

光生伏特器件

利用光生伏特效应制造的光电敏感器件称为光生伏特器件。光生伏特效应与光电导效应同属于内光电效应,然而两者的导电机理相差很大,光电导器件是多数载流子导电的光电效应,而光生伏特效应是少数载流子导电的光电效应,使得光生伏特器件在许多性能上与光电导器件有很大的差别。光电导器件对微弱辐射的探测能力和光谱响应范围是光生伏特器件望尘莫及的。而光生伏特器件的暗电流小、噪声低、响应速度快、光电特性的线性,以及受温度的影响小等特点又是光电导器件无法比拟的。

5.1 光生伏特效应

1. 光生伏特效应的产生

当 P 型半导体和 N 型半导体直接接触时,P 区中的多数载流子——空穴向空穴密度低的 N 区扩散,同时 N 区中的多数载流子——电子向 P 区扩散。这一扩散在 P 区界面附近积累了负电荷,在 N 区界面附近积累了正电荷。正负电荷在两界面间形成内建电场,该电场的逐步形成和增加的同时,又促进了少数载流子的漂移运动。这一伴生的对立运动在一定温度条件和一定时间后达到动态平衡,形成稳定的内建电场,称为 PN 结,它能阻止载流子的通过,又称为阻挡层。从能带角度分析,半导体 PN 结的能带结构如图 5.1(a)所示。当 P 型与 N 型半导体形成 PN 结时,P 区和 N 区的多数载流子要进行相对的扩散运动,以便平衡它们的费米能级差,扩散运动平衡时,它们具有如图 5.1(a)所示的同一费米能级 E_F ,并在结区形成由正负离子组成的空间电荷区或耗尽区。空间电荷形成如图 5.1(b)所示的内建电场,方向由 N 指向 P。

光生伏特效应是基于半导体 PN 结基础上的一种将光能转换成电能的效应。当入射辐射作用在半导体 PN 结上时,只要入射光子的能量大于半导体的禁带宽度,就能产生本征吸收,激发电子空穴对。P 区的光生空穴和 N 区的光生电子在 PN 结阻挡作用下不能通过结区。结区产生的电子空穴对在 PN 结内建电场的作用下分开,电子驱向 N 区,空穴驱向 P 区,结果 P 区带正电,N 区带负电,形成伏特电压,如图 5.1(b)所示。

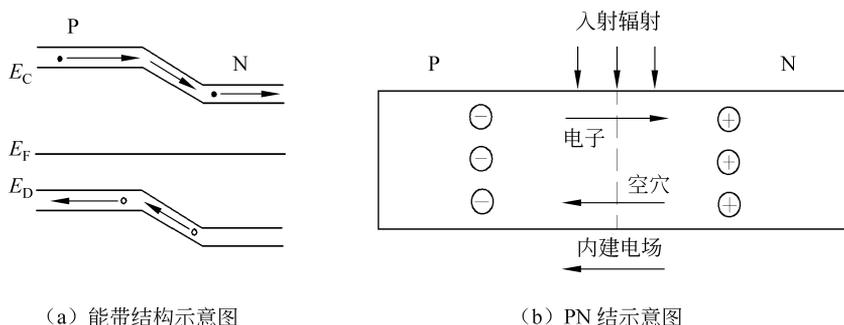


图 5.1 半导体的能带结构示意图和 PN 结示意图

2. 光生伏特效应器件的伏安特性

光生伏特效应器件的等效电路图如图 5.2 所示,它与晶体二极管的作用类似,只是在光照下产生恒定的电动势,并在外电路中产生电流。因此,等效电路由一电流源 I_ϕ 与二极管构成。 U 是外电路对器件形成的电压, I 是外电路对器件形成的电流,箭头方向为正。

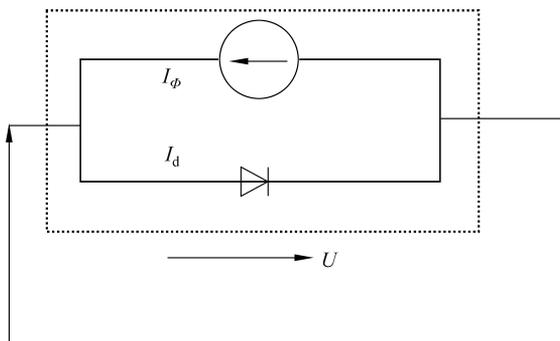


图 5.2 光生伏特效应器件的等效电路图

当设定图 5.2 所示箭头的方向为正方向时,将 PN 结两端接入适当的负载电阻 R_L ,若入射辐射通量为 $\Phi_{e\lambda}$ 的辐射作用于 PN 结上,则有电流 I 流过负载电阻,并在负载电阻 R_L 的两端产生压降 U ,流过负载电阻的电流应为

$$I = I_D (e^{\frac{qU}{kT}} - 1) - I_\phi \quad (5-1)$$

式中,第一项为二极管的特性方程, I_D 为暗电流; $I_\phi = \frac{\eta q \lambda}{hc} (1 - e^{-ad}) \Phi_{e\lambda}$ 为光生电流。由式(5-1)也可以获得另一个定义: $U=0$ (PN 被短路时)的短路电流 I_{sc} 为

$$I_{sc} = -I_\phi = \frac{\eta q \lambda}{hc} (1 - e^{-ad}) \Phi_{e\lambda} \quad (5-2)$$

同样,当 $I=0$ 时(PN 结开路),PN 结两端的开路电压为

$$U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_\phi}{I_D} + 1 \right) \quad (5-3)$$

这类器件的伏安特性如图 5.3 所示,取 U 、 I 和坐标轴正方向一致。

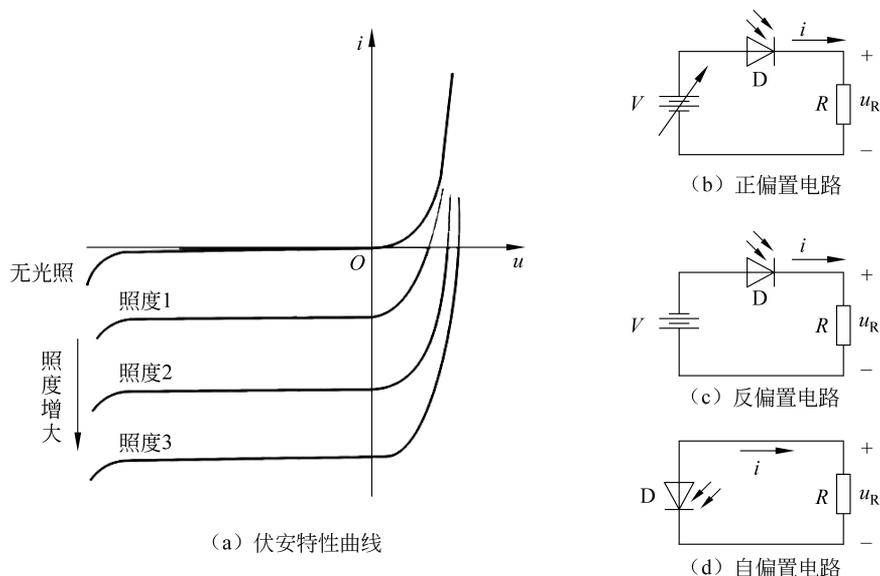


图 5.3 光伏特效应器件的伏安特性曲线和正偏置、反偏置、自偏置电路

当光伏特器件无光照时,光生电流源的值 $I_{\phi} = 0$, 于是等效电路只是起到一个二极管的作用,伏安特性曲线和一般的二极管相同,即图 5.3 中最上面一条曲线,该曲线通过坐标原点,当 U 为正值并增加时,电流 I 迅速上升;当 U 为负值并其绝对值增加时,反向电流很快达到饱和值 $I_d = I_D$, 且不随电压的变化而变化,直到击穿时电流再发生突变为止。

当有光照时,设入射的光照度 $1 = \Phi_{e\lambda}$, 对应的电流源产生的光电流为 I_{ϕ} , 使外电路电流变为 $I = I_d - I_{\phi}$, 对应的曲线下移一个距离 I_{ϕ} 。当入射光照度增加时,如照度 $2 = 2\Phi_{e\lambda}$, 照度 $3 = 3\Phi_{e\lambda}$, 对应的伏安特性曲线等距或者按照对应的间距下降,从而形成按照入射光通量变化的曲线簇。通过曲线簇可以发现,曲线与坐标系形成三个象限的交集,第一象限为正向偏置模式,第三象限为反向偏置模式,第四象限为自偏置模式。其中常用的为第三象限和第四象限,第三象限为光电导工作模式,光电二极管、PIN 光电二极管、雪崩型光电二极管(APD)、光电三极管均工作在这个模式。第四象限为光伏工作模式,光电池就工作在这个模式。下面对这些器件进行介绍。

5.1.1 光电二极管

利用光伏特效应最重要和最具代表性的光电器件就是光电二极管。光电二极管工作在第三象限,外电路的电压和电流均为负值,与图 5.2 所示等效电路中标注的方向相反,且工作在反偏状态下。目前最常用的光电二极管由硅或锗制成,硅材料暗电流小,温度系数小,制作工艺成熟,所以最常用的为硅光电二极管。

1. 光电二极管的基本结构

光电二极管可分为以 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 5.4(a)所示为 2DU 型光电二极管的结构原理图。在高阻轻掺杂 P 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 N 型层,形成 PN 结。为保护光敏面,在 N 型硅上氧化生成的极薄的 SiO_2 保护膜既可以保护光敏面,又可以增加器件对光的吸收。图 5.4(b)所示为光电二极管的工作原理图。光电二极管工作在反偏状态下,PN 结反向偏置,光照产生光电流,光电流在负载电阻 R_L 上产生与入射光度量相关的信号输出。图 5.4(c)所示为光电二极管的电路符号,图中的前极为光照面,后极为背光面。

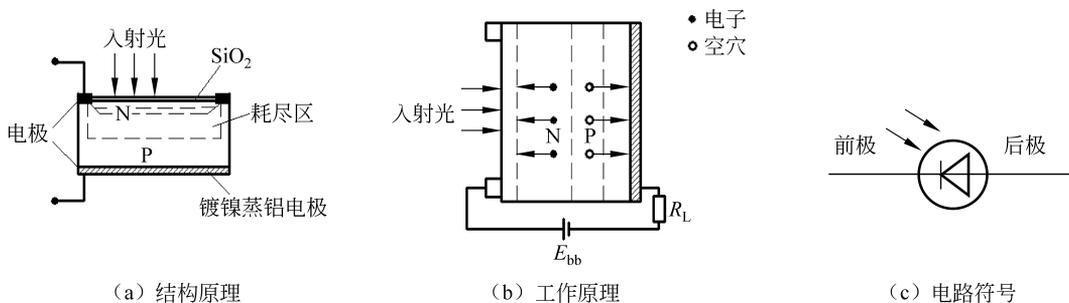


图 5.4 硅光电二极管

2. 光电二极管的主要特性

1) 光特性

描述光电流 I 随入射光照强度或光通量的变化关系曲线,即 $I=f(\Phi)$ 或 $I=f(E)$ 。硅光电二极管的光特性曲线为直线,线性度好,适用于光度量测量,目前这种器件使用极广。

2) 光电二极管的灵敏度

当光辐射作用到如图 5.4(b)所示的光电二极管上时,光生电流为

$$I = -\frac{\eta q \lambda}{hc} (1 - e^{-\alpha d}) \Phi_{\text{ca}} + I_D (e^{\frac{qU}{kT}} - 1) \quad (5-4)$$

式中, η 为光电材料的光电转换效率, α 为材料对光的吸收系数。

光电二极管的光电流灵敏度定义为入射到光敏面上辐射量的变化引起的电流变化 dI 与辐射量变化 $d\Phi$ 之比。通过对式(5-4)进行微分,可以得到

$$S_i = \frac{dI}{d\Phi} = \frac{\eta q \lambda}{hc} (1 - e^{-\alpha d}) \quad (5-5)$$

显然,当某波长 λ 的辐射作用于光电二极管时,其电流灵敏度为与材料有关的常数,表明光电二极管的光电转换特性的线性关系。必须指出,电流灵敏度与入射辐射波长 λ 的关系很复杂,因此在定义光电二极管的电流灵敏度时,通常将其峰值响应波长的电流灵敏度作为光电二极管的电流灵敏度。在式(5-5)中,表面上看它与波长 λ 成正比,但是,材料的吸收系数 α 还隐含着与入射辐射波长的关系,因此常把光电二极管的电流灵敏度与波长的关系曲线称为光谱响应。

3) 光电二极管的光谱响应

以等功率的不同单色辐射波长的光作用于光电二极管时,其响应程度或电流灵敏度

与波长的关系称为其光谱响应。该特性通常由材料决定。图 5.5 所示为几种典型材料光电二极管的光谱响应曲线。由光谱响应曲线可以看出,典型硅光电二极管的光谱响应范围为 $0.4\sim 1.1\mu\text{m}$,峰值响应波长约为 $0.9\mu\text{m}$ 。GaAs 材料的光谱响应范围小于硅材料的光谱响应范围,锗(Ge)的光谱响应范围较宽。通过图 5.5 还可以看出,几条曲线均呈现钟形分布,随着波长的增大,光子能量减小,直到红波限波长不足以激发电子-空穴对为止;反之,随着光波长的减小,光子能量增加,相同能量所含的光子数相对减少。此外,短波光子的透入性差,只在表面激发载流子,这些载流子到达 PN 结的概率减小,所以光谱曲线在短波处下降。如果采用浅的 PN 结结合表面处理,则可提高短波的光谱响应。其他器件光谱响应钟形分布与此类似。

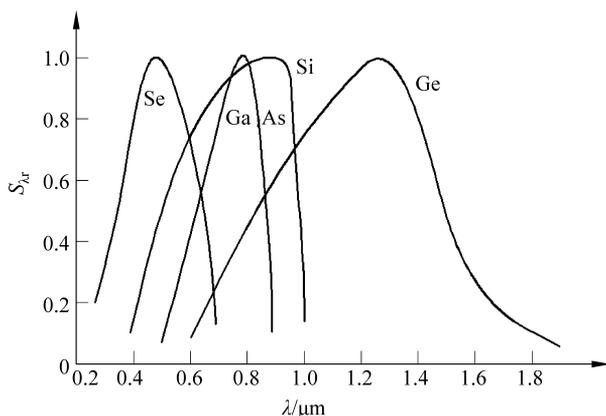


图 5.5 典型材料光电二极管的光谱响应曲线

4) 时间响应

以频率 f 调制的辐射作用于 PN 结硅光电二极管光敏面时,PN 结硅光电二极管的电流产生要经过下面 3 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。

(2) 在 PN 结区外产生的光生载流子扩散到 PN 结区内需要的时间 τ_{p} 称为扩散时间。

(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 延迟时间记为 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

$$\tau_{\text{dr}} = W/v_d \quad (5-6)$$

一般的 PN 结硅光电二极管,内电场强度都在 10^5 V/cm 以上,载流子的平均漂移速度要高于 10^7 cm/s ,PN 结区的宽度常在 $100\mu\text{m}$ 左右,由式(5-6)可知漂移时间 $\tau_{\text{dr}} = 10^{-9} \text{ s}$,为 ns 数量级。

对于 PN 结硅光电二极管,入射辐射在 PN 结势垒区以外激发的光生载流子必须经过扩散运动到势垒区内才能受内建电场作用,并分别拉向 P 区与 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 100ns ,它是限制 PN 结硅光电二极管时间响应的主要因素。

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

$$\tau_{RC} = C_j(R_i + R_L) \quad (5-7)$$

普通 PN 结硅光电二极管的管芯内阻 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, 时间常数也在 ns 数量级。但是, 当负载电阻 R_L 很大时, 时间常数将成为影响硅光电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 结硅光电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 结区是提高硅光电二极管时间响应的重要措施。增高反向偏置电压会提高内建电场的强度, 扩展 PN 结的耗尽区。但是, 反向偏置电压的提高也会加大结电容, 使 RC 时间常数 τ_{RC} 增大。因此, 必须从 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散到整个 PN 结器件, 才能消除扩散时间。

例 1: 某光电二极管的结电容 $C_j = 5\text{pF}$, 要求带宽为 10MHz , 试求允许最大负载电阻为多少?

$$\text{解: 由 } \tau_{RC} = \frac{1}{2\pi f} = \frac{1}{2\pi \times 10 \times 10^6} = 1.6 \times 10^{-8} \text{ s}$$

PN 结电容 C_j 、管芯电阻 R_i 及负载电阻 R_L 构成的时间常数为 τ_{RC} 。其中, 普通 PN 结光电二极管的管芯内阻 R_i 约为 250Ω , 有

$$\tau_{RC} = C_j(R_i + R_L)$$

则允许的最大负载电阻为

$$R_L = \frac{\tau_{RC}}{C_j} - R_i = \frac{1.6 \times 10^{-8}}{5 \times 10^{-12}} - 250 = 2950(\Omega)$$

5) 温度特性

光电二极管的光电流随温度的变化会产生较大变化, 在精密的光电测量系统中需要消除这一影响。一是通过电路或者计算机系统对该特性进行温度修正; 二是使探测器在恒温的状态下工作, 这种方法效果好, 但是会增加装置的复杂性。

6) 噪声

与光敏电阻一样, 光电二极管的噪声包含低频噪声 I_{nf} 、散粒噪声 I_{ns} 和热噪声 I_{nT} 三种。其中, 散粒噪声是光电二极管的主要噪声。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

$$I_{ns}^2 = 2qI\Delta f \quad (5-8)$$

光电二极管的电流应包括暗电流 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

$$I_{ns}^2 = 2q(I_D + I_s + I_b)\Delta f \quad (5-9)$$

根据电流方程, 并考虑反向偏置情况, 将光电二极管电流与入射辐射的关系, 即式(5-4)代入式(5-9)得

$$I_{ns}^2 = \frac{2q^2\eta\lambda(\Phi_s + \Phi_b)}{hc}\Delta f + 2qI_D\Delta f \quad (5-10)$$

5.1.2 PIN 型光电二极管

考虑到二极管的频率响应特性, 为减小载流子的扩散时间和结电容, 人们设计出一种

在 P 区和 N 区之间相隔一本征层(I 区)的 PIN 型光电二极管。其构成如图 5.6(a)所示。PIN 结构的光电二极管与 PN 结型的光电二极管在外形上没有什么区别,如图 5.6(b)所示。

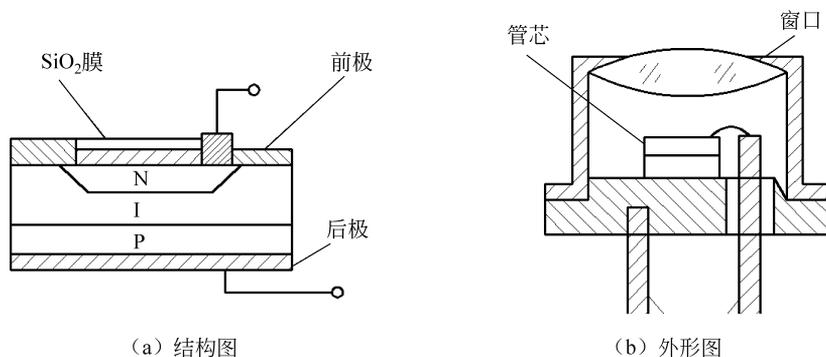


图 5.6 PIN 型光电二极管的结构图和外形图

PIN 型光敏二极管在反向电压作用下,耗尽区扩展到整个半导体,光生载流子在内建电场的作用下只产生漂移电流,因此,PIN 型光敏二极管在反向电压作用下的时间响应只取决于 τ_{dr} 与 τ_{RC} , 提高了时间响应。性能良好的 PIN 光电二极管,扩散和漂移时间一般在 10^{-10} s 量级,相当于千兆赫的频率响应。它在光通信、光雷达以及其他快速光电自动控制领域得到非常广泛的应用。

无光照时,PIN 作为一种 PN 结器件,在反向偏压下也有反向电流流过,这一电流称为 PIN 光电二极管的暗电流。它主要由 PN 结内热效应产生的电子-空穴对形成。当反向偏压增大时,暗电流增大。当反向偏压增大到一定值时,暗电流激增,产生了反向击穿(非破坏性的雪崩击穿,如果此时不能尽快散热,就会变为破坏性的齐纳击穿)。发生反向击穿的电压值称为反向击穿电压。Si-PIN 的典型击穿电压值为 100V 左右。PIN 工作时的反向偏置都远离击穿电压,一般为 10~30V。

5.1.3 雪崩型光电二极管

PIN 型光电二极管提高了 PN 结光电二极管的时间响应,但未能提高器件的光电灵敏度,为了提高光电二极管的灵敏度,人们设计了雪崩光电二极管,使光电二极管的光电灵敏度提高到需要的程度。

1. 结构

图 5.7 所示为三种雪崩光电二极管的结构示意图。图 5.7(a)所示为在 P 型硅基片上扩散杂质浓度大的 N^+ 层,制成 P 型 N 结构;图 5.7(b)所示为在 N 型硅基片上扩散杂质浓度大的 P^+ 层,制成 N 型 P 结构的雪崩光电二极管;由于 PIN 型光电二极管在较高的反向偏置电压的作用下耗尽区扩展到整个 PN 结区,形成自身保护(具有很强的抗击穿功能),如图 5.7(c)所示,因此雪崩光电二极管不必设置保护环。目前,市场上的雪崩光电二极管基本上都是 PIN 型的。

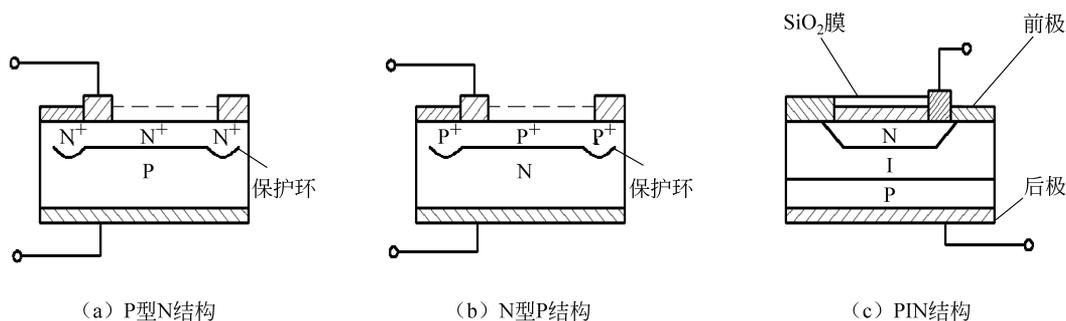


图 5.7 三种雪崩光电二极管的结构示意图

2. 工作原理

雪崩光电二极管为具有内增益的一种光生伏特器件。它利用光生载流子在强电场内的定向运动,产生雪崩效应获得光电流增益,其原理如图 5.8 所示。

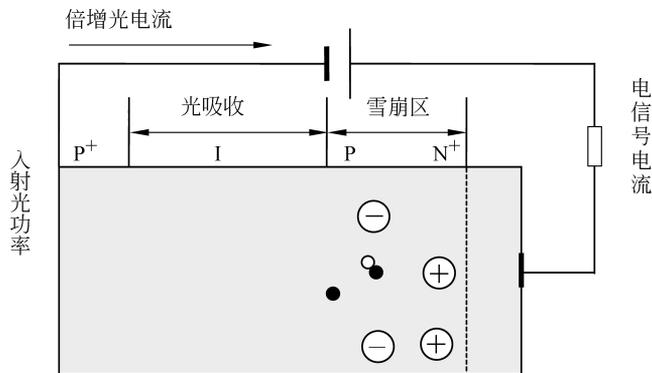


图 5.8 雪崩光电二极管的原理图

在雪崩过程中,光生载流子在强电场的作用下进行高速的定向运动,具有很高动能的光生电子或空穴与晶格原子碰撞,使晶格原子电离产生二次电子-空穴对;二次电子-空穴对在电场作用下获得足够的动能,又使晶格原子电离产生新的电子空穴对,此过程像“雪崩”一样继续下去。电离产生的载流子数远大于光激发产生的光生载流子,这时雪崩光电二极管的输出电流迅速增加。其电流倍增系数 M 定义为

$$M = I / I_0 \quad (5-11)$$

式中, I 为倍增输出的电流, I_0 为倍增前输出的电流。

适当调节雪崩光电二极管的工作偏压,可得到较大的倍数系数。目前,雪崩光电二极管的偏压分为低压和高压两种,低压在几十伏左右,高压达几百伏。雪崩光电二极管的倍增系数可达几百倍,甚至数千倍。

3. 噪声

由于雪崩光电二极管中载流子的碰撞电离是不规则的,碰撞后的运动方向更是随机的,所以它的噪声比一般光电二极管要大。在无倍增的情况下,其噪声电流主要为如

式(5-12)所示的散粒噪声。当雪崩倍增 M 倍后,雪崩光电二极管的噪声电流的均方根值可近似由式(5-12)计算。

$$I_n^2 = 2qIM^n \Delta f \quad (5-12)$$

式中,指数 n 与雪崩光电二极管的材料有关。对于锗管, $n=3$; 对于硅管, $2.3 < n < 2.5$ 。

显然,由于信号电流按 M 倍增大,而噪声电流按 $M^{n/2}$ 倍增大。因此,随着 M 的增大,噪声电流比信号电流增大得更快。

雪崩光电二极管的最佳工作点位于雪崩击穿点附近,有时为了压低暗电流,会往小移动一些,虽然灵敏度有所降低,但是暗电流和噪声特性有所改善。雪崩击穿点附近电流随电压的变化比较明显,当反向偏压有较小变化时,光电流将有较大的变化。另外,在雪崩过程中 PN 结上的反向偏压容易产生波动,将影响增益的稳定性。因此,在确定工作点后,对偏压稳定性要求很高。

5.1.4 光电三极管

在光电二极管的基础上,为了获得内增益,可以利用三极管的电流放大原理,这就是光电三极管。

光电三极管与普通半导体三极管一样有两种基本结构,即 NPN 结构与 PNP 结构。用 N 型硅材料为衬底制作的光电三极管为 NPN 结构,称为 3DU 型;用 P 型硅材料为衬底制作的光电三极管称为 PNP 结构,也称为 3CU 型。图 5.9(a)所示为 3DU 型 NPN 光电三极管的工作原理结构,图 5.9(b)所示为光电三极管的电路符号,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,但仍然称为光电三极管,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。

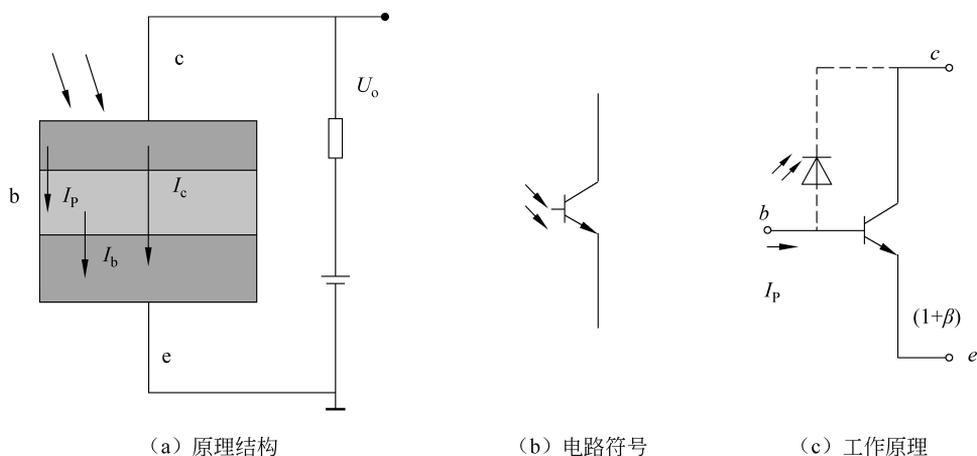


图 5.9 3DU 型硅光敏三极管

1. 工作原理

光电三极管的工作原理分为两个过程:一是将光信号转换成电信号,起到一个光电二极管的作用;二是起到一个三极管的作用,将光电流放大。下面以 NPN 型硅光电三极

管为例,讨论其基本工作原理。光电转换过程与一般光电二极管相同,在集-基 PN 结区内进行。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,电子流向集电区被集电极收集,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 ,基极电流将被集电结放大 β 倍,放大原理与一般半导体三极管相同。不同的是,一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,而光电三极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

$$I_c = \beta I_P = \beta \frac{\eta q}{h\nu} (1 - e^{-ad}) \Phi_{e\lambda} \quad (5-13)$$

可以看出,光电三极管的电流灵敏度是光电二极管的 β 倍,相当于将光电二极管与三极管接成如图 5.9(c)所示的电路形式,光电二极管的电流 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。光电三极管除了比光电二极管灵敏度高外,其他如暗电流、温度特性均比光电二极管性能差,所以主要用于脉冲控制电路中。为了提高光电三极管频率响应、增益,减少体积,常将光电二极管、光电三极管或三极管制作在同一个硅片上构成集成光电器件。

2. 光电三极管的特性

1) 光谱响应

硅光电二极管与硅光电三极管具有相同的光谱响应,均有一个最佳灵敏度响应峰值波长。图 5.10 所示为典型的硅光电三极管 3DU3 的光谱响应特性曲线,它的响应范围为 $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$,峰值波长为 $0.85 \mu\text{m}$ 。在可见光或探测炽热状态物体时,一般选用硅管;但对红外线探测时,采用锗管较合适。

2) 伏安特性

图 5.11 所示为硅光电三极管在不同光照下的伏安特性曲线。光电三极管在偏置电压为零时,无论光照度有多强,集电极电流都为零。偏置电压要保证光电三极管的发射结处于正向偏置,而集电结处于反向偏置。随着偏置电压的增高,伏安特性曲线趋于平坦。但是,与光电二极管的伏安特性曲线不同,光电三极管的伏安特性曲线向上倾斜,间距增大。这是因为光电三极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

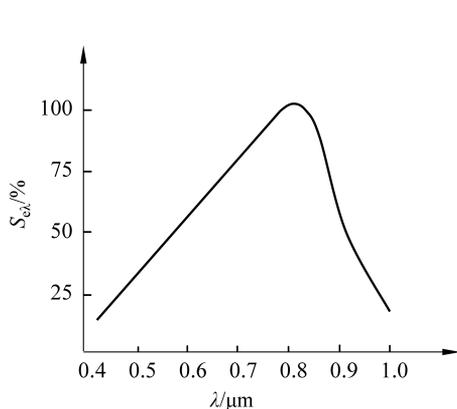


图 5.10 光电三极管的光谱特性曲线

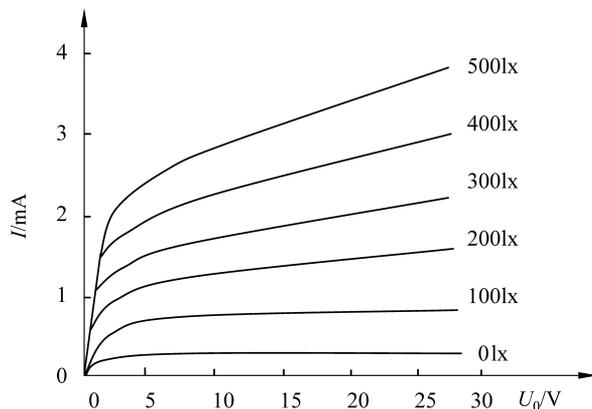


图 5.11 光电三极管的伏安特性曲线