39(c)所示的光敏晶体管与三极管集成构成的集成光电器件,它具有更高的电流增益

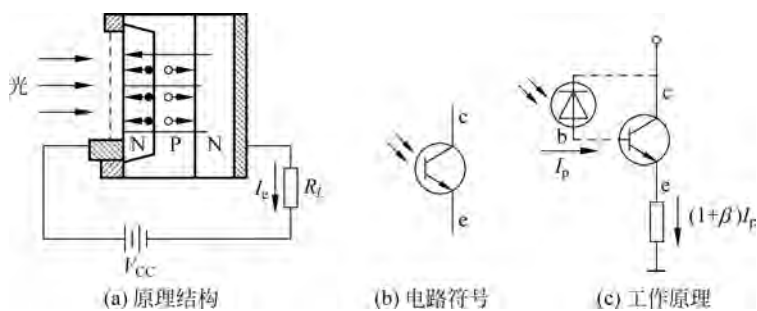


图 5-39 3DU 型光敏晶体管的结构及符号

(灵敏度更高)。图 5-40(c)所示的电路为由图 5-39(b)所示的光敏晶体管与三极管集成构成的集成光电器件,也称为达林顿光敏晶体管。达林顿光敏晶体管中可以用更多的三极管集成而成为电流增益更高的集成光电器件。

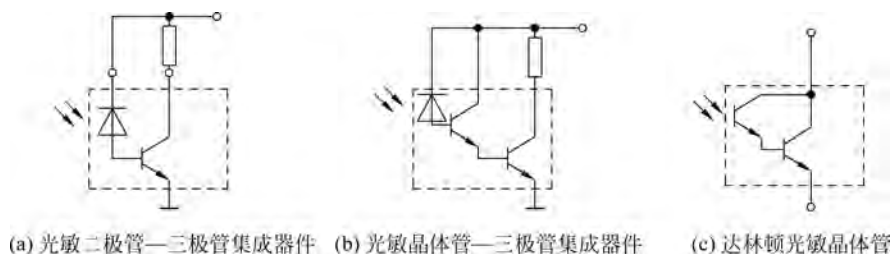


图 5-40 集成光电器件

3. 硅光敏晶体管的等效电路

图 5-41(a)所示为光敏晶体管的输出电路,图 5-41(b)所示为其微变等效电路。分析等效电路图,不难看出,由电流源 I_p 、基-射结电阻 r_{be} 、电容 C_{be} 和基-集结电容 C_{bc} 构成的部分等效电路为光敏二极管的等效电路。表明光敏晶体管的等效电路是在光敏二极管的等效电路基础上增加了电流源 I_c 、集-射结电阻 R_{ce} 、电容 C_{ce} 和输出负载电阻 R_L 。

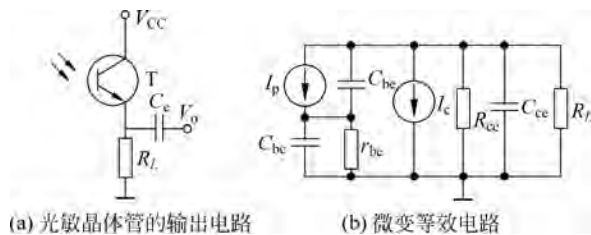


图 5-41 光敏晶体管电路

5.3.2 硅光敏晶体管的基本特性

1. 光电特性

硅光敏晶体管的输出电流和光照度的关系曲线如图 5-42 所示。硅光敏晶体管的光电流在弱光照时有弯曲,强光照时又趋向于饱和,只有在某一段光照范围内线性较好,这是由于硅光敏晶体管的电流放大倍数在小电流或大电流时都要下降造成的。

2. 光谱特性

光敏晶体管存在一个最佳灵敏度的峰值波长。当入射光的波长增加时,相对灵敏度要下降。因为光子能量太小,不足以激发电子—空穴对,导致相对灵敏度下降。当入射光的波长缩短时,相对灵敏度也下降,这是由于光子在半导体表面附近就被吸收,并且在表面激发的电子—空穴对不能到达 PN 结,因而使相对灵敏度下降。

如图 5-43 所示为光敏晶体管的光谱特性曲线,硅的峰值波长为 900nm,锗的峰值波长为 1500nm。由于锗管的暗电流比硅管大,因此锗管的性能较差。故在可见光或探测炽热状态物体时,一般选用硅管;但对红外线进行探测时,则采用锗管较合适。

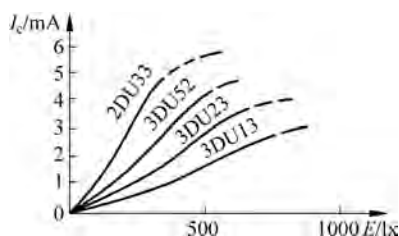


图 5-42 光敏晶体管的光电特性

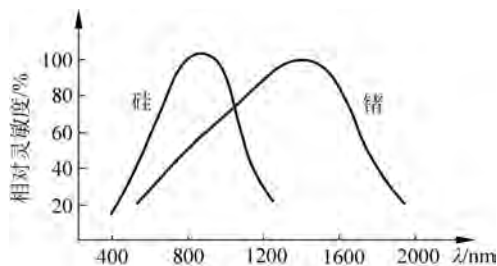


图 5-43 光敏晶体管的光谱特性曲线

3. 伏安特性

图 5-44 所示为硅光敏晶体管在不同光照下的伏安特性曲线。从特性曲线可以看出,光敏晶体管在偏置电压为零时,无论光照有多强,集电极电流都为零,这说明光敏晶体管必须在一定的偏置电压下才能工作。偏置电压要保证光敏晶体管的发射结处于正向偏置,而集电结处于反向偏置状态。随着偏置电压的增大,伏安特性曲线趋于平坦。但是,与光敏二极管的伏安特性曲线不同,光敏晶体管的伏安特性曲线向上倾斜,间距增大。这是因为光敏晶体管除具有光电灵敏度外,还具有电流增益 β , 并且 β 值随光电流的增大而增大。

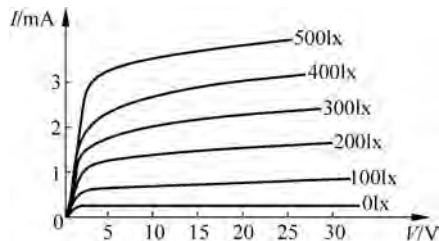


图 5-44 硅光敏晶体管伏安特性曲线

特性曲线的弯曲部分为饱和区,在饱和区光敏晶体管的偏置电压提供给集电结的反偏电压太低,集电极的收集能力低,造成三极管饱和。因此,应使光敏晶体管工作在偏置电压大于 5V 的线性区域。

4. 频率特性

光敏晶体管的时间响应常与 PN 结的结构及偏置电路等参数有关。光敏晶体管输出电路的微变等效电路如图 5-41(b)所示。选择适当的负载电阻,使其满足 $R_L < R_{ce}$, 这时可以导出光敏晶体管电路的输出电压为

$$V_o = \frac{\beta R_L I_p}{(1 + \omega^2 r_{be}^2 C_{be}^2)^{1/2} (1 + \omega^2 R_L^2 C_{ce}^2)^{1/2}} \quad (5-34)$$

可见,光敏晶体管的时间响应由以下四部分组成: ①光生载流子对发射结电容 C_{be} 和集电结电容 C_{bc} 的充放电时间; ②光生载流子渡越基区所需要的时间; ③光生载流子被收

集到集电结的时间；④输出电路的等效负载电阻 R_L 与等效电容 C_{be} 所构成的 RC 时间。总时间常数为上述四项之和，因此它比光敏二极管的响应时间要长得多。

光敏晶体管常用于各种光电控制系统，其输入的信号多为光脉冲信号，属于大信号或开关信号，因而光敏晶体管的时间响应是非常重要的参数，直接影响光敏晶体管的质量。

为了提高光敏晶体管的时间响应，应尽可能地减小发射结阻容时间常数 $r_{be}C_{be}$ 和时间常数 $R_L C_{ce}$ 。也就是一方面在工艺上设法减小结电容 C_{be} 、 C_{ce} ；另一方面要合理选择负载电阻 R_L ，尤其在高频应用的情况下应尽量降低负载电阻 R_L 。

5. 温度特性

硅光敏二极管和硅光敏晶体管的暗电流 I_D 和亮电流 I_L 均随温度变化而变化。由于硅光敏晶体管具有电流放大功能，所以其暗电流 I_D 和亮电流 I_L 受温度的影响要比硅光敏二极管大得多。图 5-45(a) 所示为光敏二极管与光敏晶体管暗电流 I_D 的温度特性曲线，随着温度的升高，暗电流增长很快。图 5-45(b) 所示为光敏二极管与光敏晶体管亮电流 I_L 的温度特性曲线，光敏晶体管亮电流 I_L 随温度的变化要比光敏二极管快。由于暗电流的增加，使输出的信噪比变差，不利于弱光信号的检测。在进行弱光信号的检测时应考虑温度对光电器件输出的影响，必要时应采取恒温或温度补偿的措施。

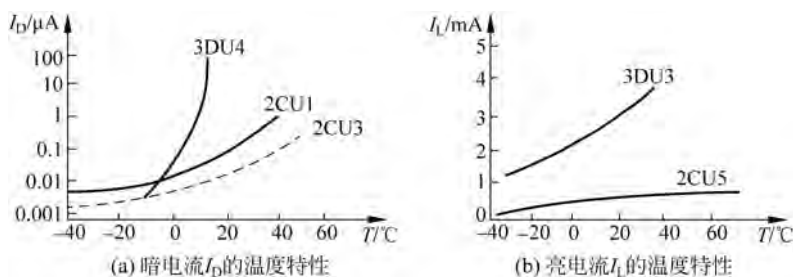


图 5-45 光敏晶体管的温度特性曲线

6. 噪声

光敏晶体管的噪声主要有器件中光电流的散粒噪声、暗电流的散粒噪声和器件的热噪声。在反偏压工作时，内阻很大，器件本身的热噪声可以忽略不计。

7. 入射特性

光敏晶体管与光敏二极管具有相同的入射特性。由光敏晶体管入射窗口的不同封装而造成灵敏度随入射角而变化。入射窗由玻璃或塑料制成，一般有聚光透镜和平面玻璃。聚光透镜入射窗的优点是能够把入射光会聚于面积很小的光敏面上，以提高灵敏度。平面玻璃入射窗使用比较简单，但易受到杂散光的干扰，聚光作用差，光易受到反射，极值灵敏度下降。

5.3.3 常用光敏晶体管

国产光敏晶体管的型号是 3DU $\times\times$ 系列和 3CU $\times\times$ 系列。表 5-3 所示为常用光敏晶体管的特性参数。在应用时要注意它的极限参数 V_{CEM} 和 V_{CE} ，不能使工作电压超过 V_{CEM} ，否则，将损坏光敏晶体管。

表 5-3 常用光敏晶体管的特性参数

型号	反向击穿电压 V_{CEM}/V	最高工作电压 V_{CE}/V	暗电流 $I_D/\mu A$	亮电流 I_L/mA	时间响应 $\tau/\mu s$	峰值波长 λ_m/nm	最大功耗 P_M/mW
3DU111	≥ 15	≥ 10	≤ 0.3	$0.5\sim 1.0$	≤ 6	880	30
3DU112	≥ 45	≥ 30					50
3DU113	≥ 75	≥ 50					100
3DU121	≥ 15	≥ 10		$1.0\sim 2.0$			30
3DU123	≥ 75	≥ 50					100
3DU131	≥ 15	≥ 10		≥ 2.0			30
3DU133	≥ 75	≥ 50					100
3DU4A	≥ 30	≥ 20	1	5	5	880	120
3DU4B	≥ 30	≥ 20	1	10	5	880	120
3DU5	≥ 30	≥ 20	1	3	5	880	100

5.3.4 光敏晶体管的应用

1. 脉冲编码器

脉冲编码器(Pulse Encoder)的电路原理如图 5-46 所示。 V_i 是电源电压, V_o 是输出电压, A 和 B 是发光二极管和光敏晶体管。转轴以转速 n 转动时,辐条数为 N 的光栅转盘也转动,输出电信号为频率 $f=nN$ 的脉冲。

2. 光电数字转速传感器

光电数字转速传感器的电路原理如图 5-47 所示。接收光信号的是光敏二极管或三极管。由脉冲编码器原理, $n=f/N$,用频率计测出 f ,就可得到转速 n 。

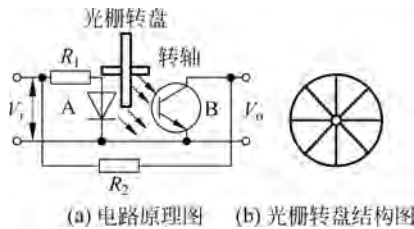


图 5-46 脉冲编码器电路原理

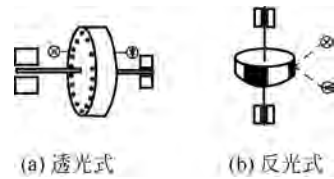


图 5-47 光电数字转速传感器电路原理

3. 电子蜡烛

电子蜡烛的电路原理如图 5-48 所示。接通电源后,当光敏晶体管 3DU 无光照时晶闸管 VS 触发端 G 因无触发电流而关断,灯 ZD 不亮。当点燃火柴并靠近 3DU 时,其 c、e 极间电阻迅速降低,VS 导通,灯亮。当火柴熄灭后,由于 VS 有自锁功能,灯一直亮着。若对着气动开关 SA1 吹气,SA1 的动片被吹离触点,切断了灯和 VS 的电源,灯灭。由于 VS 有自锁功能,SA1 复原接通电源,灯也不会亮,只有再点燃火柴用光照光敏晶体管才行。

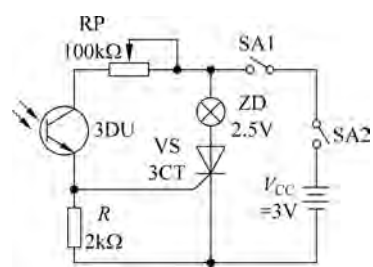


图 5-48 电子蜡烛电路原理

可见,灯就像电子蜡烛一样。

5.4 PIN 光敏二极管

普通的 PN 结光敏二极管在光电检测中有两个主要缺点。第一, RC 时间常数的限制。由于 PN 结耗尽层的电容不是足够小,使得 PN 结光敏二极管无法对高频调制信号进行光电检测。第二, PN 结耗尽层宽度至多几微米。入射的长波长光子穿透深度远大于耗尽层的宽度,大多数光子被耗尽层外的中性区域吸收而产生光电子—空穴对。这些电子—空穴对仅有扩散运动而不能在内建电场作用下发生漂移运动。因而对长波长光子入射到 PN 结光电二极管而言,其量子效率低,响应速度慢。光子入射硅材料,穿透深度 h 与入射光子波长 λ 关系如图 5-49 所示。PIN 光敏二极管通过适当选择耗尽层的厚度可以获得较大的输出电流、较高的灵敏度和较好的频率特性,频率带宽可达 10GHz,适用于高频调制光信号探测场合。

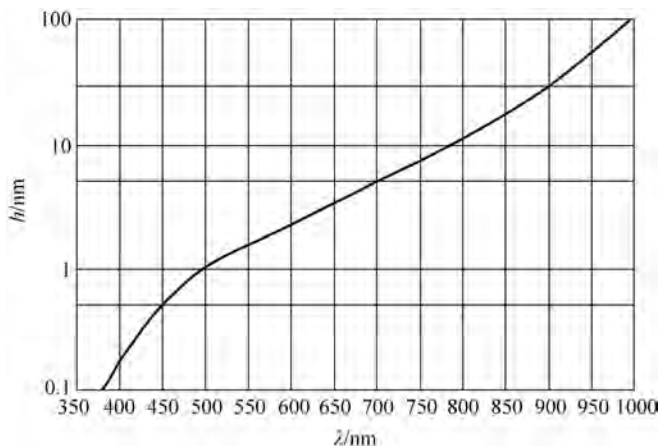


图 5-49 穿透深度与入射光子波长关系曲线图

5.4.1 PIN 光敏二极管的结构与工作原理

如图 5-50(a)所示,理想 PIN 光敏二极管的结构是 P^+IN^+ (P^+ -Intrinsic- N^+)。其中, P^+ 代表重掺杂空穴型半导体材料区, I 表示本征半导体材料区, N^+ 代表重掺杂电子半导体材料区。本征半导体 I 层掺杂的浓度比 P^+ 层和 N^+ 层要少很多,宽度比 P^+ 层和 N^+ 层要宽,一般为 $5\sim 50\mu\text{m}$,视具体情况会有所不同。

理想的 PIN 光敏二极管中, I 层看作高阻本征半导体。无光照射到 PIN 光敏二极管受光面时, P^+ 层多子空穴扩散到 I 层, N^+ 层多子电子扩散到 I 层,在 I 层它们相互抵消。这样在 P^+ 层与 I 交界面显露出很薄的一负电荷层,在 N^+ 层与 I 交界面显露出很薄的一正电荷层,如图 5-50(b)所示,空间电荷分布两边的电荷层被厚度为 W 的 I 层分开。如图 5-50(c)所示,在本征 I 层,宽度为 W 的区域内形成从正离子层到负离子层的内建均匀电场 E_0 。这与普通 PN 结光敏二极管非均匀的内建电场不一样。在没有外加偏置电压的条件下,内部电场 E_0 阻止多数载流子进一步扩散到 I 层,从而保持电荷平衡。



5.4.1
微课视频

PIN 中很薄的正电荷和负电荷层被分开一段固定的距离,即 I 层的宽度 W ,类似于平行板电容器。PIN 光敏二极管的结或耗尽层的电容大小为

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{W} \quad (5-35)$$

式中: A ——光敏二极管的横截面积;

ϵ_r, ϵ_0 ——硅的介电常数。

I 层的宽度 W 由结构决定,所以结电容大小并不随着加在 PN 结两端的电压而改变。在快速 PIN 光敏二极管中, C 通常只有一个 pF。所以负载电阻 50Ω 的情况下, RC 时间常数大约为 50ps。

当 PIN 结构外加反偏电压 V_r 时,电压几乎完全加在本征 I 层上。而受主 P^+ 层和施主 N^+ 层中耗尽层厚度与本征 I 层厚度 W 相比可忽略不计。如图 5-50(d) 所示,反偏电压使内部电压从 V_r 增加到 $V_0 + V_r$ 。I 层中的电场 E 仍然和原方向一致,大小为

$$E = E_0 + \frac{V_r}{W} \approx \frac{V_r}{W} \quad (V_r \gg V_0) \quad (5-36)$$

PIN 结构设计是为了使入射光子主要在 I 层吸收产生电子—空穴对。I 层中的光生电子—空穴对被电场 E 分开并各自漂移向 P^+ 层和 N^+ 层,如图 5-50(d) 所示。当 PIN 外接负载电阻形成回路时,就会在回路产生电流,其电流的大小近似等于光电流。PIN 光敏二极管的响应时间主要由光生载流子穿过宽度为 W 的 I 层所消耗的漂移时间决定。增加 W 可以使更多的光子被吸收,这样增加了量子效率,但是降低了响应速度,因为载流子漂移时间增加了。PIN 光敏二极管的响应速率总是受光生载流子穿过 I 层的渡越时间的影响。

当然,图 5-50(a) 所示的 PIN 光敏二极管的结构图是理想化的。实际上, I 层会掺有一些杂质。例如,如果中间层有少量 N 型杂质,通常标记为 V 层,那么这个结构就是 PVN 结构。中间的 V 层变成一个耗尽层,集中了少量正电荷施主离子。这样通过二极管的场强就不是完全的一致。在 PV 结的位置场强最大,从 V 层到 N 层逐渐减小。近似来看,仍然可以认为 V 层就是 I 层。

图 5-50(b) 所示为二极管的空间电荷分布,图 5-50(c) 所示为光敏二极管内建电场分布,图 5-50(d) 所示为反向偏置的 PIN 光敏二极管。

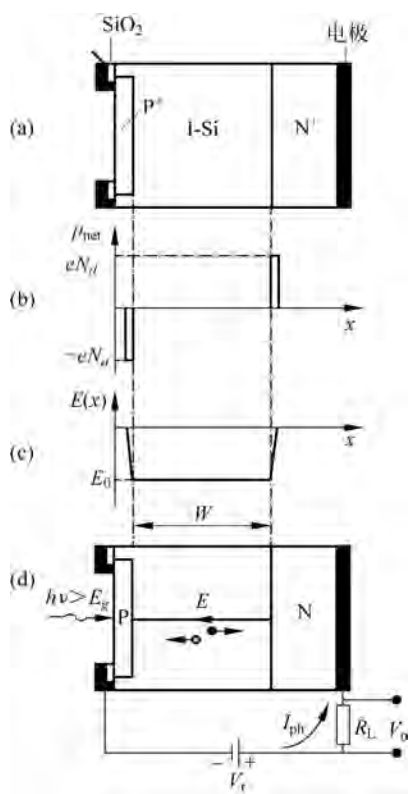


图 5-50 PIN 光敏二极管结构原理、空间电荷分布、内建电场分布与反向偏置的 PIN 光敏二极管

5.4.2 PIN 光敏二极管的主要特性参数

PIN 光敏二极管主要包括以下特性参数。

1. 量子效率和光谱特性

光电转换效率用量子效率 η 表示。量子效率 η 的定义为光辐射时产生的光生电子—空穴对和入射光子数的比值,即



图 5-50 动态效果



5.4.2 微课视频

$$\eta = \frac{\text{光生电子—空穴对}}{\text{入射光子数}} = \frac{I_p/e}{\phi/h\nu} = S \frac{1.24}{\lambda} \quad (5-37)$$

式中: S ——光电灵敏度。

λ 的单位为 μm 。量子效率和灵敏度取决于材料的特性和器件的结构。假设器件表面反射率为零, P^+ 层和 N^+ 层对量子效率的贡献可以忽略, 在反向工作电压下, I 层全部耗尽, 那么 PIN 光敏二极管的量子效率可以近似表示为

$$\eta = 1 - \exp[-\alpha(\lambda)W] \quad (5-38)$$

式中: $\alpha(\lambda)$ 、 W ——分别为 I 层的吸收系数和厚度。

由式(5-38)可以看到, 当 $\alpha(\lambda)W \gg 1$ 时, $\eta \rightarrow 1$, 所以为提高量子效率 η , I 层的厚度 W 要足够大。

量子效率的光谱特性取决于半导体材料的吸收光谱 $\alpha(\lambda)$, 对长波长的限制由 $\lambda_c = hc/E_g$ 确定。图 5-51 示出量子效率 η 和灵敏度 S 的光谱特性。由图可见, Si 适用于 $0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 波段, Ge 和 InGaAs 适用于 $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波段。PIN 光电灵敏度一般为 $0.5 \sim 0.6 \text{ A/W}$ 。

2. 响应时间和频率特性

光敏二极管的响应时间用累积电荷变为外部电流所需要的时间衡量, 通常表示为上升时间或截止频率。对于数字脉冲调制信号, 把光生电流脉冲前沿由最大幅度的 10% 上升到 90%, 或后沿由 90% 下降到 10% 的时间, 分别定义为脉冲上升时间 t_r 和脉冲下降时间 t_f 。

PIN 光敏二极管响应时间或频率特性主要由光敏二极管 RC 时间常数 t_1 、扩散时间 t_2 、光生载流子在 I 层的漂移时间 t_3 三个因素决定。

(1) 电容 C_i 和负载电阻 R_L 的时间常数。时间常数 t_1 由光敏二极管的终端电容 C_i 和负载电阻 R_L 决定。 C_i 是二极管结电容和封装寄生电容的总和, t_1 可表示为

$$t_1 = 2.2 \times C_i \times R_L \quad (5-39)$$

为了缩短 t_1 , 设计时必须减小 C_i 或 R_L 。 C_i 和光照有效面积 A 成比例, 和耗尽层宽度 W 成反比, 耗尽层的宽度与材料的电阻率 ρ 和反向电压 V_r 成正比, 即

$$C_i \approx \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{\{(V_r + 0.5) \times \rho\}^{2 \sim 3}} \quad (5-40)$$

(2) 光生载流子的扩散时间 t_2 。当光照射到 PN 结上被二极管芯片的有效面积吸收, 会在耗尽层外产生光电子—空穴对。这些载流子扩散到 I 层内所需要的时间为扩散时间, 这些载流子扩散的时间有时会大于几微秒。

(3) 载流子在 I 层的漂移时间 t_3 。载流子在耗尽层的漂移速度 v_d 用迁移率 μ 和耗尽层电场强度 E 表示, $v_d = \mu E$, 假设耗尽层宽度为 W , 外加电压为 V_r , 那么平均电场强度 $E = V_r/W$, 则 t_3 表示为

$$t_3 = W/v_d = W^2/(\mu V_r) \quad (5-41)$$

以上的三个因素决定二极管的上升时间 t_r , t_r 可表示为

$$t_r = \sqrt{t_1^2 + t_2^2 + t_3^2} \quad (5-42)$$

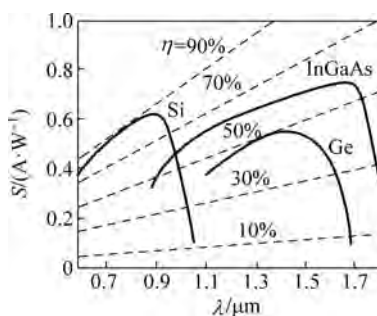


图 5-51 PIN 光敏二极管灵敏度 S 、量子效率 η 与波长 λ 的关系

为了缩短 t_1 , 二极管应该减小 A , 增大反向偏置电压。然而, 增大反向偏置电压会增大暗电流, 所以在微光检测时应谨慎考虑。另外, 在结构上采用同轴封装和微带结构可以减小管壳电容, 从而减小 t_1 。 t_2 可通过减少零场区来减小。减小耗尽层宽度 W , 可以减小渡越时间 t_3 , 从而提高截止频率 f_c , 但是同时要降低量子效率 η 。所以, 为减小上升时间 t_r , 各影响因素之间应适当取舍。

对于幅度一定, 频率为 $\omega = 2\pi f$ 的正弦调制信号, 用 PIN 光敏二极管光电流下降 3dB 的频率定义为截止频率 f_c 。其截止频率 f_c 与上升时间 t_r 的关系为

$$f_c = \frac{0.35}{t_r} \quad (5-43)$$

由电路 RC 时间常数限制的截止频率

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_t C_t} \quad (5-44)$$

式中: R_t ——光敏二极管的串联电阻和负载电阻的总和;

C_t ——结电容和管壳分布电容的总和。

3. 噪声

噪声是反映 PIN 光敏二极管特性的一个重要参数, 它直接影响器件的光电灵敏度。PIN 光敏二极管的噪声主要包括由信号电流和暗电流产生的散粒噪声和由负载电阻和后继放大器输入电阻产生的热噪声。

1) 散粒噪声

$$\overline{i_{ns}^2} = 2e(I_p + I_d)\Delta f \quad (5-45)$$

式中: e ——电子电荷;

Δf ——测量频带宽度;

I_p 、 I_d ——分别为信号电流和暗电流。

第一项 $2eI_p\Delta f$ 称为量子噪声, 是由于入射光子和所形成的电子—空穴对都具有离散性和随机性而产生的。只要有光信号输入就有量子噪声。这是一种不可克服的本征噪声, 它决定光电探测器器件灵敏度的极限。第二项 $2eI_d\Delta f$ 是暗电流产生的噪声。暗电流是器件在反偏压条件下, 没有入射光时产生的反向直流电流, 它包括晶体材料表面缺陷形成的泄漏电流和载流子热扩散形成的本征暗电流。暗电流与光敏二极管的材料和结构有关。

2) 热噪声

$$\overline{i_{nj}^2} = \frac{4kT\Delta f}{R} \quad (5-46)$$

式中: k ——玻尔兹曼常数;

T ——热力学温度;

R ——器件等效电阻, 热噪声的产生是负载电阻和放大器输入电阻并联的结果。

因此, PIN 光敏二极管的总均方噪声电流为

$$\overline{i_n^2} = 2e(I_p + I_d)\Delta f + \frac{4kT\Delta f}{R} \quad (5-47)$$

5.4.3 典型的 PIN 光敏二极管及其应用

根据材料的不同和加工工艺的不同, 可以做出在不同波长、速度、容量等参数下适合应

用需求的最优产品。表 5-4 列出了不同类型的典型的 PIN 光敏二极管。

表 5-4 典型 PIN 光敏二极管的特性

型号	光敏面 直径 /mm	峰值 波长 /nm	灵敏度 /(A·W ⁻¹)	电容 /pF	暗电流 /nA	噪声等 效功率 /(W·Hz ^{-1/2})	最大反 偏电压 /V	上升 时间 /ns	工作温度 /℃
PIN-HR005	0.127	800	0.5	0.8	0.03	5.0e-15	15	0.60	-25~+85
PIN-HR008	0.203	800	0.5	0.8	0.03	5.0e-15	15	0.60	-25~+85
PIN-HR020	0.508	800	0.5	1.8	0.06	7.1e-15	15	0.80	-25~+85
PIN-HR026	0.660	800	0.5	2.6	0.1	1.0e-14	15	0.90	-25~+85
PIN-HR040	0.991	800	0.5	4.9	0.3	1.9e-14	15	1.0	-25~+85

注：测试条件 T=23℃，反偏电压 5V，测试波长 830nm。

PIN 硅光敏二极管是一种将可见光和近红外信号转变为电信号的器件，主要应用于光纤通信、激光技术、可见和近红外接收、测距、测温、微光功率和微电流测量等方面。下面给出两个 PIN 光敏二极管的应用实例。

1. 光纤通信中的光接收机

光电检测器是光纤通信系统的一个核心器件。借助光电检测器可以完成光信号到电信号的变换。为了实现光的解调或光电变换，在实际系统中还要将光电检测器、放大电路、均衡滤波电路、自动增益控制电路及其他电路构成一体，形成所谓的光接收机，如图 5-52 所示。

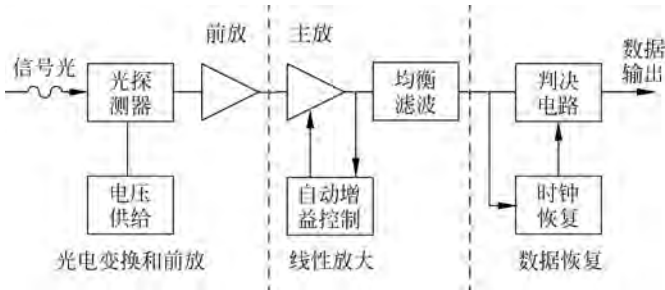


图 5-52 光接收机原理组成图

因此，光接收机在整个光纤通信系统中具有相当重要的作用，它的好坏将直接决定着系统性能的优劣。光电检测器是光接收机的关键器件，它的功能是把光信号转换为电信号，PIN 光敏二极管是目前常用的光检测器。图 5-53(a)所示为用于光接收机上的专用 PIN 光敏二极管，型号为 OPD-124PFCA。图 5-53(b)所示为光接收机产品图。



图 5-53 光敏二极管与光接收机

2. 脉冲式激光峰值功率计

脉冲式激光峰值功率计的原理如图 5-54 所示。它是测量脉冲式激光器峰值功率值的仪器。基本原理与一般功率计相同,但测量对象是脉冲光。激光脉冲信号的特点主要是脉冲信号宽度很窄,在 ns 量级,且存在单脉冲或低重复率脉冲以及高重复率信号等多种形式,因此,激光信号远视场情况下的综合测试,主要解决对脉冲激光的响应灵敏度、响应速度、高速宽带信号的采集处理,以及重复频率、峰值功率标定的问题。在保证光电探测器工作在线性范围的条件下,选用响应速度极快且使用方便的 PIN 光敏二极管作为探测器,以保证其高的响应速度和可靠性,同时选用高速宽带运算放大器,以保证其信号完整真实地输出。

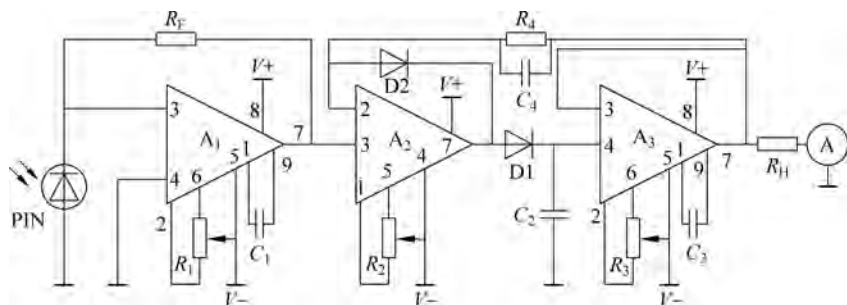


图 5-54 脉冲式激光峰值功率计原理图

5.5 雪崩光敏二极管

雪崩光敏二极管(Avalanche Photodiode, APD)是一种具有高灵敏度、高响应度的光伏探测器。通常硅和锗雪崩光敏二极管的电流增益可达 $10^2 \sim 10^4$,且响应速度极快,带宽可达 100GHz。由于其具有探测灵敏度高、带宽高、低噪声等特点,被广泛运用于微弱光信号检测、激光测距、长距离光纤通信及光纤传感等领域中,是一种非常理想的光电探测器件。

5.5.1 雪崩光敏二极管的原理

在光敏二极管的 PN 结上加一个高的反向偏压(约 100~300V),PN 结区会产生很强的电场。当光生载流子进入结区后,会在强电场(约为 $3 \times 10^5 \text{ V/cm}$)的作用下加速从而获得很大的能量。定向运动的高能量载流子与晶格原子发射碰撞,使晶格原子发生电离,产生新的电子—空穴对;新的电子—空穴对在强电场的作用下获得足够的能量,再次与晶格原子发生碰撞,又产生新的电子—空穴对。这个过程不断重复,使 PN 结内电流急剧倍增效大,这种现象称为雪崩倍增效应,如图 5-55 所示。雪崩光敏二极管能够获得内部增益是基于碰撞电离效应,这种效应产生了光电流放大。

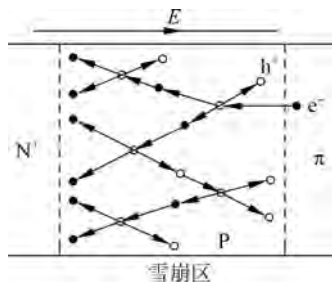


图 5-55 雪崩光敏二极管工作原理



5.5.1
微课视频



图 5-55
动态效果

5.5.2 达通型雪崩光敏二极管的结构、电场、电荷分布

图 5-56(a)所示为达通型雪崩光敏二极管(Reach-through APD, RAPD)结构示意图。光通过入射窗口照射到薄的 N^+ 层上。靠近 N^+ 层是三种不同掺杂浓度的 P 型层,用于适当调节二极管中的电场分布。第一层是薄的 P 型层,第二层是很厚、轻掺杂的 π 层(几乎是本征半导体),第三层是高掺杂的 P^+ 层。当二极管接反向偏压时,耗尽层的电场加强。在已知掺杂离子的情况下二极管中空间净电荷的分布如图 5-56(c)所示。当反向偏压为零的时候,P 区域的耗尽层一般并不穿透 P 型层向 π 层扩散。当足够高的反向电压加到二极管的两侧时,在 P 型层区域的耗尽层逐渐拓宽直至进入 π 层。电场从在 N^+ 层里的薄的耗尽层里的带正电荷的施体开始一直“达通”到 P^+ 层里薄的耗尽层里的带负电受体处结束。

在图 5-56(a)中的两端电极间加上电压 V_r ,两电极间的空间净电荷密度 ρ 就会产生电场强度 E 。在两电极间的电场强度变化情况如图 5-56(b)所示。存在于 P、 π 、 P^+ 层中的电场线开始于正离子,结束于负离子。在整个电场空间中, N^+ P 结处电场强度最大,在 P 型层逐渐减小。在穿透 π 型层时,由于 π 型层中空间净电荷密度很小,电场几乎为匀强电场。电场强度消失在 P^+ 层里的狭窄的耗尽层。

由于 π 型层比较厚,因此在这个厚的区域中利于光子吸收而产生电子—空穴对。产生的电子—空穴对在均匀电场的作用下,分别朝相反的方向以较大的速度朝着 N^+ 层和 P^+ 层运动。当漂移电子以大的速度到达 P 层时会继续获得能量,获得高动能的光生电子和空穴(比 E_g 要大)与硅晶格原子碰撞,使硅的共价键电离而又释放电子—空穴对。二次电子—空穴对这个区域高电场的作用下获得足够大的动能,又与硅晶格原子碰撞电离释放出更多的电子—空穴对,这样就形成了一个碰撞电离的“雪崩”的过程。如此,一个电子进入 P 层,导致大量的电子—空穴对形成,从而产生能够测量的光生电流。由于一个光敏二极管吸收一个单独的电子就能够产生大量的电子—空穴对,这就是内部增益机理。

5.5.3 雪崩光敏二极管的主要特性参数

1. 雪崩倍增系数 M

雪崩区域的载流子的倍增程度取决于碰撞电离,而碰撞电离很大程度上取决于这个区域的电场强度,进而取决于反向电压 V_r 。雪崩光敏二极管的雪崩倍增系数 M (Avalanche MultiPlication Factor)定义为

$$M = \frac{I_p}{I_{p0}} \quad (5-48)$$

APD 的光电流是指 APD 在反向偏置工作条件下,由于入射光产生光生载流子在强光

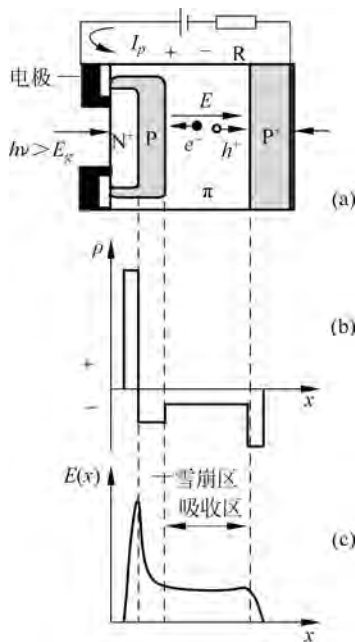


图 5-56 雪崩光敏二极管结构、电场、电荷分布



图 5-56 动态效果



5.5.3 微课视频

场内的定向运动产生的雪崩效应而产生的电流。光电流的大小与 APD 的偏置电压、入射光波长、环境温度等有关。光电流与偏置电压的关系曲线如图 5-57(c)所示。

I_p 是雪崩光敏二极管倍增时的输出电流, I_{p0} 是无倍增时的输出电流。雪崩倍增系数 M 是与反向偏置电压和温度有关的函数。实验发现, 倍增系数 M 可以表示为

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_r}{V_{br}}\right)^n} \quad (5-49)$$

式中: V_{br} ——雪崩击穿电压;

V_r ——外加反向偏压。

n 是取决于半导体材料、掺杂分布及辐射波长, 通常硅材料的 $n=1.5\sim 4$; 锗材料的 $n=2.5\sim 8$ 。 V_{br} 和 n 都和温度有密切的关系, 当温度升高时, 非离子化散射增大, 使得碰撞电离系数降低, 增益降低, 击穿电压会增加, 因此为了得到同样的倍增因子, 不同的温度就要加不同的反向偏压, 如图 5-57(a)所示。

由式(5-49)可知, 当外加电压 V_r 增加到接近 V_{br} 时, M 趋于无限大, 此时 PN 结将发生击穿。图 5-57(a)所示为 AD500-8 型雪崩光敏二极管的倍增因子和偏置电压的关系曲线。由图 5-57(a)可知, 在偏压较小情况下, 基本没有雪崩效应, 随电压增加, 将引起雪崩效应, 使光电流有较大的增益。

2. 雪崩光敏二极管暗电流

APD 的暗电流有无雪崩暗电流和倍增后的暗电流之分, 它随倍增因子的增加而增加, 如图 5-57(b)所示。此外, 还有漏电流, 漏电流没有经过倍增。

3. 雪崩光敏二极管噪声

雪崩光敏二极管中除了普通光敏二极管散粒噪声外, 由于其载流子是碰撞电离产生的, 因此碰撞的随机性和不规则性会导致附加的噪声。对于雪崩光敏二极管, 当雪崩倍增 M 倍以后, 雪崩光敏二极管噪声电流可近似地表示为

$$\overline{i_n^2} = 2eI(I_p + I_d)M^n \Delta f + \frac{4kT\Delta f}{R_L} \quad (5-50)$$

式中, 指数 n 是与 APD 光敏面的材料有关的系数, 对于硅管通常为 $2.3\sim 2.5$; 对于锗管通常为 3。

雪崩光敏二极管输出信噪比为

$$S/N = \frac{I_p^2 M^2}{2eI(I_p + I_d)M^n \Delta f + \frac{4kT\Delta f}{R_L}} \quad (5-51)$$

上式表明, 雪崩光敏二极管的信噪比随倍增因子变化而变化。随反向偏压的增加, M 增大, 信号功率增加, 散粒噪声也增加, 但热噪声不变, 总的信噪比会增加。当反向偏压进一步增加后, 散粒噪声增加很多, 而信号功率的增加减缓, 总的信噪比又会下降。

4. APD 时间响应特性

响应时间用来表示脉冲激光入射到探测器上所引起的响应快慢。由于脉冲激光的脉宽通常很窄, 为了能够探测到脉冲激光的大小及其变化, 探测器的响应时间必须短于脉冲激光的变化时间。在 APD 的极间存在等效电容, 影响着 APD 的时间响应特性。随着反向偏置电压的增大, 电容值逐渐减小, APD 的响应时间加快, 如图 5-57(d)所示。

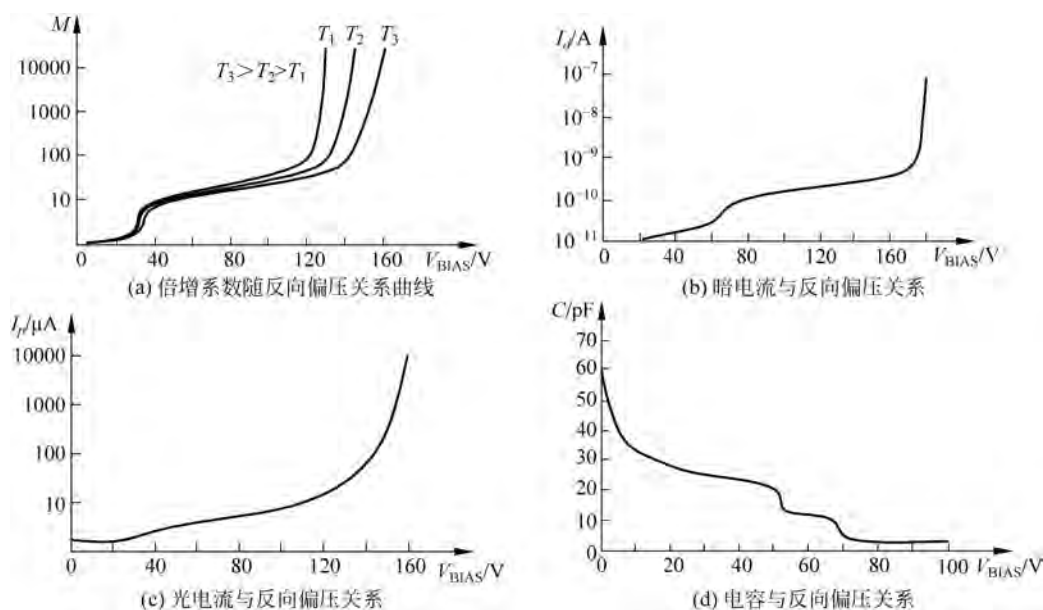


图 5-57 APD 特性参数与偏压关系曲线

5.5.4 典型的雪崩光敏二极管及其应用

不同型号的雪崩光敏二极管对光谱范围灵敏度不一样,响应速度不一样,应用场合也不一样。表 5-5 列出了不同类型的典型雪崩光敏二极管的相关特性参数。

表 5-5 典型 APD 光敏二极管的特性

型号	光敏面直径/mm	峰值波长/nm	灵敏度/(A/W)	电容/pF	暗电流/nA	反偏电压范围/V	上升时间/ns	工作温度/℃
APD-300	0.3	820	42	1.5	1.0	130~280	0.4	-40~+70
APD-500	0.5	820	42	2.5	1.8	130~280	0.5	-40~+70
APD-900	0.9	820	42	7	2.5	130~280	1.0	-40~+70
APD-1500	1.5	820	42	12	7.0	130~280	2.0	-40~+70
APD-3000	3.0	820	42	40	15	130~280	5.0	-40~+70

注: 测试条件 $T=23^{\circ}\text{C}$, 测试波长 850nm, 增益 100。

雪崩光敏二极管通常应用在微弱光信号处理中,也用在高调制频率的应用中。典型的包括光通信和弱信号条件下的测距。

1. 雪崩光敏二极管在模拟光接收机中的应用

在目前的光纤通信接收机中,光电检测器通常使用 PIN 光敏二极管和 APD 雪崩光敏二极管。当入射功率较小时, PIN 管产生的信号电流非常微弱,经过信号放大和处理,引入的放大器噪声将严重地降低光接收机的灵敏度。为了克服这个缺点,有必要设法在放大器之前加大光电检测器的输出信号电流。也就是说,需要在光电检测器中提供信号增益, APD 管就是基于这个目的而设计的一种光电检测器。APD 管的使用有效地减少了放大器噪声的影响,提高了光接收机的灵敏度。但 APD 管的成本比 PIN 管高,电路也复杂,所以

在实际应用中考虑应用需求和使用范围来合理选取。图 5-58 所示为 APD 光接收机原理方框图。



图 5-58 APD 光接收机原理方框图

使用 APD 管的光接收机,它除了前置放大器、主放大器、均衡器和滤波器等 PIN 管接收机也有的部分外,还加有 DC-DC 变换器、雪崩增益控制电路等。所以它的电路较 PIN 管接收机复杂,成本也比它高。

2. 雪崩光敏二极管恒虚警率控制在激光成像系统中的应用

雪崩光敏二极管以其接收灵敏度高、响应速度快等优点,常用于扫描式激光成像系统中。由于雪崩光敏二极管的工作电压随背景和温度的变化而变化,因此正确设置其工作偏压,对充分发挥接收系统的探测灵敏度是非常重要的。采用恒虚警方法控制 APD 接收机输出的噪声,使其工作在最佳倍增因子状态。恒虚警控制电路的原理:一方面调整雪崩光敏二极管的偏压,使其随环境、温度等的变化而变化,信号检测时保持虚警率恒定;另一方面,对较小但快速变化的环境参数,则采用自动调整门限电压 V_{ref} 来控制虚警率恒定。在激光成像的应用中,主要的快速变化环境参数来自背景光强弱的变化。

恒虚警控制电路结构如图 5-59 所示。系统主要利用恒虚警控制接收系统的噪声,通过控制高压调整器,使 APD 的倍增因子变化,改变光接收系统的噪声大小从而形成反馈形式。当输入噪声电平较大时(即背景噪声大或温度低时),视频放大器输出电平送到比较器 2,经过门限控制处理器 V_3 输出相应较多的噪声脉冲信号,单位时间内传送给 CPU 的噪声脉冲信号也较多,由 CPU 处理后通过 D/A 转换器转换为电压 V_H 去控制高压调整器,使 APD 的偏压下降,减少 APD 的倍增因子,从而降低光电接收系统的输出噪声。反之,当输入噪声电平较小时(即背景噪声小或温度高时),经过门限控制处理器输出相应较少的噪声脉冲信号,单位时间内传送给 CPU 的噪声脉冲信号也相应较少,经 CPU 处理后通过 D/A 转换器转换为电压 V_H 去控制高压调整器,使 APD 的偏压上升,增加 APD 的倍增因子,从而增加光电接收系统的输出噪声,这种综合控制使接收系统的输出噪声相对恒定。由于 V_H 的调整涉及数百伏的高压,因此这种调整过程需要一定的过渡时间,且由于采用反馈控制方法,实际上一个调整周期中需要多次调整 V_H 才能达到稳定值,因此这种处理是慢恒虚警处理。对于较小但有快速响应要求的环境,采用自动调整门限电压 V_{ref} 来实现反馈控制,即通过对 V_3 (门限处理器输出的噪声脉冲信号)在单位时间计数的数目,由 CPU 来判断 V_{ref} 值的增加或减小。当噪声脉冲信号多时, V_{ref} 值增大,当噪声脉冲信号少时, V_{ref} 值减小,使比较器的门限电压跟随输入噪声的起伏而自动变化,由此在小范围内快速控制光电接收系统的虚警率恒定。为了有效抑制杂波、毛刺、减小虚警率,增加抗噪声干扰的能力,比较器 1 的比较电平 V_1 应略高于比较器 2 的比较电平 V_2 ,并始终保持一个压差。恒虚警控制电路在

激光成像系统中成功运用并取得了较好的效果。

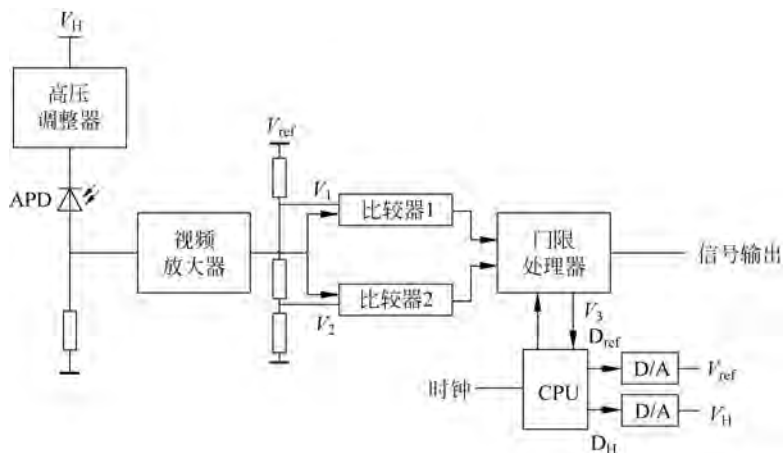


图 5-59 恒虚警控制电路

5.6 色敏探测器

自然界中有各种各样的颜色,物体对光的选择吸收是产生颜色的主要原因。随着现代工业生产向高速化、自动化方向的发展,颜色识别得到了越来越广泛的应用。而生产过程中长期以来由人眼起主导作用的颜色识别工作将越来越多地被相应的颜色传感器所替代。色敏探测器可以应用于印染、油漆、汽车等行业,也可以装在自动生产线上对产品的颜色进行监测。

5.6.1 色敏探测器的结构与工作原理

1. 双结硅色敏探测器原理

色敏探测器(Color Sensor)是半导体光伏效应器件的一种,是基于内光电效应将光信号转换为电信号的光辐射探测器件。可直接测量从可见光到近红外波段内单色辐射的波长。双结色敏探测器(Color Sensor with Double PN Junction)由同一硅片上两个深浅不同的PN结构成,PD₁结为浅结,PD₂结为深结。其工作原理图和等效电路图如图5-60所示。在光照射时,P⁺、N和P三个区域及其耗尽层区均有光子吸收,但是由于入射光子波长不同从而导致不同深度的吸收效率不同。短波长的光吸收系数大,穿透很短距离就被吸收完毕,因此浅结对短波长光灵敏度较高。而长波长光吸收系数小,入射光子主要在深结处被吸收,因此,深结对长波长灵敏度较高。即导体中不同的区域对不同的波长具有不同的灵敏度,光谱响应曲线如图5-61所示。这就使其具有识别颜色的功能。

当入射光强度保持一定时,器件中两只光敏二极管短路电流比值 I_{sc2}/I_{sc1} 与入射单色

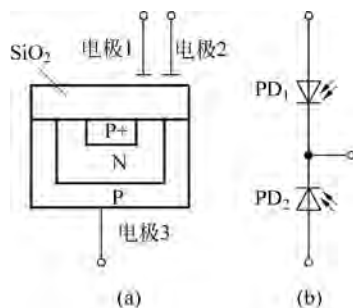


图 5-60 双结色敏传感器工作原理图与等效电路图



5.6.1
微课视频



图 5-60
动态效果

光波长存在一一对应关系,根据标定的曲线及对应关系,即可唯一确定该单色光的波长,如图 5-62 所示。虽然对于固定波长的入射光由于外界环境的影响,在不同时刻同一结输出的电流有起伏,但同一时刻两个结的对数电流比为一定值。

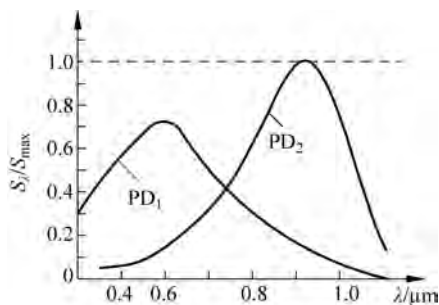


图 5-61 光谱响应曲线

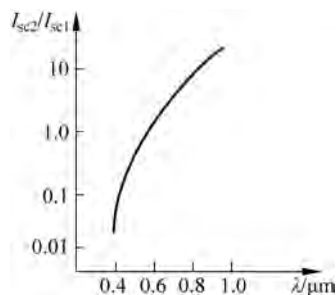


图 5-62 短路电流与入射波长的关系

这种探测器的突出优点是:短路电流比与光强无关,几乎只与入射光波长相关。但色敏器件的输出电流很小,很容易受外界的干扰,因此需要对放大电路进行屏蔽。上述双结光敏二极管只能用于测定单色光的波长,不能用于测量多种波长组成的混合色光,即便已知混合色光的光谱特性,也很难对光的颜色进行精确检测。

2. 全色色敏探测器原理

全色色敏探测器(Panchromatic Color Sensor)是在同一块玻璃衬底基片上集成三个光敏二极管,并同时涂盖一层红、绿、蓝三基色滤色片而成。全色色敏探测器结构示意图如图 5-63 所示。当物体或发光体反射来的光入射到红、绿、蓝三基色滤色片的检测部分上时,光谱响应曲线如图 5-64 所示。该曲线近似于国际照明委员会制定的 CIE1931-RGB 标准色度系统光谱三刺激值曲线,通过对 R、G、B 输出电流的比较,即可识别物体的颜色。

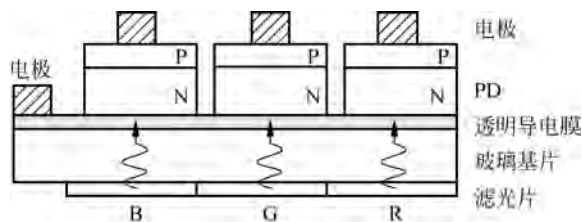
图 5-63
动态效果

图 5-63 全色色敏探测器结构示意图

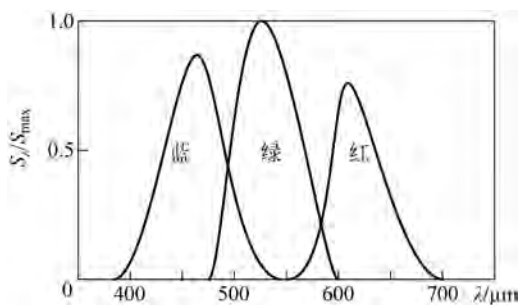


图 5-64 全色色敏探测器光谱响应曲线

5.6.2 色敏探测器的检测电路

1. 双结硅色敏探测器的检测电路

根据双结光敏二极管等效电路,可以设计出如图 5-65 所示的信号处理电路。其中 PD_1 和 PD_2 为两个深浅不同的硅 PN 结,它们的输出分别连接到运算放大器 A_1 和 A_2 的输入端, D_1 、 D_2 作为对数变换元件, A_3 (差动放大器)对 A_1 和 A_2 的输出电压作减法运算,最后得到对应于不同颜色波长的输出电压值,即

$$V_O = V_T (\lg I_{sc1} - \lg I_{sc2}) \frac{R_2}{R_1} \quad (5-52)$$

式中, $V_T = kT/e$,室温条件下, $V_T \approx 26\text{mV}$; I_{sc1} 、 I_{sc2} 分别为 PD_1 、 PD_2 的短路电流; $R_2/R_1 = R_4/R_3$ 为差动放大器 A_3 的电压放大倍数。

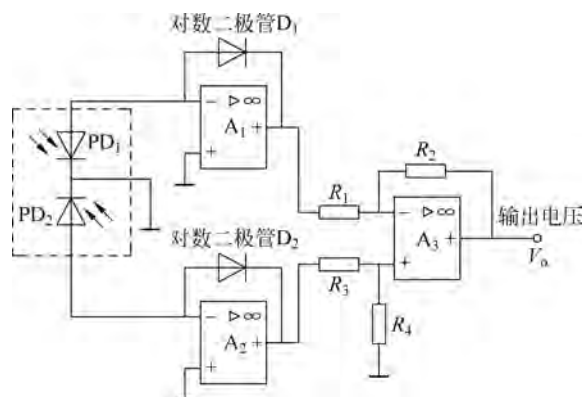


图 5-65 双结硅色敏器件信号处理电路

由于入射光波与 I_{sc1}/I_{sc2} 之间有一一对应关系,根据式(5-52)就可以得到输出电压 V_O 与入射波长之间的关系。因此,只要测出上面信号处理电路的输出电压,就能确定被测光的波长以达到识别颜色的目的。

2. 全色色敏探测器的检测电路

利用全色色敏器件及相关分析手段可以较精确地测定颜色,典型的硅集成三色色敏器件的颜色识别的信号处理电路如图 5-66 所示。从标准光源发出的光,经被测物反射,投射

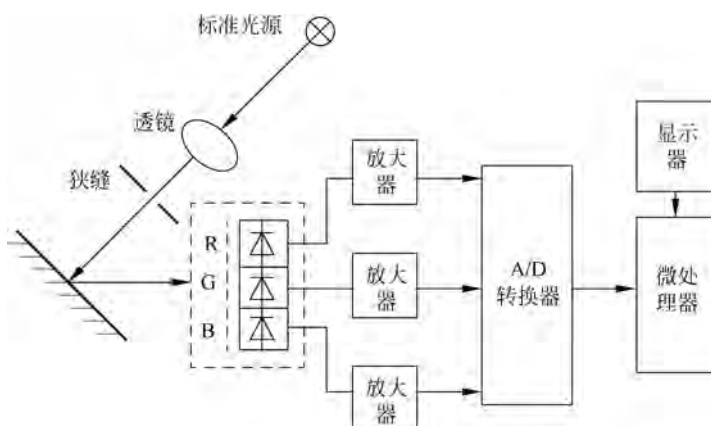


图 5-66 全色色敏器件颜色识别电路框图



5.6.2
微课视频



图 5-66
动态效果

到色敏器件后,R、G、B 三个光敏二极管输出不同的光电流,经运算放大器放大、A/D 转换,将变换后的数字信号输入到微处理器中。微处理器在软件的支持下,在显示器上显示出被测物的颜色。

测量前应对放大器进行调整,使标准光源发出的光经标准白板反射后,照到色敏器件上时应满足 $R=G=B=33\%$ 。

5.6.3 色敏探测器的短路电流比—波长特性

色敏探测器属于特殊的光伏探测器,它的基本特性参数与一般光伏特性器件相同,如时间响应、温度响应等。作为色敏探测器件,不同的特性参数为短路电流比与波长的关系。

短路电流比—波长特性是表征半导体色敏器件对波长的识别能力,是赖以确定被测波长的基本特性。图 5-67 表示上述 PD150 型半导体色敏器件的短路电流比—波长特性曲线。

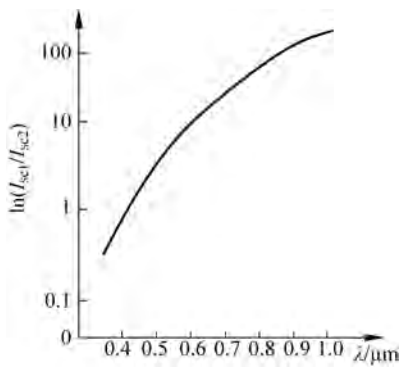


图 5-67 短路电流比—波长特性曲线

5.6.4 两种色敏探测器

1. 色差探测器(Colorimeter)

在一些实际应用中(如分拣、质量监控等行业),并不需要确切了解被测物的具体颜色,而只需要对两个物体的色差进行识别与判断,区别出从一种颜色到另一种颜色的变化。例如,对家用电器、汽车外壳的色彩管理,对纸浆、油漆、彩色钢板等色彩进行读取和控制,只要检测出两种颜色存在一定的色差,就能将它们区分开来。由于其价格便宜,动态响应效果好,能实现在线实时测量,所以除染色等特殊行业外,工业上一般都采用色差探测器。

这种色差探测器不能同时测量颜色的 RGB 值,但通过电流比可以探测单色光,也可以区分两个不同光谱组成的复色光,即色差辨别。Sharp 公司的 PD150 和 PD151 是这种传感器。表 5-6 所示为 PD150、PD151 双结型色敏探测器的特性。

表 5-6 双结型色敏探测器的特性($T_A=25^{\circ}\text{C}$)

型号	最大暗 电流/nA $V_r=1\text{V}$	极间电容 C_{i1}/pF $V_r=0\text{V}$ $f=1\text{MHz}$	极间电容 C_{i2}/pF $V_r=0\text{V}$ $f=1\text{MHz}$	短路电流 $I_{sc1}/\mu\text{A}$ $\lambda=600\text{nm}$ $E_e=50\mu\text{W}/\text{cm}^2$	短路电流 $I_{sc2}/\mu\text{A}$ $\lambda=600\text{nm}$ $E_e=50\mu\text{W}/\text{cm}^2$	短路电 流比 I_{sc1}/I_{sc2} $\lambda=600\text{nm}$	短路电 流比 I_{sc1}/I_{sc2} $\lambda=900\text{nm}$	转换 电压 /V	工作 温度 / $^{\circ}\text{C}$
PD150	10	200	100	0.75	0.19	4	0.22	5	$0\sim+70$
PD151	10	200	100	0.65	0.16	4	0.22	5	$0\sim+70$

2. 全色色敏探测器

全色色敏探测器对相似颜色和色调的检测可靠性较高。全色检测法是通过测量构成物体颜色的三基色实现颜色检测的,所以精密度极高,能准确区别极其相似的颜色,甚至相同颜色的不同色调。RGB 颜色传感器有两种测量模式:一种是分析红、绿、蓝光的比例。因

为检测距离无论怎样变化,只能引起光强的变化,而三种颜色光的比例不会变,因此,即使在目标有机械振动的场合也可以检测。第二种模式是利用红绿蓝三基色的反射光强度实现检测的,利用这种模式可实现微小颜色判别的检测,但传感器会受目标机械位置的影响。无论应用哪种模式,大多数 RGB 颜色传感器都有导向功能,使其非常容易设置,这类传感器大多数都有内建的某种形式的图表和阈值,利用它可确定操作特性。表 5-7 所示为 BRIGHT 公司 RGB230 的特性参数,表 5-8 所示为 TAOS 公司 TCS3200 的特性参数。

表 5-7 全色色敏探测器 RGB230 特性参数(T=25℃)

颜色类型	暗电流/nA $V_R=10V$ max	正向电压/V $I_F=10mA$		击穿电压/V $I_R=100\mu A$ min	光电流/ $\mu A, E_v=100lx, V_R=5V$		
		max	min		$\lambda_p=630nm$	$\lambda_p=560nm$	$\lambda_p=560nm$
R	10	1.3	0.5	35	0.35	—	—
G	10	1.3	0.5	35	—	0.05	—
B	10	1.3	0.5	35	—	—	0.30

表 5-8 TCS3200,TCS3210 特性参数

型号	颜色类型	输出频率/kHz									辐射灵敏度/Hz/($\mu W/cm^2$)(%)								
		$\lambda_p=470nm,$ $E_e=47.2\mu W/cm^2$			$\lambda_p=524nm$ $E_e=40.4\mu W/cm^2$			$\lambda_p=640nm$ $E_e=34.6\mu W/cm^2$			$\lambda_p=470nm$			$\lambda_p=524nm$			$\lambda_p=640nm$		
		min	type	max	min	type	max	min	type	max	min	type	max	min	type	max	min	type	max
TCS3200	B	61%		84%	8%		28%	5%		21%	61%		84%	8%		28%	5%		21%
	G	22%		43%	57%		80%	0%		12%	22%		43%	57%		80%	0%		12%
	R	0%		6%	9%		27%	84%		105%	0%		6%	9%		27%	84%		105%
	clear	12.5	15.6	18.7	12.5	15.6	18.7	13.1	16.4	19.7		331			386			474	

为了便于色彩识别及自动控制,MAZET 公司最新推出的色敏探测器 MTCSiCS,不仅能够实现对颜色的识别与检测;同时,它也是测量光源系统的出色解决方案。其控制系统可以捕捉到目前的颜色状况,然后根据图像信号反馈的信息控制并得到相应的三刺激值。MTCSiCS 的输出信号是数字量,可以驱动标准的 TTL 或 CMOS 逻辑输入,因此可直接与微处理器或其他逻辑电路相连接。由于输出的是数字量,并且能够实现每个彩色信道 10 位以上的转换精度,因而不需要 A/D 转换电路,使电路变得更简单。

5.6.5 色敏探测器的应用

1. 测量、控制光源的色温度

图 5-68 所示是一个测量、控制光源的色温度的典型电路。光源的发光受灯电压控制电路控制,将光源的一部分光输入给半导体色敏传感器,经图 5-68 所示电路进行信号处理后得到输出电压,再将该输出电压反馈给灯压控制电路。采用这种方式,可通过把半导体色敏传感器的输出电压保持在一个给定值上,使光源色温度的规定值维持不变。

2. 识别彩色纸的颜色

先把光源照射到纸上,再将其反射光入射到半导体色敏传感器上,就能够识别出纸的颜

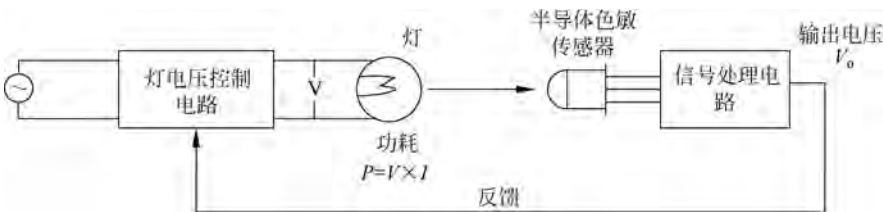


图 5-68 测量、控制光源的色温度的典型电路

色。图 5-69 就是这种测量方法的典型例子。

此时,半导体色敏传感器上的入射光是随着光源固有频谱和被测物体(纸)的各种固有波长的反射系数而定。因此需要注意,半导体色敏传感器的输出电压是依光源的种类、纸(颜色)的种类而变化的。

3. 在工业控制方面的应用

图 5-70 所示是瓷砖色彩区分装置。工控机控制色敏探测器对经过色敏探测器下方的瓷砖的表面颜色信号进行接收,且将接收到的表面颜色信号发送给工控机;随后工控机将从色彩传感器接收到的表面颜色信号与预定的颜色数值进行比较,从而识别瓷砖的颜色。

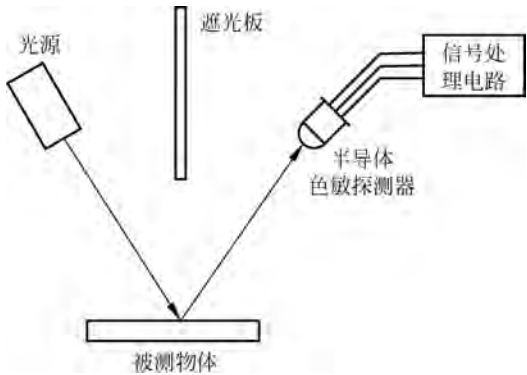


图 5-69 检测物体颜色电路

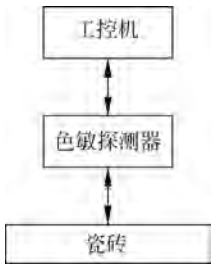


图 5-70 瓷砖色彩区分装置

5.7 位置敏感探测器

位置敏感探测器(Position Sensitive Detector, PSD)是一种基于横向光电效应而制造的器件,对入射到光敏面上的光斑能量中心位置敏感的光电器件,它可以利用较少的光电输出信号的相对程度来计算位置信息。相对于其他类型的光电传感器,PSD 的主要优点在于它是无盲区的连续性器件,并且在无须额外器件的情况下就可以做成大面积的测量系统。目前,高性能的 PSD 已经被普遍应用,不仅光谱范围宽,并且位置分辨率可达 $0.1\mu\text{m}$,响应速度也提高至 $0.5\mu\text{s}$ 以下。如今,PSD 已被广泛应用于低成本需求或高速位置检测的商业和工业应用中,如非接触式距离测量、激光光束准直和物体的光电跟踪等场合,也应用于精密光学准直、生物医疗应用、机器人、过程控制和位置信息系统等。

5.7.1
微课视频

5.7.1 位置敏感探测器的工作原理

1. 一维 PSD 器件(One-dimensional PSD Device)

位置敏感探测器是一个利用嵌入式电阻层来生成位置灵敏信号电流的单一光敏二极管,其工作机理是半导体的横向光电效应。横向光电效应是指当 PN 结一面被非均匀辐照时,平行于结的平面上出现电势差,形成光生伏特电压或者光生电流的现象。

PSD 由单一的大面积 PN 结和高阻半导体材料制成的面电阻组成,其工作原理如图 5-71 所示,等效电路图如图 5-72 所示。当 PSD 未受光照时,沿着结平面电势均匀,横向无电势差。当一束光照在受光面某个区域时,光子主要在 I 层被吸收产生电子—空穴对,电子—空穴对在内建电场的作用下,电子向 N 型层运动,空穴向 P 型层运动。如果 N 型层高浓度掺杂,电导率很大,为等电势层,那么经漂移运动来的电子属于多数载流子,将快速离开照射区在整个 N 型层均匀分布。P 型层由于电阻率很大而出现光生空穴的堆积,结果出现横向电势差,在横向电场作用下光生空穴离开照射区向两边电极运动形成横向电流。同时,由于运动的空穴将抵消部分空间电荷,使空穴向 N 型层,电子向 P 型层回注,形成纵向回注漏电流。另外,由于薄层分流电阻是一个分布电阻,器件工作时还会存在呈面分布的 PN 结反向结电流,又由于 PN 结具有电容,还会伴随电容效应。

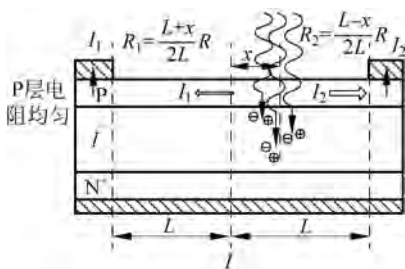


图 5-71 一维 PSD 工作原理图

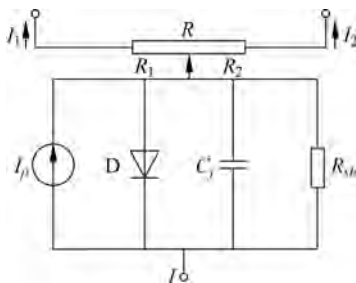


图 5-72 PSD 等效电路图

若使 PSD 工作在反向偏置状态,光生电流远远大于反向饱和电流和漏电流,假设 P 型层电阻率均匀分布,那么考虑稳态时,可以认为光生电流在 P 型层按电阻面长度分流。若以 PSD 器件的几何中心点为坐标原点,设光斑中心距原点的距离为 x ,流过 N 型层上电极的电流为 I ,流过两电极的电流分别为 I_1 和 I_2 ,PSD 光敏面长度为 $2L$,则有如下关系:

$$I = I_1 + I_2 \quad (5-53)$$

$$I_1 = \frac{L-x}{2L}I, \quad I_2 = \frac{L+x}{2L}I \quad (5-54)$$

$$x = L \left(\frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} \right) \quad (5-55)$$

由以上关系可知,电极 1、2 的输出电流经过适当的信号放大以及运算处理可以得到反映光斑位置的信号输出,即可测出光斑能量中心对于器件中心的位置 x ,它只与电流 I_1 和 I_2 的和、差及其比值有关,而与总电流无关。流经电极 3 的电流即总电流 I ,它与入射强度成正比,所以 PSD 器件不仅能检测光斑中心的位置,而且能检测光斑的强度。

2. 二维 PSD 器件(Two-dimensional PSD Device)

二维 PSD 器件可用来测量光斑在平面上的二维位置(即 x 、 y 坐标值),它的光敏面常为正方形,比一维 PSD 器件多一对电极,它的结构可以分为图 5-73(a)所示的四边形 PSD 和图 5-73(b)所示的双面形 PSD。四边形的 PSD,其背光面是重掺杂层,因而 Si 片中的晶体缺陷和重金属杂质可以在工艺过程中由于吸除作用而被分凝到背面的磷沉积压,提高了有源层的洁净度,减少器件的暗电流,提高 PN 结的击穿电压,对器件可以加反偏电压。四边形 PSD 具有很小的暗电流和较高的反向击穿电压,但其位置线性度比较差。双面形 PSD,由于电阻层也必须在背面形成,这样吸除工艺就变得比较困难。由于 Si 片从一开始就必须两面抛光,并且离子注入,电极形成都比四边形 PSD 工艺复杂,双面形 PSD 暗电流比四边形 PSD 高出一个数量级。四边形 PSD 有一个公共的电极可以用来加上足够的反偏,而双面形 PSD 没有一个公共的电极,其反向偏压是通过信号极加上去的,因而必须把信号电流从反偏电压中分离出来,这样就增加了信号处理电路的复杂性。四边形 PSD 和双面形 PSD 的等效电路图如图 5-73 所示。

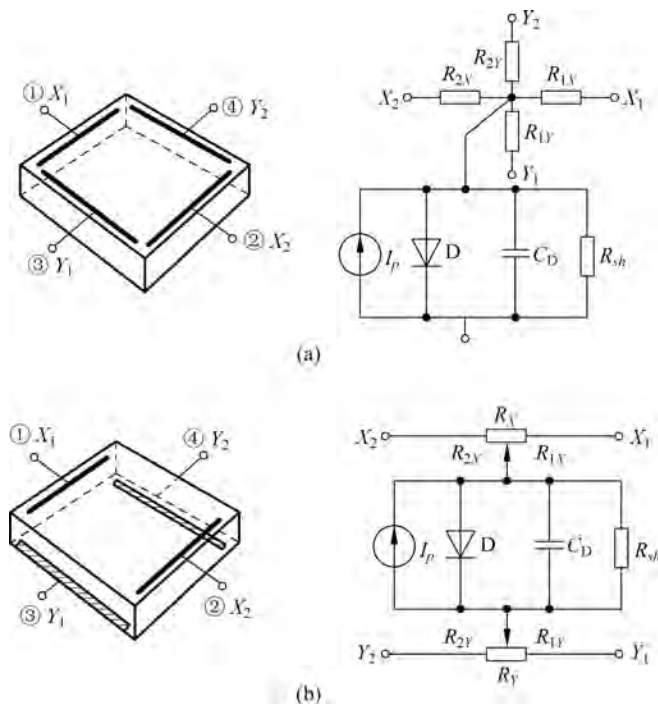


图 5-73 四边形 PSD 与双面形 PSD 的等效电路图

当光斑落到二维 PSD 器件上时,光斑中心位置的坐标值可分别表示为

$$x = \frac{I_{X2} - I_{X1}}{I_{X2} + I_{X1}}, \quad y = \frac{I_{Y2} - I_{Y1}}{I_{Y2} + I_{Y1}} \quad (5-56)$$

上式对靠近器件中心点的光斑位置测量误差很小,随着距中心点距离的增大,测量误差也会增大。为了减小测量误差,常将二维 PSD 器件的光敏面进行改进。改进后的 PSD 器件的四个引出线分别从四个对角线端引出,光敏面的形状好似正方形产生了枕形畸变。这种结构的优点是光斑在边缘的测量误差大大减小。

5.7.2
微课视频

5.7.2 位置敏感探测器的检测电路

1. 一维 PSD 检测电路

图 5-74 所示为一维 PSD 信号处理电路框图。光源发射的激光照射在 PSD 的光敏面上, PSD 输出两路光电流信号, 前置放大电路将其转换为电压信号并放大, 经加法电路和减法电路得到两路信号的和与差, 其中加法电路输出电压的极性为正, 而减法电路输出电压的极性不确定, 所以需要对减法电路的输出进行电平抬升和相位调整, 以方便后续电路处理和数据采集。由于 PSD 的光谱范围比较宽, 所以其输出信号不仅包括光源照射所产生的有用光电信号, 还包括由背景光和暗电流的存在而产生的噪声源。考虑该影响在整个光敏面是均匀的, 对两路输出电流的影响相等, 所以可以认为减法结果不受影响, 只需对加法结果进行补偿调零。

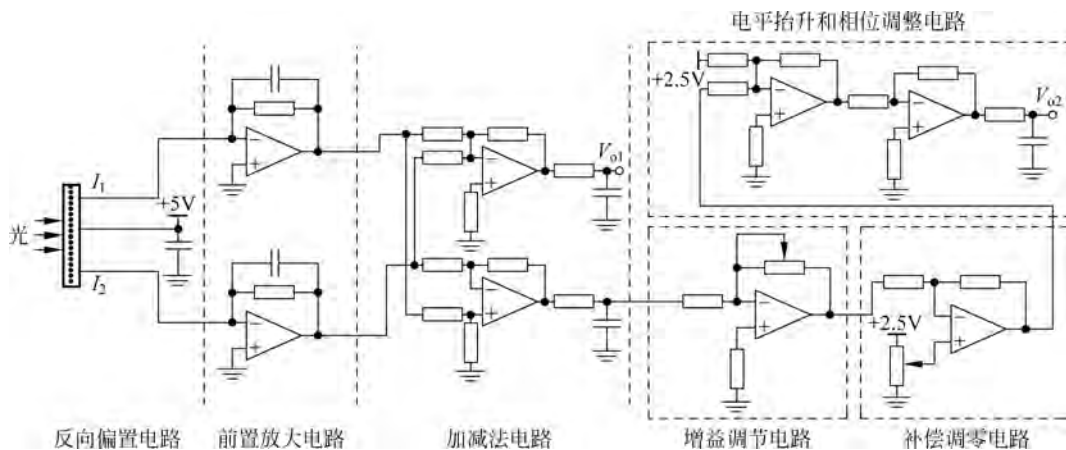


图 5-74 一维 PSD 信号处理电路框图

1) PSD 反向偏置电路

一维位置敏感探测器的信号处理电路工作在反向偏置状态, 因此需要设计反偏电路。为了增强系统的抗干扰能力, 在 PSD 电源输入端并接电源去耦电容, 使其工作稳定可靠, 提高系统性能。

2) 前置放大电路

PSD 的输出信号为电流型, 要对其进行运算和采集需转换为电压信号。最常见的实时电流型接口电路是由运算放大器和电阻构成的电阻反馈跨导式放大电路。运算放大器被配置成可以实时记录输入电流并将其转换成电压输出的电路, 反馈阻抗为 R_f , 输入电流为 I_i , 则可求出其输出电压为

$$V_o = -I_i \cdot R_f \quad (5-57)$$

为防止由输入寄生电容使相位滞后而引起的振荡, 该电路中采用反馈电阻与一小电容并联的方式进行相位补偿, 电容值通常取 10pF 以下。

3) 加减法电路

两路信号的加减法实现电路, 上半部分电路两个输入信号均作用于运放的同一个输入

端,实现了加法运算,下半部分电路一部分输入信号作用于运放的同相输入端,另一部分输入信号作用于反相输入端,实现了减法运算。考虑在该实验仪中光源的驱动方式为直流驱动,所以由 PSD 产生的光电流信号也为直流信号,电路中采用由电阻和电容产生的低通滤波电路可以滤掉高频噪声。

4) 增益调节电路

该电路为反比例运算电路,输入电压通过电阻作用在运放的反相端,反馈电阻跨接在运放的输出端和反相输入端,构成了电压并联负反馈。通过调节反馈电阻的阻值,可以实现对输入电压的放大增益的调节。

5) 补偿调零电路

该电路实际是由运放与反馈网络构成的减法运算电路,通过调节同向端的输入电压使其与反向输入端电压相等,可以实现输出为零。

6) 电平抬升和相位调整电路

该电路首先将输入信号与 +2.5V 电压反相求和,再进行反相,最后通过低通滤波器滤掉高频噪声。

2. 二维 PSD 检测电路

根据式(5-56)可以设计出二维 PSD 的光点位置检测电路。图 5-75 所示为基于改进后二维 PSD 的光点位置检测电路原理图。电路利用了加法器、减法和除法器进行各分支电流的加、减和除的运算,以便计算出光点在 PSD 中的位置坐标。目前,市场上已有适用于各类型号的 PSD 器件的转换电路板,可以根据需要选用。

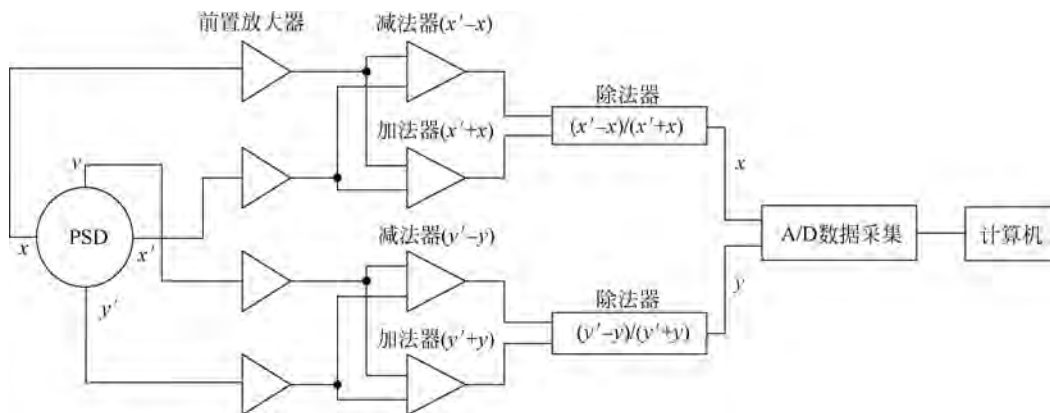


图 5-75 二维 PSD 光点位置检测电路原理图

在图 5-75 所示电路中加入 A/D 数据采集系统,将 PSD 检测电路所测得的 x 与 y 的位置信息送入计算机,可使 PSD 位置检测电路得到更加广泛的应用。当然,上述电路也可以进一步简化,在各个前置放大器的后面都加上 A/D 数据采集电路,并将采集到的数据送入计算机,在计算机软件的支持下完成光点位置的检测工作。

5.7.3 位置敏感探测器的主要特性参数

PSD 器件属于特种光生伏特器件,它的基本特性与一般硅光生伏特器件基本相同。例如,光谱响应、时间响应和温度响应等与前面讲述的 PN 结光生伏特器件相同。作为位置传

感器,PSD 又有其独特特性,即位置检测特性。其主要有以下几个性能指标。

1) 位置线性度

位置线性度是指入射光斑沿直线移动时 PSD 的位置输出偏离该直线的程度。PSD 的位置检测特性近似于线性,但由于器件的固有特性决定其存在非线性,而且越接近于边缘位置,误差越大。其线性度主要取决于制造过程中表面扩散层和底层材料电阻率的均匀性,以及有效感光面积等因素,且没有定量的公式作为依据。由于 PSD N 型层材料的不均匀性和电极形状等因素而造成 P 型层电阻率不为恒量,最终导致 PSD 呈非线性。通常,距离器件中心 2/3 的范围内线性度较好,越靠近边缘线性度越差。因此,实际应用中需要尽量选用线性度较好的区域,使系统误差限制在最小。

2) 位置分辨率

位置分辨率是指 PSD 最小可探测的光斑移动距离,主要受器件尺寸、信噪比等因素的影响。通常尺寸越大,器件分辨率越低,而提高信噪比可以提高位置分辨率。利用式(5-54),可做如下推导:

$$I_1 + \Delta I = \frac{L - x + \Delta x}{2L} \cdot I \quad (5-58)$$

式中: Δx ——微小位移;

ΔI —— Δx 所对应的输出电流的变化。

那么, Δx 可由下式表达:

$$\Delta x = 2L \cdot \frac{\Delta I}{I} \quad (5-59)$$

假设对微小位移 Δx 取无穷小值,那么很明显,位置分辨率取决于此时输出电流所包含的噪声成分。因此,如果 PSD 的噪声电流为 I_n ,则可以通过下式求得位置分辨率 ΔR 为

$$\Delta R = 2L \cdot \frac{I_n}{I} \quad (5-60)$$

3) 位置检测特性

PSD 的位置检测特性近似于线性。图 5-76 所示为典型一维 PSD(S1544)位置检测误差特性曲线。由曲线可知,越接近中心位置的测量误差越小。因此,利用 PSD 来检测光斑位置时,应尽量使光点靠近器件中心。

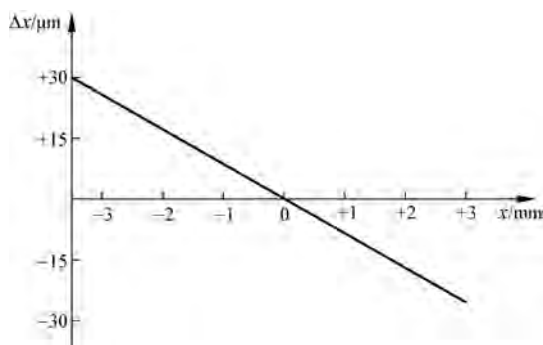


图 5-76 一维 PSD 位置检测误差特性曲线

5.7.4 几种常用位置敏感探测器

一维 PSD 以 Pacific Silicon Sensor 公司型号为 OD-3.5-6-SO8 的 PSD 为例,图 5-77 所示为其实物图。OD-3.5-6-SO8 的基本参数为:有效光敏面 $3.5\text{mm} \times 1\text{mm}$;位置检测误差 $\pm 0.2\%$ (测试条件: $\lambda = 632\text{nm}$; $P = 0.5\mu\text{W}$;光斑直径 0.5mm);光谱响应范围为 $400 \sim 1100\text{nm}$;暗电流 6.5nA (测试条件:反向偏置电压 $v_R = 10\text{V}$);灵敏度 0.59A/W ($v_R = 0\text{V}$, $\lambda = 850\text{nm}$);工作温度 $-25 \sim 85^\circ\text{C}$ 。光谱响应特性曲线如图 5-78 所示。



图 5-77 一维位置敏感探测器实物图

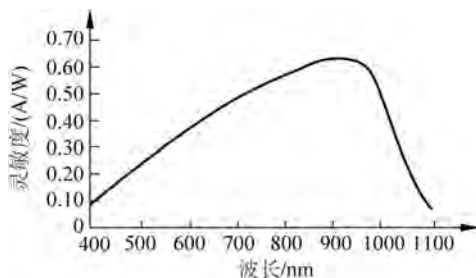


图 5-78 光谱响应特性曲线

二维 PSD 以 Pacific Silicon Sensor 公司型号为 DL-100-7-Cer 的 PSD 为例,图 5-79 所示为其实物图。DL-100-7-Cer 的基本参数为:有效光敏面 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$;位置检测误差 $\pm 0.1\%$ (测试条件: $\lambda = 632\text{nm}$; $P = 0.5\mu\text{W}$,光斑直径 0.5mm);光谱响应范围为 $400 \sim 1100\text{nm}$;暗电流 80nA (测试条件:反向偏置电压 $v_R = 10\text{V}$);灵敏度 0.4A/W ($\lambda = 633\text{nm}$)、 0.62A/W ($\lambda = 850\text{nm}$);工作温度 $-20 \sim 80^\circ\text{C}$ 。图 5-80 所示为其光谱响应特性曲线。

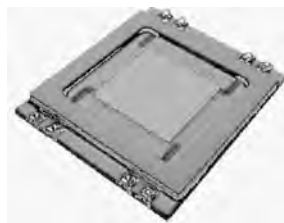


图 5-79 二维位置敏感探测器实物图

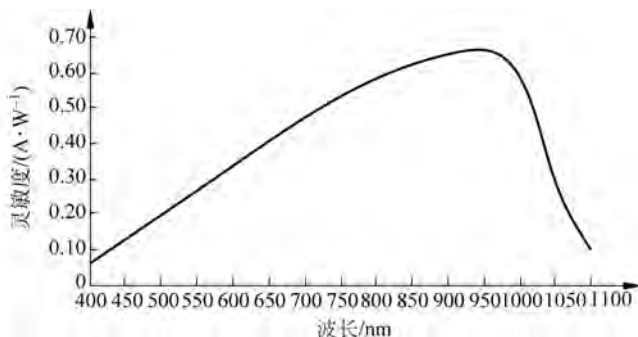


图 5-80 光谱响应特性曲线

表 5-9 和表 5-10 所示分别为几种典型一维和二维 PSD 器件的基本特性参数,供应用时参考。

表 5-9 典型一维 PSD 特性参数

型号	位置感 应区 /mm	灵敏度 /(A/W)		位置检 测误差 /μm	暗电流/nA		电容/pF		上升时 间/μs	位置检 测漂移 μm/℃	电极间 阻值 /kΩ	
		min	type	type	type	max	type	max	type	type	min	max
SL3-2	3×1	0.3	0.4	3	5	50	3	7	0.04	0.06	15	80
SL5-2	5×1	0.3	0.4	5	10	100	5	9	0.10	0.10	20	100
SL10-1	10×2	0.3	0.4	10	200	500	20	30	0.40	0.10	40	250
SL15	15×1	0.3	0.4	15	150	300	15	25	0.60	0.1	60	300
SL30	30×4	0.3	0.4	30	150	1000	125	150	1.0	0.6	40	80
SL76-1	762×5	0.3	0.4	76	100	1000	190	250	14.0	1.4	120	600

注：测试条件 $T=25^{\circ}\text{C}$ ， $v_{\text{BIAS}}=-15\text{V}$ ，波长 670nm ，误差在长度 $64\%\sim 80\%$ 的感应区测量。

表 5-10 典型二维 PSD 特性参数

型号	位置感 应区 /mm ²	灵敏度 /(A/W)		位置检 测误差 /μm	暗电流/nA		电容/pF		上升时 间/μs	位置检 测漂移 μm/℃	电极间 阻值 /kΩ	
		min	type	type	type	max	type	max	type	type	min	max
DL-2	2	0.3	0.4	30	30	600	10	30	0.025	0.20	5	25
DLS-2	2	0.3	0.4	30	10	175	8	14	0.025	0.40	5	25
DL-4	4	0.3	0.4	50	50	1000	35	60	0.08	0.25	5	25
DLS-4	4	0.3	0.4	50	25	300	30	40	0.08	0.30	5	25
DL-10	10	0.3	0.4	100	500	5000	175	375	0.20	0.60	5	25
DL-20	20	0.3	0.4	200	2000	12 000	600	1500	1.00	1.0	5	25

5.7.5 位置敏感探测器的应用

PSD 不像传统的硅光电探测器只能应用于光电转换、光电耦合、光接收和光强测量等方面，而能用来直接测量位置、距离、高度、角度和运动轨迹等。不像固态图像传感器的测量表面由于敏感单元有一定的大小而存在死区，PSD 光敏面内无盲区。PSD 日益引起人们的重视，在位置、位移、距离、角度及其相关的检测中获得原来越广泛的应用。下面介绍几种 PSD 的典型应用。

1. PSD 微小厚度变化量测量

这里介绍一下三角测量法结合 PSD 实现微小厚度变化量测量的原理。三角测量法可分为斜射法和直射法。斜射法是入射光束与被测表面法线成一锐角，而直射法是入射光束垂直于被测表面。两种方法各有优缺点：斜射法的测量准确度高于直射法，因而在要求较高准确度的测量时应首先予以考虑。直射法光斑较小，光强集中，不会因被侧面不垂直而扩大光照面上的光斑，因而对于表面较粗糙、处于震动中的被测对象，干扰误差小。

斜射三角法的测量原理如图 5-81 所示，激光器发出的激光束，经会聚镜后，入射到被测物体表面。由于反射一般为漫反射，经被测表面后的散射光呈一小光斑，该光斑经成像镜后

成像在 PSD 的光敏面上,再经过光电转换得到电信号,由透镜成像公式可以推算出成像光点的位置与厚度的变化关系式,通过对电信号的分析、计算,最终实现厚度变化量的测量。

激光以入射角 α 入射到被测物体表面点 A,由成像透镜把点成像在 PSD 上 O 处,若物体厚度变化为 δ ,则入射光射到表面点 A',并成像于 PSD 上的 O'点,O'点偏离 O 点的位移为 X,则由相似三角形的关系可以推出 $\triangle AA'B \cong \triangle OO'B$,所以

$$\delta = X \frac{AB}{OB} \cos \alpha$$

系统固定后 α 、 AB/OB 均为确定值,位移量 δ 可通过 PSD 测出 X 后由上式计算得到。

2. 精密定位系统

利用一维 PSD 构成的精密定位系统如图 5-82 所示。在需定位的移动部件的适当位置上装一光源(通常为 LED),将一维 PSD 固定在移动部件下方的基座上。当移动部件上的光源偏离 PSD 中心位置时,如图中虚线所示,由透镜成像在 PSD 上的光点将偏离其中心,两电极输出由差动放大输出作为误差信号去控制电机传动机构,使部件水平移动,直到光源位置对准 PSD 中心为止。PSD 精密定位装置结构简单,并能达到较高定位精度。

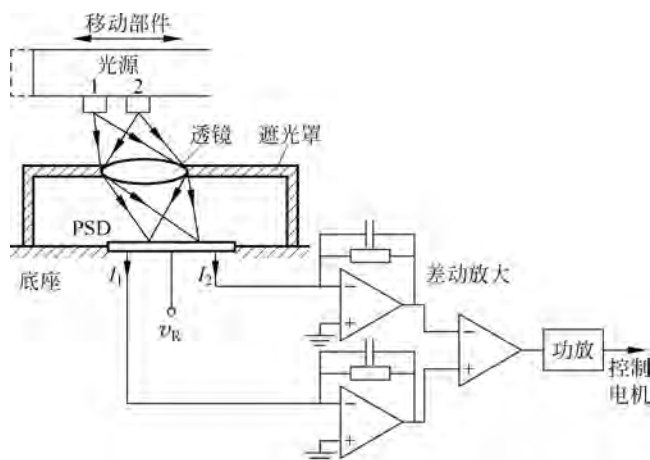


图 5-82 一维 PSD 精密定位系统

3. PSD 在人体三维运动检测中的应用

二维 PSD 可以准确探测平面内光斑的 x 、 y 参量,这为人体运动的空间实时检测提供了一种最新的方法。

目前在运动生物力学研究中,为了得到三维的运动参数,普遍采用两台高速摄影机同步测试的方法。这种方法具有如下特点:

(1) 无接触测量,不干扰运动员的动作。

(2) 一幅影片可以记录人体某一瞬时所有关节点位置,通过对连续影片的分析可导出所需的所有运动学参数。

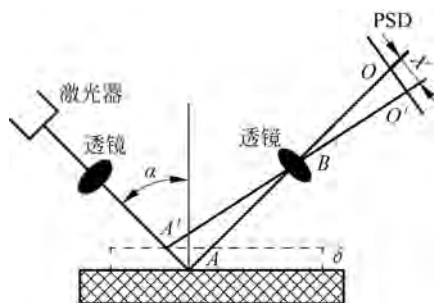


图 5-81 斜射三角法的测量原理

但是高速摄影的影片冲洗、数据判读、影片解析等后期制作费时费力,信息反馈慢。采用两台 PSD 摄像机组成的系统不但可以兼容高速摄影的优点,还可实现实时测量和快速数据处理。图 5-83 所示为这个测量系统的框图。

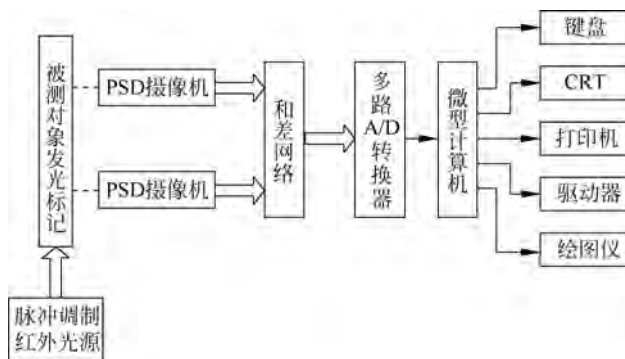


图 5-83 人体三维运动检测框图

下面就这个系统讨论 PSD 检测人体三维运动的信号产生、信号提取及数据处理等问题。

当由 PSD 器件和透镜组组成的摄像机监测人体结构的某一部分时,要求被探测点能够发出足够的光强会聚到探测器上,以获得最佳信噪比。根据 PSD 器件对光源的光谱响应特点,系统选用微型红外发光二极管为关节点的发光标记。

一台 PSD 摄像机一次探测只能定位人体上一个关节点的平面坐标 (x, y) ,多个关节点的测量是通过时分割脉冲调制光源实现的。当各发光二极管依次顺序发光时,PSD 将探测到的各关节点位置信息依次以电信号输出,再经图 5-75 所示的和差网络运算,便得到一系列平面位置坐标 (x_i, y_i) 信号。 x, y 为模拟量,经多路 A/D 转换后送入计算机内存储。

人体运动的空间位置坐标 (x, y, z) 是通过两台 PSD 摄像机,根据双目立体视觉原理摄制的。相距一定距离的两台 PSD 摄像机以一定角度同步地探测同一关节点位置,分别在两个 PSD 器件上成像,并得到 (x', y') 与 (x'', y'') 两组平面坐标值,这两组数据送入计算机后,经过预先编制好的坐标变换程序,得到该关节点的空间位置坐标 (x, y, z) 。

此外,我们注意到,运动生物力学研究所需要的物理量,例如各关节点的位移、速度、加速度、角度、角位移、角速度、角加速度、动量、转动惯量等实际均是关节点位置坐标的导出量。

举例来说,待测的关节角度 φ 是人体相邻环节的夹角,相邻两个关节点确定一个环节的位置,如腕关节和肘关节连线,就是小臂的位置,肘关节点与肩关节点的连线就是上臂的位置,上臂与小臂夹角就是肘关节角度。由此可见,关节角度可利用三角函数从有关的三个关节点的坐标计算得到。位移量就是 PSD 对同一关节点相继两次测量的位置坐标的变化量。位移对时间求微分就是速度,二次微分就是加速度。可见上述诸多物理量的提取实际上就转换为数据处理的问题。通过 PSD 器件获得的精确位置信息就是获取上述各物理量的原始依据。

5.8 象限探测器

象限探测器(Quadrant Detector, QD)是一类在定位系统中广泛应用的非成像探测器件,由于它具有探测灵敏度高、信号处理简单和抗干扰能力较强等优点,在军事、测绘、天文、通信、工程测量等许多领域都得到了广泛的应用。



5.8.1
微课视频

5.8.1 象限探测器原理

象限探测器是利用集成电路光刻技术,将一个光敏面分隔成几个形状相同、面积相等、位置对称的区域,每一个区域相当于一个光电器件(光敏二极管或光电池),它们具有完全相同的性能参数,如图 5-84 所示。图 5-84 中,将光敏面分成了两个、四个、八个相同的区域,分别称为二象限探测器(Two Quadrants Detector)、四象限探测器(Four Quadrants Detector)和八象限探测器(Eight Quadrants Detector)。图 5-85 所示为四象限探测器实物图,其各象限定义如图 5-86 所示。

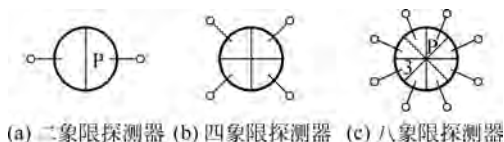


图 5-84 各种象限探测器示意图



图 5-85 四象限探测器实物图

下面以四象限探测器为例说明象限探测器工作原理。四象限探测器是利用集成电路光刻技术将一个圆形或者方形的光敏面窗口分割成四个面积相等、形状相同、位置对称的区域(背面仍然为一个整片),如图 5-87 所示。

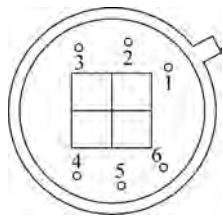


图 5-86 四象限探测器各象限定义
1、3、4—阳极; 2—阴极, 连接到地

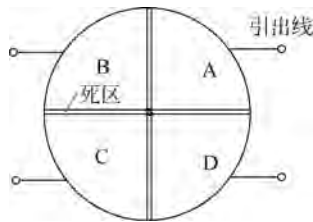


图 5-87 四象限探测器光敏面

每一个区域相当于一个光电器件。在理想的情况下,每个光电器件应有相同的性能参数。探测器各个象限之间的间隔被称为死区,工艺上要求做得很窄。光照面上各有一根引出导线,背面基区引线作为公共极。照射在光敏面上的光斑被四个象限分成 A、B、C、D 四部分。当目标光斑照射在探测器上时,对应的四个象限电极产生的阻抗电流为 i_A 、 i_B 、 i_C 、 i_D 。光斑在四象限探测器上移动时,各象限受光面积将发生变化,从而引起四个象限产生的电流强度变化。

用 σ_x 、 σ_y 表示 x 、 y 轴上提取到的误差信号, σ_x 、 σ_y 与光斑中心实际偏移量有一定的对

应关系。采用加减算法进行光斑中心定位时的误差信号表达式为

$$\sigma_x = \frac{(i_A + i_D) - (i_B + i_C)}{i_A + i_B + i_C + i_D}, \quad \sigma_y = \frac{(i_A + i_B) - (i_C + i_D)}{i_A + i_B + i_C + i_D} \quad (5-61)$$

如果 E_A 、 E_B 、 E_C 和 E_D 分别表示入射到四个象限的光照度, S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D 分别表示四个象限中的光斑面积, 则有

$$\sigma_x = \frac{(E_A + E_D) - (E_B + E_C)}{E_A + E_B + E_C + E_D}, \quad \sigma_y = \frac{(E_A + E_B) - (E_C + E_D)}{E_A + E_B + E_C + E_D} \quad (5-62)$$

严格来讲, 分布在四象限探测器上的光斑能量是不均匀的, 通常是高斯分布。要计算每个象限的光能量必须用积分的方法。但在要求不太高的情况下可近似地把光斑的分布看成是均匀的。若光斑的光强是均匀分布的, 则落到每个象限中的光能量与该象限中的光斑面积成正比, 比例系数为 k :

$$i_i = kS_i \quad (i = A, B, C, D) \quad (5-63)$$

因此可以用该象限中的光斑面积表示提取到的误差信号, 因此式(5-63)可以表示为

$$\sigma_x = \frac{(S_A + S_D) - (S_B + S_C)}{S_A + S_B + S_C + S_D}, \quad \sigma_y = \frac{(S_A + S_B) - (S_C + S_D)}{S_A + S_B + S_C + S_D} \quad (5-64)$$

由式(5-64)可以看出, σ_x 、 σ_y 的取值反映了光斑位置的变化, 即 $\sigma_x = \sigma_y = 0$ 表示光斑中心与坐标原点重合; $\sigma_x > 0, \sigma_y > 0$ 表示光斑中心位于第一象限; $\sigma_x < 0, \sigma_y > 0$ 表示光斑中心位于第二象限; $\sigma_x < 0, \sigma_y < 0$ 表示光斑中心位于第三象限; $\sigma_x > 0, \sigma_y < 0$ 表示光斑中心位于第四象限。

5.8.2 四象限探测器的空间分辨率

作为二维位置传感器, 四象限探测器有其独特特性, 即空间分辨率。式(5-64)表示的误差信号不是光斑位置坐标的误差信号, 不能直接求出四象限探测器的空间分辨率(Spatial Resolution)。假设光斑为圆形(半径为 r), 光强均匀分布, S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D 中的光斑面积可利用几何知识求出, 代入式(5-64)可以得到

$$\sigma_x = \frac{1}{\pi r^2} \left\{ 2x_0 y_0 + x_0 \sqrt{r^2 - x_0^2} - y_0^2 \tan\left(\arcsin \frac{x_0}{r}\right) + \frac{r^2}{2} \left(\frac{\pi}{2} + 3\arcsin \frac{x_0}{r} - \arccos \frac{x_0}{r} \right) + (\sqrt{r^2 - x_0^2} - y_0) \left[x_0 - y_0 \tan\left(\arcsin \frac{x_0}{r}\right) \right] \right\} \quad (5-65)$$

$$\sigma_y = \frac{1}{\pi r^2} \left\{ 2x_0 y_0 + y_0 \sqrt{r^2 - y_0^2} - x_0^2 \tan\left(\arcsin \frac{y_0}{r}\right) + \frac{r^2}{2} \left(\frac{\pi}{2} + 3\arcsin \frac{y_0}{r} - \arccos \frac{y_0}{r} \right) + (\sqrt{r^2 - y_0^2} - x_0) \left[y_0 - x_0 \tan\left(\arcsin \frac{y_0}{r}\right) \right] \right\} \quad (5-66)$$

由上述可见, 一般情况下误差信号与光斑位置并不呈线性关系。为了便于测量, 对式(5-65)和式(5-66)进行简化处理。设光斑中心离开坐标原点(四象限探测器的几何中心)的距离很小, 即 $|x_0|$ 、 $|y_0|$ 均远小于图形光斑的半径 r 。对式(5-65)和式(5-66)分别取一级近似, 则有

$$\sigma_x \approx \frac{1}{\pi r^2} (x_0 y_0 + 2rx_0) \approx \frac{2x_0}{\pi r}, \quad \sigma_y \approx \frac{1}{\pi r^2} (x_0 y_0 + 2ry_0) \approx \frac{2y_0}{\pi r} \quad (5-67)$$

因此有

$$x_0 = \frac{\pi r}{2} \sigma_x = \frac{\pi r}{2} \frac{(i_A + i_D) - (i_B + i_C)}{i_A + i_B + i_C + i_D}, \quad y_0 = \frac{\pi r}{2} \sigma_y = \frac{\pi r}{2} \frac{(i_A + i_B) - (i_C + i_D)}{i_A + i_B + i_C + i_D} \quad (5-68)$$

由式(5-68)可以看出:通过电路对四象限探测器四个电极的输出电信号进行简单运算,即可以得到光斑中心在四象限探测器光敏面上的位置坐标。由此可以写出它的空间分辨率的表达式为

$$\Delta x = \frac{\pi r}{2} \cdot \Delta \sigma_x, \quad \Delta y = \frac{\pi r}{2} \cdot \Delta \sigma_y \quad (5-69)$$

式中: Δx 、 Δy ——处理电路能检测到的误差信号的最小变化量。



5.8.3
微课视频

5.8.3 四象限探测器的信号处理电路

由于从四象限探测器中获得的是微弱的电流信号,需经 I/v 转换、电压放大、A/D 转换后送入微处理器中进行进一步的处理。

采用四象限探测器测定光斑的中心位置时可以根据器件坐标轴线与测量系统基准线间的安装角度的不同采用不同的算法对信号进行处理。如图 5-88 所示,当器件坐标轴与测量系统基准线间的安装角度为 0° 时,一般采用加减算法。当其角度为 45° 时,可以采用对角线算法和 Δ/Σ 算法,如图 5-89 所示。

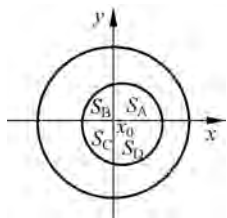


图 5-88 加减算法原理图

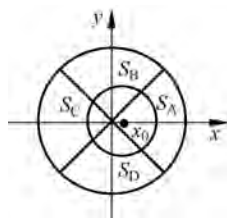


图 5-89 对角线算法和 Δ/Σ 算法

1. 加减算法

加减算法是将四象限探测器的坐标轴与测量系统的位置坐标的安装角度调整为 0° ,即两个坐标轴重合,由于光斑沿横轴的方向移动,则目标光斑沿系统的位置移动方向与探测器的坐标移动方向一致。加减算法属于经典算法,一般计算中都是采用这种算法。算法原理如图 5-90 所示。

加减算法在象限探测器原理部分已经有提到,当目标光斑照射到探测器上时,仍假设探测器的四个引脚输出相应象限的光电流为 i_A 、 i_B 、 i_C 、 i_D ,由于产生的光电流很小,采用图 5-90 所示的电路进行 I/v 变换,假设四路放大电路的增益为 A ,四个象限对应的电压值分别为 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D ,即

$$V_i = i_i A \quad (i = A, B, C, D) \quad (5-70)$$

假设目标光斑为能量服从均匀分布的圆形光斑,将式(5-63)代入上式可得

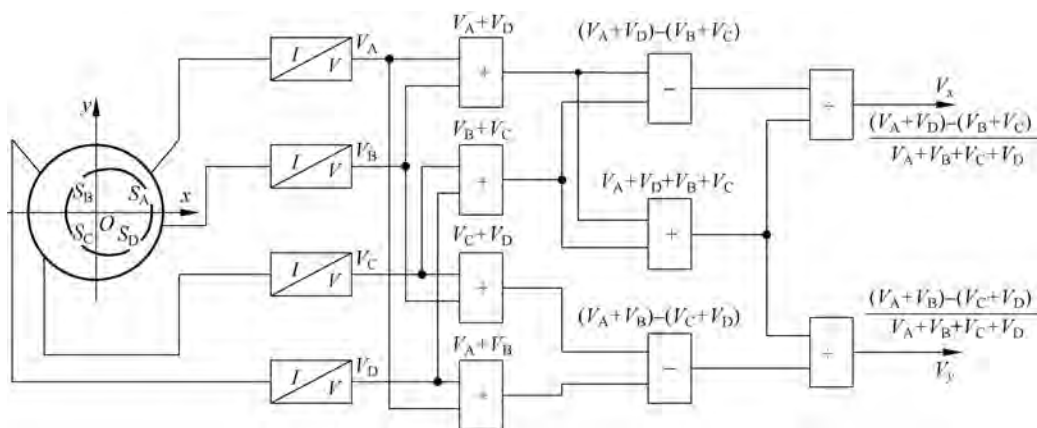


图 5-90 加减算法检测电路原理图

$$V_i = i_i A = S_i (kA) \quad (i = A, B, C, D) \quad (5-71)$$

用 Δx 和 Δy 分别表示光斑中心在 x 、 y 轴上的偏移量,那么根据式(5-64)可以得到

$$\Delta x \propto \frac{(V_A + V_D) - (V_B + V_C)}{V_A + V_B + V_C + V_D}, \quad \Delta y \propto \frac{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (5-72)$$

由式(5-72)可以看出,光斑的能量中心的偏移信号 Δx 和 Δy 都满足正比关系,但在实际中,并不是在整个光敏面区域都满足这种正比关系,而是在线性区域内。如果在线性区域内,这种比例关系为一个常数,假设为 K ,则式(5-72)可以改写为

$$\Delta x = K \frac{(V_A + V_D) - (V_B + V_C)}{V_A + V_B + V_C + V_D}, \quad \Delta y = K \frac{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (5-73)$$

将式(5-71)代入式(5-73)中,消去比例常数 A 和 k 后,可以得到 Δx 和 Δy 与光斑照射到探测器上各象限面积的关系为

$$\Delta x = K \frac{(S_A + S_D) - (S_B + S_C)}{S_A + S_B + S_C + S_D}, \quad \Delta y = K \frac{(S_A + S_B) - (S_C + S_D)}{S_A + S_B + S_C + S_D} \quad (5-74)$$

由式(5-74)可以看出,在线性区域内,光斑中心偏移探测器中心的偏移量 Δx 和 Δy 仅与光斑在探测器上的面积有关,只要得到了各象限面积之间的比例关系,即可得到光斑中心位置的坐标。

2. 对角线算法

从加减算法的分析中可以看出线性区域对算法的影响,为了扩展测量的线性区域,产生了对角线算法。对角线算法是将四象限探测器的坐标轴与测量系统的位置坐标的安装角度调整为 45° ,当目标光斑在定位系统中沿横轴的方向移动的时候,相对于探测器来说,相当于沿着其对角线方向移动,算法原理如图 5-91 所示。

采用与加减算法相同的分析方法,其偏移量为

$$\Delta x \propto \frac{V_A - V_C}{V_A + V_B + V_C + V_D}, \quad \Delta y \propto \frac{V_B - V_D}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (5-75)$$

同样,在其线性区域内,将式(5-71)代入式(5-75)中,消去比例常数 A 和 k 后,可以得到 Δx 和 Δy 与光斑打到探测器上各象限面积的关系为

$$\Delta x = K \frac{S_A - S_C}{S_A + S_B + S_C + S_D}, \quad \Delta y = K \frac{S_B - S_D}{S_A + S_B + S_C + S_D} \quad (5-76)$$

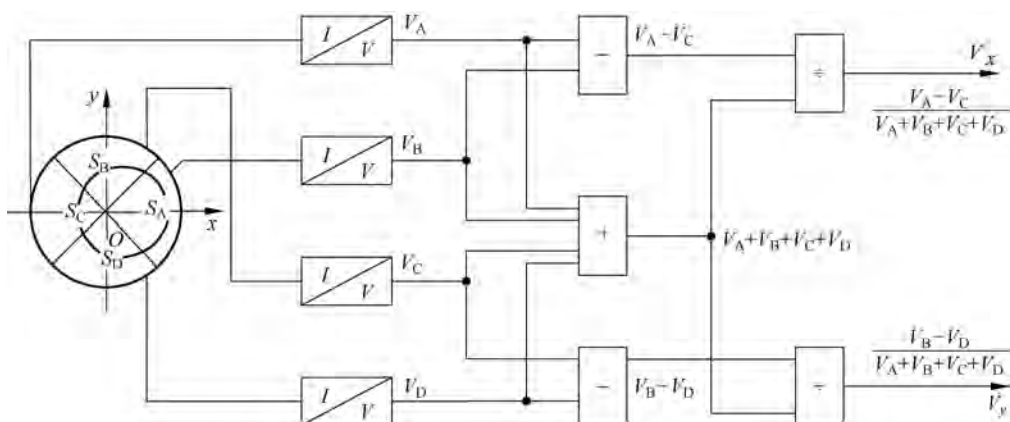
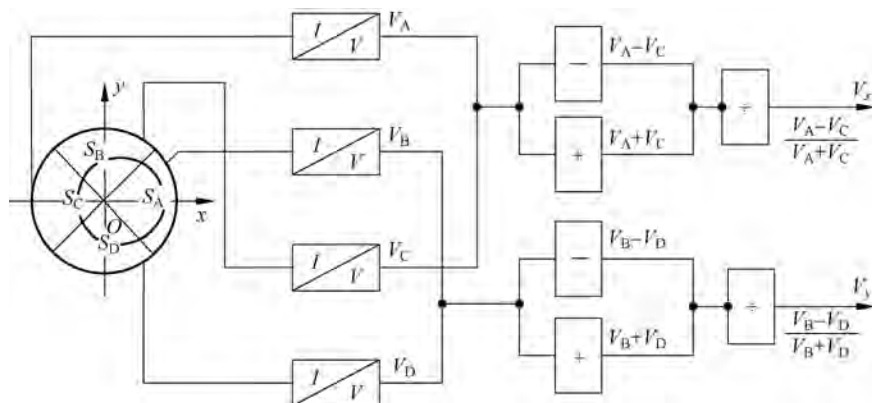


图 5-91 对角线算法检测电路原理图

3. Δ/Σ 算法

对角线算法在加减算法的基础上扩展了线性测量范围,但其测量灵敏度有所降低,为满足某些对测量灵敏度要求较高的场合需求,提出了 Δ/Σ 算法。 Δ/Σ 算法与对角线算法测量原理相同,四象限探测器的坐标轴与测量系统的位置坐标的安装角度为 45° ,但是对四路测量信号的处理方法有所差异, Δ/Σ 算法原理如图 5-92 所示。

图 5-92 Δ/Σ 算法检测电路原理图

同样采用与加减算法相同的分析方法,其偏移量为

$$\Delta x \propto \frac{V_A - V_C}{V_A + V_C}, \quad \Delta y \propto \frac{V_B - V_D}{V_B + V_D} \quad (5-77)$$

同样,在其线性区域内,将式(5-71)代入式(5-77)中,消去比例常数 A 和 k 后,可以得到 Δx 和 Δy 与光斑打到探测器上各象限面积的关系为

$$\Delta x = K \frac{S_A - S_C}{S_A + S_C}, \quad \Delta y = K \frac{S_B - S_D}{S_B + S_D} \quad (5-78)$$

5.8.4 四象限探测器的特性参数

表 5-11 和表 5-12 给出了德国 First Sensor 生产的部分四象限探测器特性参数。

表 5-11 几款典型四象限探测器特性参数[四象限探测器(低暗电流)]

型 号		有效光敏面		暗电流/nA	上升时间/ns
芯片	封装	直径/mm	有效面积/mm ²	10V	850nm、10V、50Ω
QP1-6	TO52	φ1.13	4×0.25	0.1	20
QP5-6	TO5	φ2.52	4×1.25	0.2	20
QP5.8-6	TO5	2.4×2.4	4×1.45	0.4	20
QP10-6	TO5	φ3.57	4×2.5	0.5	20
QP20-6	TO8S	φ5.05	4×5	1	30
QP50-6	TO8S	φ7.8	4×12.5	2	40
QP50-6	TO8S flat	φ7.8	4×12.5	2	40
QP100-6	LCC10G	φ11.2	4×25	4	40
QP100-6	LCC10S	φ11.2	4×25	4	40

表 5-12 几款典型四象限探测器特性参数[四象限探测器(1064nm)]

型 号		有效光敏面		暗电流/nA	上升时间/ns
芯片	封装	直径/mm	有效面积/mm ²	150V	1064nm、150V、50Ω
QP22-Q	TO8S	φ5.3	4×5.7	1.5	12
QP45-Q	TO8S	6.7×6.7	4×10.96	8	12
QP45-Q	LCC10G	6.7×6.7	4×10.96	8	12
QP100-Q	LCC10G	10×10	4×25	6.5	12
QP154-Q	TO1032i	φ14.0	4×38.5	10	12
QP154-Q	TO1081i	φ14.0	4×38.5	10	12

5.8.5 四象限探测器的应用

1. 激光准直

图 5-93 所示为简单的激光准直原理图。用单模 He-Ne 激光器(或者单模半导体激光器)作光源。因为它有很小的光束发散角,又有圆对称截面的光强分布(高斯分布),利于作准直用。其中激光射出的光束用倒置望远系统 L 进行扩束,倒置望远系统角放大率小,于是光束发散角进一步压缩,射出接近平行的光束投向四象限管,形成一圆形光斑。光敏区 AC、BD 两接成电桥,当光束准直时,光斑中心与四象限管十字沟道中心重合,此时电桥输出信号为零。若光斑沿上下左右有偏移时,两对电桥就相应于光斑偏离方向而输出 $\pm x$, $\pm y$ 的信号。哪个探测器被照亮斑的面积大,输出信号也大。这种准直仪可在各种建筑施工场合作为测量基准线。

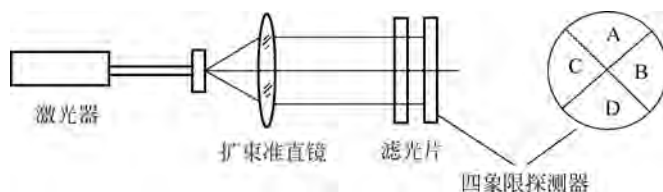


图 5-93 激光准直原理图

2. 激光定向

四象限探测也可作为二维方向上目标的方位定向,用于军事目标的探测或工业中的定向探测。图 5-94 所示为脉冲激光定向原理图。其中用脉冲激光器作光源(如固体脉冲激光器),它发出脉冲极窄(ns 量级脉宽)而峰值功率很高的激光脉冲,用它照射远处军事目标(坦克、车辆等)。被照射的目标对光脉冲发生漫反射,反射回来的光由光电接收系统接收,接收系统由光学系统和四象限管组成。四象限管放在光学系统后焦面附近,光轴通过四象限管十字沟道中心。远处目标反射光近似于平行光进入光学系统成像于物镜的后焦面上,四象限管的位置因略有离焦,于是接收到目标的像为一圆形光斑。当光学系统光轴对准目标时,圆形光斑中心与四象限管中心重合。四个器件因受照的光斑面积相同,输出相等的脉冲电压。经过后面的处理电路以后,没有误差信号输出。当目标相对光轴在 x 、 y 方向有任何偏移时,目标像的圆形光斑的位置就在四象限管上相应地有偏移,四个探测器因受照光斑面积不同而得到不同的光能量,从而输出脉冲电压的幅度也不同。四个探测器分别与图 5-90 所示运算电路相连。四个探测器的输出脉冲电压经四个放大器 A、B、C、D 放大后进入信号处理电路进行运算,得到代表光斑沿 x 或 y 方向的偏移量所对应的电压,最后根据与信号处理电路对应的算法得出电压与位移关系式。

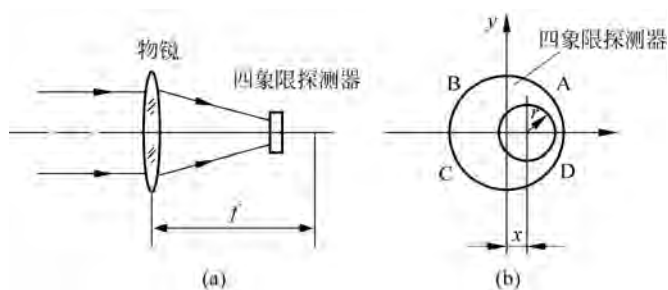


图 5-94 脉冲激光定向原理图

3. 微位移测量

如果采用其他形式的光学系统与四象限组合使用,四象限探测也不限于测量方位,也可测其他物理量。图 5-95 所示为测量物体微位移原理图。首先分析图中光学系统的成像关系,图中光学系统由物镜和柱面镜组成。如果物点 S_0 在 B 位置上,经物镜成像后物的理想像面位置在 Q 点,在物镜后面加一柱面镜后成像面位置在 P 点,那么当接收面(探测器)在 PQ 这段距离内由左往右移动时,所接收到的光斑将由长轴为垂直方向的椭圆形逐渐变成长轴为水平方向的椭圆形,而在 M 点位置处光斑是圆形的。反过来把四象限管放在 M 点位置上,当物点 S_0 在 B 点附近有微位移时,四象限管上所得到的光斑形状也将发生改变。当物点 S_0 由 B 移到 A 位置时,四象限管得到长轴是垂直方向的椭圆光斑。物点处于 S_0 位置时得到长轴处于水平方向的椭圆光斑,如图 5-95 所示。假设输出信号经过 5.8.3 节介绍的加减算法信号处理电路,得到输出信号为

$$U = \frac{(V_A + V_D) - (V_B + V_C)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (5-79)$$

输出电压的正负可反映出物点是靠近了还是远离了,其幅值大小反映微位移量的大小。

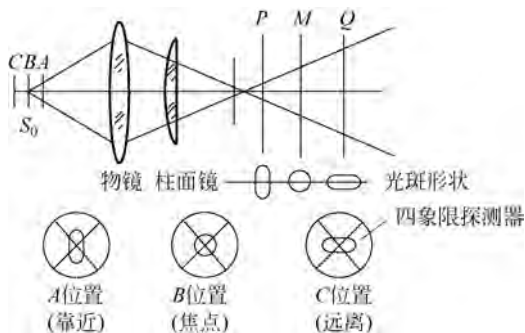


图 5-95 测量物体微位移原理图

5.9 光电耦合器件

5.9.1 光电耦合器件的工作原理与结构

光电耦合器件(Opto-Coupled Isolator)是将发光器件与光电接收器件组合成一体而制成的具有信号传输功能的器件,它是以光作为媒介把输入端的电信号耦合到输出端。光电耦合器件的发光器件常采用 LED 发光二极管、LD 半导体激光器等;光电接收器件常采用光敏二极管、光敏晶体管及光敏电阻等。

图 5-96 所示为将发光器件与光电器件封装在金属管壳内构成的光电耦合器件。发光器件与光电接收器件靠得很近,但不接触。发光器件与光电接收器件之间具有很好的电气绝缘特性,信号通过光进行单向传输。

光电耦合器件的结构原理图如图 5-97 所示。其中的发光二极管泛指半导体发光器件,其中的光敏二极管也泛指半导体光电接收器件。

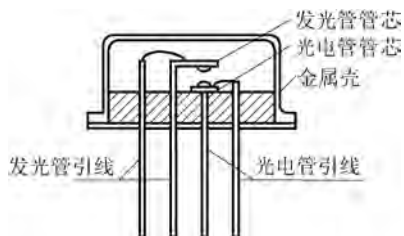


图 5-96 金属壳封装的光电耦合器件

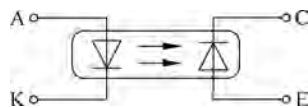


图 5-97 光电耦合器件结构原理图

光电耦合器件具有如下一些特点:既具有耦合特性又具有隔离特性;信号传输是单向性的,脉冲、直流信号都可以传输,适用于模拟信号和数字信号;具有抗干扰和噪声的能力,不受外界电磁干扰、电源干扰和杂光影响;响应速度快,一般可达微秒数量级,甚至纳秒数量级。

5.9.2 光电耦合器件的特性参数

1. 传输特性

1) 电流传输比 β

在直流工作状态下,将光电耦合器件的集电极电流 I_C 与发光二极管的注入电流 I_F 之

比定义为光电耦合器件的电流传输比,用 β 表示。图 5-98 所示为光电耦合器件的输出特性曲线。在其中部取一工作点 Q ,它所对应的发光电流为 I_{FQ} ,对应的集电极电流为 I_{CQ} ,因此该点的电流传输比为

$$\beta_Q = I_{CQ} / I_{FQ} \times 100\% \quad (5-80)$$

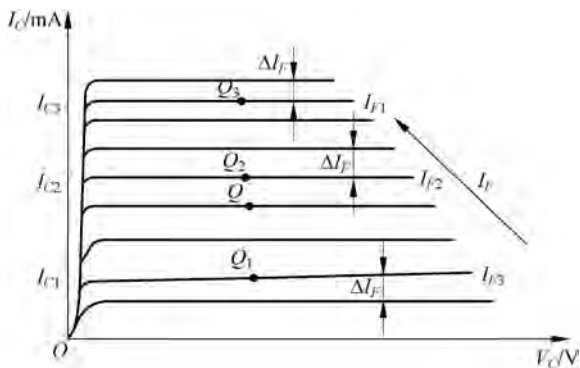


图 5-98 光电耦合器件的输出特性曲线

如果工作点选在靠近截止区的 Q_1 点时,虽然发光电流 I_F 变化了 ΔI_F ,但相应的 ΔI_{C1} 的变化量却很小,因此 β 值变小。同理,当工作点选在接近饱和区的 Q_3 点时, β 值也要变小。这说明当工作点选择在输出特性的不同位置时,具有不同的 β 值。因此,在传送小信号时,用直流传输比是不恰当的,而应当用所选工作点 Q 处的小信号电流传输比来计算。这种以微小变量定义的传输比称为交流电流传输比,用 $\tilde{\beta}$ 来表示,即

$$\tilde{\beta} = \Delta I_C / \Delta I_F \times 100\% \quad (5-81)$$

对于输出特性曲线线性度比较好的光电耦合器件, β 值很接近 $\tilde{\beta}$ 值。一般在线性状态使用时,都尽可能地把工作点设计在线性工作区;在开关状态下使用时,由于不关心交流与直流电流传输比的差别,而在实际使用中直流传输比又便于测量,因此通常都采用直流电流传输比 β 。

2) 输入与输出间的寄生电容 C_{FC}

当输入与输出端之间的寄生电容 C_{FC} 变大时,会使光电耦合器件的工作频率下降,也能使其共模抑制比下降,故后面的系统噪声容易反馈到前面系统中。对于一般的光电耦合器件,其 C_{FC} 仅仅为几个 pF,在中频范围内都不会影响电路的正常工作,但在高频电路中就要予以重视了。

3) 最高工作频率 f_m

图 5-99 所示为光电耦合器件的频率特性测量电路。等幅度的可调频率信号送入发光二极管的输入电路,在光电耦合器件的输出端得到相应的输出信号,当测得输出信号电压的相对幅值降至 0.707 时,所对应的频率就是光电耦合器件的最高工作频率(或称截止频率),用 f_m 来表示。图 5-100 所示为一个光电耦合器件的频率特性曲线。其中 R_L 为光电耦合器件的负载电阻,减小负载电阻会使光电耦合器件的最高工作频率 f_m 增高。

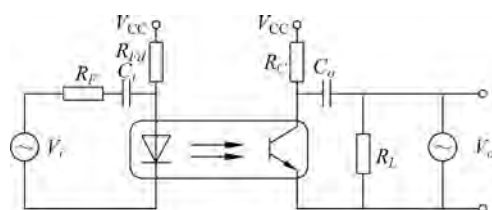


图 5-99 光电耦合器件的频率特性测量电路

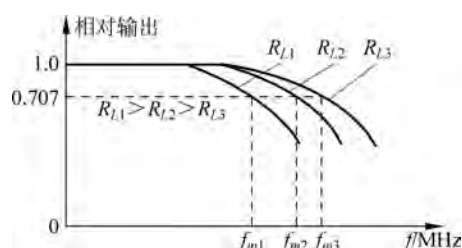


图 5-100 光电耦合器件的频率特性曲线

4) 脉冲上升时间 t_r 和下降时间 t_f

光电耦合器件在脉冲电压信号作用下的时间响应特性用输出端的上升时间 t_r 和下降时间 t_f 描述。图 5-101 所示为典型光电耦合器件的脉冲响应特性曲线。从输入端输入矩形脉冲，采用频率特性较高的脉冲示波器观测输出信号波形，可以看出，输出信号的波形会产生延迟现象。

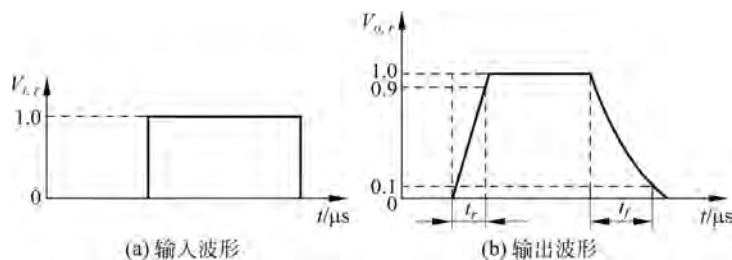


图 5-101 光电耦合器件的脉冲响应特性曲线

最高工作频率 f_m 、脉冲上升时间 t_r 和下降时间 t_f 都是衡量光电耦合器件动态特性的参数。当用光电耦合器件传送小的正弦信号或非正弦信号时，用最高工作频率 f_m 来衡量较为方便；而当传送脉冲信号时，则用 t_r 和 t_f 来衡量较为直观。

2. 隔离特性

光电耦合器件的输入端和输出端之间通过光信号传输，对电信号是隔离的，没有电信号的反馈和干扰，因而性能稳定。由于发光管和接收管之间的耦合电容很小，所以共模抑制比高、抗干扰能力强。

3. 光电耦合器件的抗干扰特性

光电耦合器件的重要优点之一就是能强有效地抑制尖脉冲及各种噪声等的干扰，从而在传输信息中大大提高了信噪比。光电耦合器件抗干扰能力强的原因如下：

(1) 光电耦合器件的输入阻抗很低，一般为 $10 \sim 1\text{k}\Omega$ ；而干扰源的内阻很大，一般为 $10^3 \sim 10^6\text{k}\Omega$ 。按一般分压比的原理来计算，能够馈送到光电耦合器件输入端的干扰噪声就变得很小了。

(2) 由于一般干扰噪声源的内阻都很大，虽然也能供给较大的干扰电压，但可供出的能量却很小，只能形成很微弱的电流。而光电耦合器件输入端的发光二极管只有在通过一定的电流时才能发光，因此，即使是电压幅值很高的干扰，由于没有足够的能量，也不能使发光二极管发光，从而被抑制。

(3) 光电耦合器件的输入、输出端是用光耦合的，且这种耦合又是在一个密封管壳内进

行的,因而不会受到外界光的干扰。

(4) 光电耦合器件的输入、输出间的寄生电容很小(一般为 $0.5 \sim 2\text{pF}$),绝缘电阻又非常大,因而输出系统内的各种干扰噪声很难通过光电耦合器件反馈到输入系统中。

5.9.3 光电耦合器件的应用

1. 电平转换

在工业控制系统中所用集成电路的电源电压和信号脉冲的幅度有时不尽相同。例如,TTL 用 5V 电源,HTL 为 12V ,PMOS 为 -22V ,CMOS 则为 $5 \sim 20\text{V}$ 。如果在系统中采用两种集成电路芯片,就必须对电平进行转换,以便实现逻辑控制。另外,各种传感器的电源电压与集成电路间也存在着电平转换问题。图 5-102 所示为利用光电耦合器件实现 PMOS 电路电平与 TTL 电路电平的转换电路。电路的输入端为 -22V 电源和 $0 \sim -22\text{V}$ 脉冲,输出端为 TTL 电平的脉冲,光电耦合器件不但使前后两种不同电平的脉冲信号实现了耦合,而且使输入与输出电路完全隔离。

2. 逻辑门电路

利用光电耦合器件可以构成各种逻辑电路。图 5-103 所示为由两个光电耦合器件组成的与门电路。如果在输入端 V_{i1} 和 V_{i2} 同时输入高电平 1,则两个发光二极管 VD_1 和 VD_2 都发光,两个光敏晶体管 VT_1 和 VT_2 都导通,输出端就呈现高电平 1。若输入端 V_{i1} 或 V_{i2} 中有一个为低电平 0,则输出光敏晶体管中必有一个不导通,使得输出信号为 0。故为与门逻辑电路, $V_o = V_{i1} V_{i2}$ 。

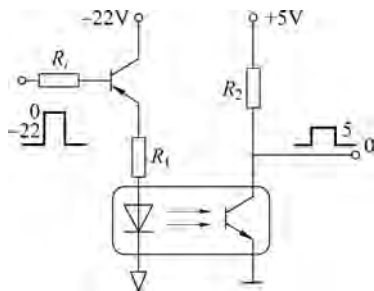


图 5-102 光电耦合器件构成的电平转换电路

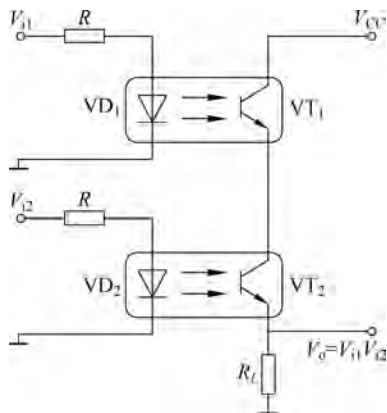


图 5-103 光电耦合器件构成的与门电路

为了充分利用逻辑元件的特点,在组成系统时,往往要用很多种元件。例如,TTL 的逻辑速度快、功耗小,可作为计算机中央处理部件;而 HTL 的抗干扰能力强,噪声容限大,可在噪声大的环境或输入、输出装置中使用。但 TTL、HTL 及 MOS 等电路的电源电压不同,工作电平不同,直接互相连接有困难。而光电耦合器件的输入与输出在电方面是绝缘的,可很好地解决互连问题。

3. 隔离方面的应用

有时为隔离干扰或者为了使高压电路与低压信号分开,可采用光电耦合器件。在电子计算机与外围设备相连的情况下,会出现感应噪声、接地回路噪声等问题。为了使输入、输

出设备及长线传输设备等外围设备的各种干扰不串入计算机,以便提高计算机工作的可靠性,亦可采用光电耦合器件把计算机与外围设备隔离开来。

4. 光电可控硅在控制电路中的应用

可控硅整流器(SCR)是一种很普通的单向低压控制高压的器件,可采用光触发的形式。同样,双向可控硅是由一种很普通的 SCR 发展改进的器件,也可采用光触发形式。将一只 SCR 和一只 LED 密封在一起,就可以构成一只光耦合的 SCR;而将一只双向可控硅和一只 LED 密封在一起就可以制成一只光耦合的双向可控硅。

虽然,这些器件都具有相当有限的输出电流额定值,实际的有效值对于 SCR 来说为 300mA,而对于双向可控硅来说则为 100mA。然而,这些器件的浪涌电流值远远大于它们的有效值,一般可达到数安培。

思考题与习题



参考答案

- 5.1 写出硅光敏二极管的全电流方程,说明各项的物理意义。
- 5.2 比较 2CU 型硅光敏二极管和 2DU 型硅光敏二极管的结构特点,说明引入环极的意义。
- 5.3 影响光生伏特器件频率响应特性的主要因素有哪些?为什么 PN 结型硅光敏二极管的最高工作频率小于或等于 10^7 Hz?怎样提高硅光敏二极管的频率响应?
- 5.4 为什么在光照度增大到一定程度后,硅光电池的开路电压不再随入射照度的增大而增大?硅光电池的最大开路电压为多少?为什么硅光电池的有载输出电压总小于相同照度下的开路电压?
- 5.5 硅光电池的内阻与哪些因素有关?在什么条件下硅光电池的输出功率最大?
- 5.6 光生伏特器件有哪几种偏置电路?各有什么特点?
- 5.7 在 PIN 光敏二极管中,I 层半导体材料的主要作用是什么?
- 5.8 简述 PIN 光敏二极管的工作原理。
- 5.9 简述雪崩光敏二极管的工作原理。
- 5.10 画出双结硅色敏器件的结构图并分析其工作原理。
- 5.11 画出全色色敏器件的结构图并分析其工作原理。
- 5.12 画出双色硅色敏器件信号处理电路框图并简单分析检测颜色原理。
- 5.13 画出全色硅色敏器件信号处理电路框图并简单分析检测颜色原理。
- 5.14 查阅文献,举一色敏探测器应用。
- 5.15 画出一维位置传感器工作原理图,并分析。
- 5.16 二维 PSD 按结构可以分为几种?各自的优缺点是什么?
- 5.17 画出一维位置传感器检测原理框图,并简单分析。
- 5.18 画出二维位置传感器检测原理框图,并简单分析。
- 5.19 查阅文献,举一例分析 PSD 的应用。
- 5.20 为什么 PSD 可以检测光斑中心位置?
- 5.21 按照自己的理解简要归纳四象限探测器工作原理。
- 5.22 画出四象限探测器检测原理框图,并简单分析。

5.23 查阅文献, 举一例分析四象限探测器的应用。

5.24 为什么要将发光二极管与光敏二极管封装在一起构成光电耦合器件? 光电耦合器件的主要特性有哪些?

5.25 光电耦合器件在电路中的信号传输作用与电容的隔直传输作用有什么不同?

5.26 在室温 300K 时, 已知 2CR21 型硅光电池 (光敏面积为 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$) 在辐照度为 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 时的开路电压为 $V_{oc}=550\text{mV}$, 短路电流 $I_{sc}=6\text{mA}$ 。试求:

(1) 室温情况下, 辐照度降低到 $50\text{mW}/\text{cm}^2$ 时的开路电压 V_{oc} 与短路电流 I_{sc} 。

(2) 当将该硅光电池安装在如图 5-104 所示的偏置电路中时, 若测得输出电压 $V_o=1\text{V}$, 求此时光敏面上的照度。

5.27 已知 2CR44 型硅光电池的光敏面积为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$, 在室温为 300K、辐照度为 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 时的开路电压 $V_{oc}=550\text{mV}$, 短路电流 $I_{sc}=28\text{mA}$ 。试求: 辐照度为 $200\text{mW}/\text{cm}^2$ 时的开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 、最大输出功率 P_m 和转换效率 η_m 。

5.28 已知光敏晶体管变换电路及其伏安特性曲线如图 5-105 所示。若光敏面上的照度变化 $e=120+80\sin\omega t(\text{lx})$, 为使光敏晶体管的集电极输出电压为不小于 4V 的正弦信号, 求所需要的负载电阻 R_L 、电源电压 V_{cc} 及该电路的电流、电压灵敏度, 并画出三极管输出电压的波形。

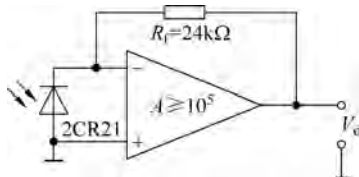


图 5-104 习题 5.26 图

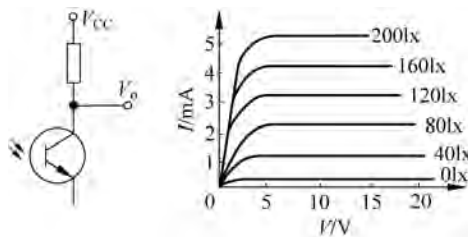


图 5-105 习题 5.28 图

5.29 利用 2CU2 光敏二极管和 3DG40 三极管构成如图 5-106 所示的探测电路。已知光敏二极管的电流灵敏度 $S_i=0.4\mu\text{A}/\mu\text{W}$, 其暗电流 $I_D=0.2\mu\text{A}$, 三极管 3DG40 的电流放大倍率 $\beta=50$, 最高入射辐射功率为 $400\mu\text{W}$ 时的拐点电压 $V_Z=1.0\text{V}$ 。求入射辐射功率最大时, 电阻 R_c 的值与输出信号 V_o 的幅值, 以及入射辐射变化 $50\mu\text{W}$ 时的输出电压变化量。

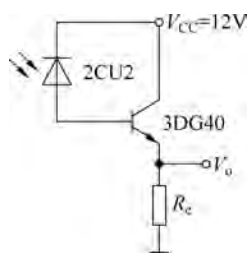


图 5-106 习题 5.29 图

5.30 选择最适当的答案填入括号中(只有一个答案正确)。

(1) 用光电法测量某高速转轴($15\,000\text{r}/\text{min}$)的转速时, 最好选用()为光电接收器件。

A. PMT

B. CdS 光敏电阻

C. 2CR42 硅光电池

D. 3DU 型光敏晶体管

(2) 若要检测脉宽为 10^{-7}s 的光脉冲, 应选用()为光电变换器件。

A. PIN 型光敏二极管

B. 3DU 型光敏晶体管

C. PN 结型光敏二极管

D. 2CR11 硅光电池

(3) 硅光电池在()偏置时,其光电流与入射辐通量有良好的线性关系,且动态范围较大。

- A. 恒流 B. 自偏置 C. 零伏偏置 D. 反向偏置

(4) 硅光电池在()情况下有最大的功率输出。

- A. 开路 B. 自偏置 C. 零伏偏置 D. 反向偏置

5.31 假设一个 PIN 光敏二极管的 I 层(Si)宽度为 $20\mu\text{m}$ 。P 层非常的薄($0.1\mu\text{m}$)。外加在 PIN 光敏二极管的反向偏置电压为 100V ,当波长为 900nm 的光照射在上面时,求光电流的持续时间。(假设光子在 I 层全部被吸收,室温下,硅材料的空穴迁移率为 $\mu_p = 500\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,电子迁移率 $\mu_n = 1450\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$)

5.32 一个 PIN 光敏二极管(Si)的有效受光面积的直径为 0.4mm 。当波长为 700nm 照度为 $0.1\text{mW}/\text{cm}^2$ 的红光入射产生了 56.6nA 的光电流。那么量子效率和灵敏度是多少?

5.33 如图 5-107 所示的光电变换电路中,若已知光敏晶体管 3DU2 的暗电流可以忽略不计,电流灵敏度 $S_i = 0.15\text{mA}/\text{lm}$,电阻 $R_L = 51\text{k}\Omega$, $V_{CC} = 12\text{V}$ 三极管 9014 的电流放大倍率为 120 倍,若要求该光电变换电路在照度变化 200lx 的情况下,输出电压的变换不小于 2.5V 。问:

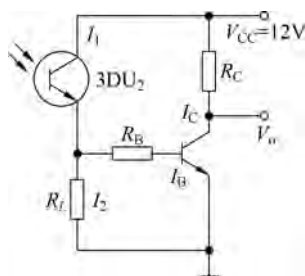


图 5-107 习题 5.33 图

(1) 电流 I_1 、 I_2 、 I_B 、 I_C 的方向如何(画在电路图上)?

(2) 电阻 R_B 与 R_C 的值应为多少?

(3) 当背景的照度为 10lx 时,流过光敏晶体管的电流 I_1 为多少? 输出端的电位为多少?

(4) 当入射到光敏晶体管的光照度为 100lx 时,输出端的电位又为多少?