

半导体光电子器件



第四章： 半导体光电探测器

- § 4.1 光电导效应与器件的基本结构
- § 4.2 光电探测器的基本参数
- § 4.3 光电探测器的噪声来源与参数
- § 4.4 光电二极管的基本结构与工作机制
- § 4.5 光电二极管的等效电路
- § 4.6 pin光电二极管
- § 4.7 异质结与肖特基光电二极管
- § 4.8 雪崩光电二极管

§4.1 光电导效应与器件基本结构

普通的光电探测器基本上有三个过程：

- (1) 入射光产生载流子；
- (2) 通过任何一种电流增加机构造成载流子输运或者倍增；
- (3) 电流与外电路相互作用提供输出信号。

一、光电导效应

$$\sigma_0 = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

$$\Delta\sigma_n = q\Delta n\mu_n$$

$$\Delta\sigma_p = q\Delta p\mu_p$$



$$\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma = q[(n + \Delta n)\mu_n + (p + \Delta p)\mu_p]$$

§4.1 光电导效应与器件基本结构

二、光电导器件基本结构

光生载流子产生率

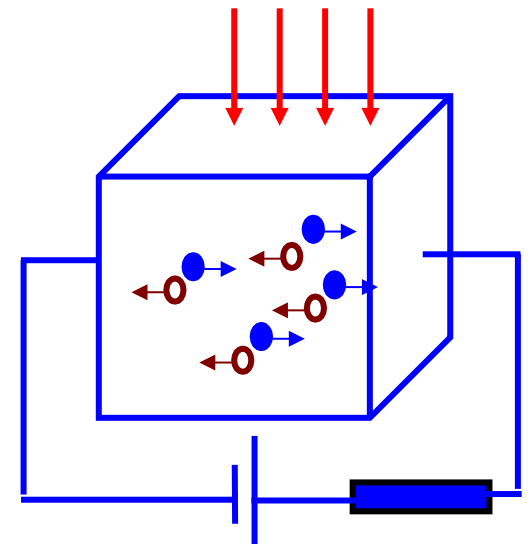
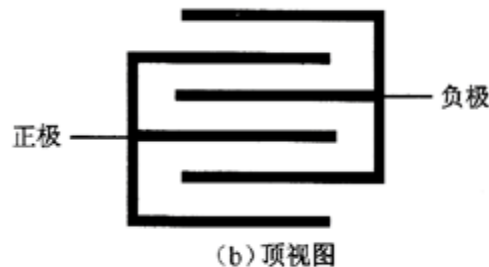
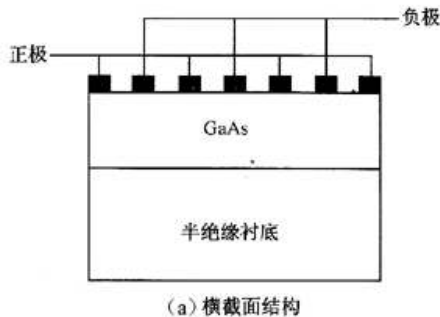
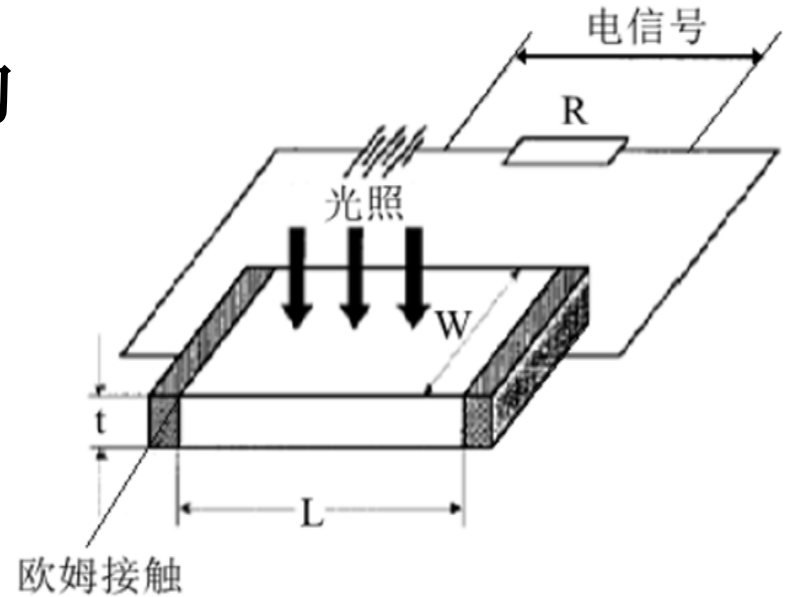
$$G = \eta \alpha N$$

光生载流子浓度的变化关系

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad \Delta n = G\tau_n = \eta \alpha N \tau_n$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G - \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad \Delta p = G\tau_p = \eta \alpha N \tau_p \quad \eta \text{ 为量子效率}$$

$$\Delta \sigma_0 = q(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p) = q \eta \alpha N (\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p)$$



§4.1 光电导效应与器件基本结构

三、光电流与暗电流

1. 光电流

光生面电流密度

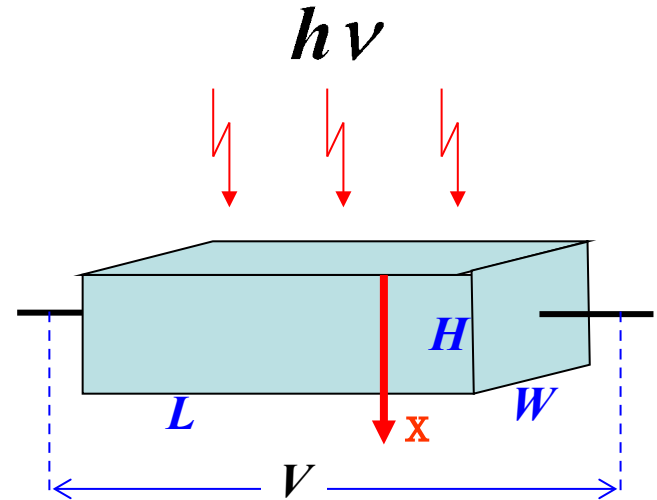
$$J_p(x) = \frac{qV}{L} [\Delta n(x)\mu_n + \Delta p(x)\mu_p]$$

产生率 = 复合率

$$f(x) = \frac{\Delta n(x)}{\tau_n} = \frac{\Delta p(x)}{\tau_p} \quad \text{即: } \Delta n(x) = \tau_n f(x) \quad \Delta p(x) = \tau_p f(x)$$

$$\therefore J_p(x) = \frac{qV}{L} [\Delta n(x)\mu_n + \Delta p(x)\mu_p] = \frac{qV}{L} \cdot f(x) \cdot (\tau_n\mu_n + \tau_p\mu_p)$$

$f(x)??$



第四章半导体光电探测器

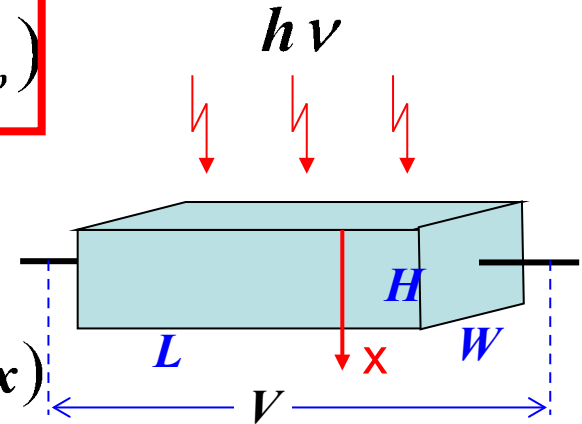
$f(x)??$

$$J_p(x) = \frac{qV}{L} \cdot f(x) \cdot (\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p)$$

Q x 截面光功率

$$p(x) = p_0 \cdot (1 - R) \cdot \exp(-\alpha x)$$

$$\therefore f(x) = \frac{\alpha \cdot p(x)}{h\nu \cdot W \cdot L} = \frac{\alpha \cdot p_0}{h\nu \cdot W \cdot L} (1 - R) \cdot \exp(-\alpha x)$$



故 $I_p = \frac{qV}{L} (\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p) W \cdot \int_0^H f(x) dx$

总光电流强度

$$= \frac{qV}{L} (\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p) W \cdot \int_0^H \frac{\alpha \cdot p_0}{h\nu \cdot W \cdot L} (1 - R) \cdot \exp(-\alpha x) \cdot dx$$

$$= \frac{qV}{L^2} (\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p) \frac{p_0}{h\nu} \cdot (1 - R) [1 - \exp(-\alpha H)]$$

令 $\eta' = (1 - R) [1 - \exp(-\alpha H)]$

有 $I_p = \frac{qV}{L^2} (\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p) \frac{p_0}{h\nu} \cdot \eta'$

提高 I_p 措施

$L \downarrow, H \uparrow, W \uparrow$
 $V(E) \uparrow$
 $\mu \uparrow, R \downarrow, \tau \uparrow$

§4.1 光电导效应与器件基本结构

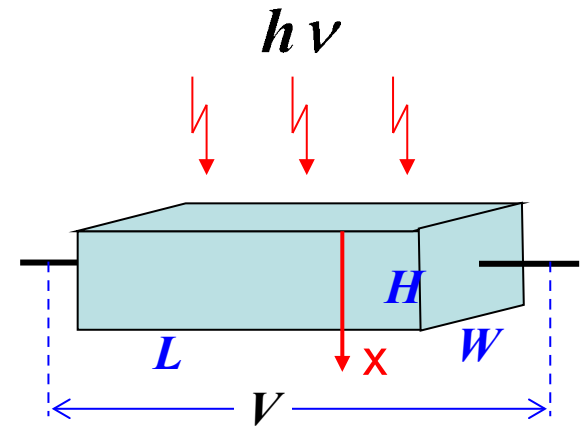
三、光电流与暗电流

2. 暗电流

与光电流对应的暗电流，是指在无光的黑暗环境下对光电探测器施加一定的偏压，探测器输出的电流值。光电探测器的暗电流越大，噪声功率就越大，探测能力就越弱，所以暗电流对设备的灵敏度影响很大。

对于光电导型的探测器，暗电流的大小主要取决于材料本身的电导率和偏压。

由于较大的暗电流会带来较严重的噪声问题，从实际应用的角度来讲，通常希望光电探测器的暗电流尽可能的小。



§4.2 光电探测器基本参数

一、光电导与光电流灵敏度

1. 光电导的灵敏度

光电导的灵敏度通常定义为单位入射光所产生的光电导率

$$S_R = \frac{\Delta\sigma}{N} = q\alpha\eta(\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p) \quad N \text{为光子数}$$

仅有光生电子和仅有光生空穴的情况下，其灵敏度分别为

$$S_{Rn} = q\alpha\eta\mu_n\tau_n \quad S_{Rp} = q\alpha\eta\mu_p\tau_p$$

有时也用光电导同暗电导的比值来表示光电导的灵敏度

$$S_{R0} = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0} \quad S_{R0} = \frac{\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p}{n_0\mu_n + p_0\mu_p}$$

n_0 和 p_0 越小，光电导灵敏度越高，所以应采用高阻低温材料做光电导元件。

§4.2 光电探测器基本参数

一、光电导与光电流灵敏度

2. 光电流灵敏度

光电流灵敏度定义为光电流与入射光功率的比值

$$\begin{aligned} S_I &= \frac{I_p}{P_0} \\ &= \frac{\frac{qV}{L^2} (\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p) \frac{P_0}{h\nu} \cdot \eta'}{P_0} \\ &= \frac{qV \cdot \eta'}{L^2} \cdot \frac{1}{h\nu} (\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p) \end{aligned}$$

§4.2 光电探测器基本参数

二、光电导量子效率与增益

1. 光电子量子效率

量子效率是体现光电探测器的转换能力的一个性能参数

$$\eta = \frac{I_p/q}{P/h\nu}$$

理想情况下的外量子效率为

$$\eta_{ex} = (1 - R)(1 - \exp(-\alpha \cdot H))$$

量子效率与灵敏度之间存在联系

$$\eta = \frac{h\nu}{q} S_l$$

§4.2 光电探测器基本参数

二、光电导量子效率与增益

2. 光电导增益

一个光生载流子对外电路贡献的载流子数。

考虑二点：复合，寿命

载流子存在寿命，动态平衡光生载流子形成一定分布；

一端流出，另一端补充，直至载流子复合；

寿命期间向外电路提供的载流子数，即增益：

$$G_L = \frac{\tau_n}{t_n} = \frac{\tau}{t_n} = \frac{\tau_n}{L} = \frac{\tau \mu_n V}{L^2}$$

$$G_L \rightarrow L \downarrow$$

$$\rightarrow \mu$$

$$\rightarrow \tau$$

$$\rightarrow V$$

§4.2 光电探测器基本参数

三、光电导弛豫

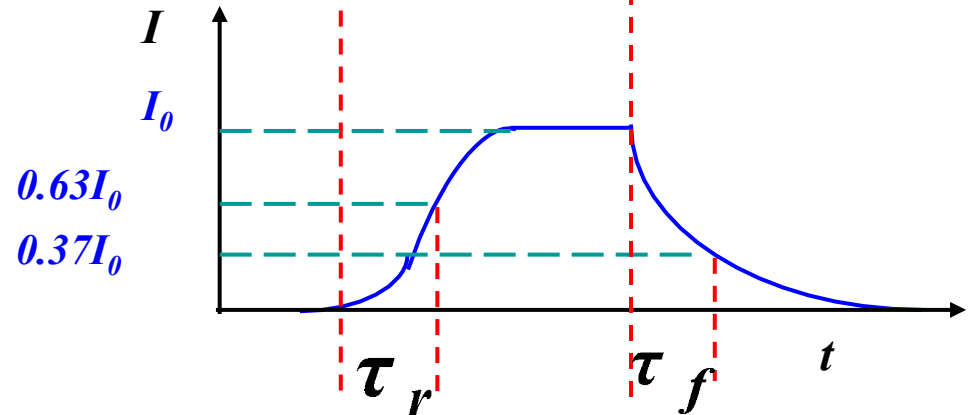
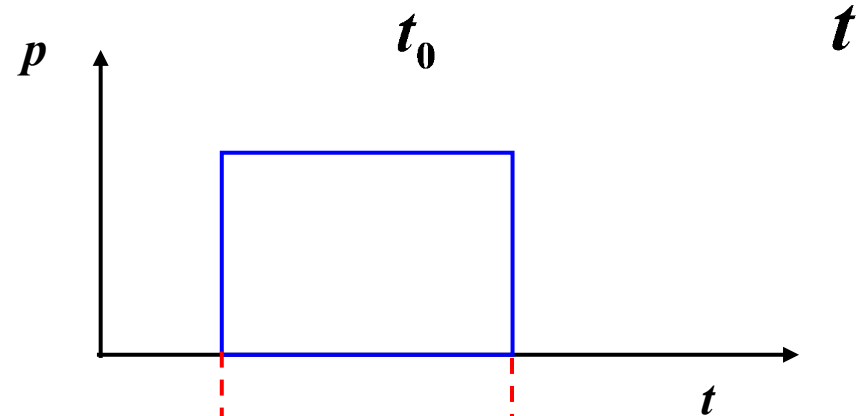
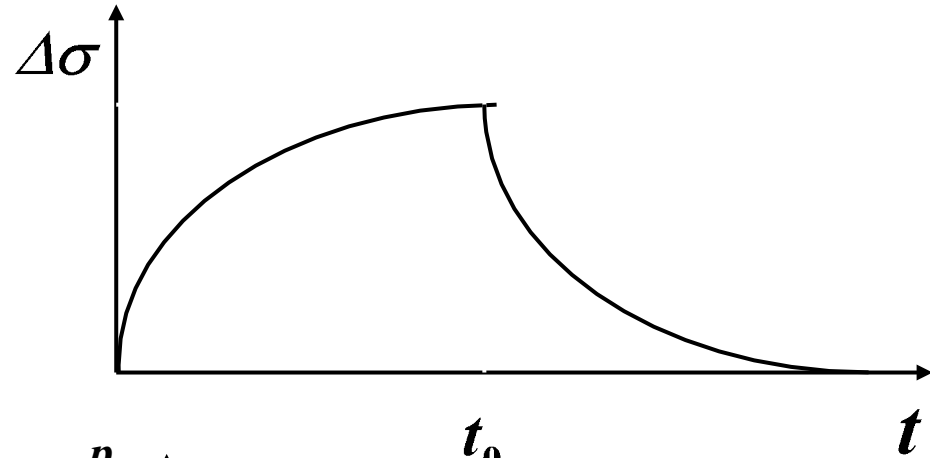
1. 响应时间（响应速度）

上升时间和下降时间之和被称为光电探测器的时间常数

$$\tau = \tau_r + \tau_f$$

$$I_s(t) = I_0 \left(1 - e^{-t/\tau_r} \right)$$

$$I_f(t) = I_0 e^{-t/\tau_f}$$

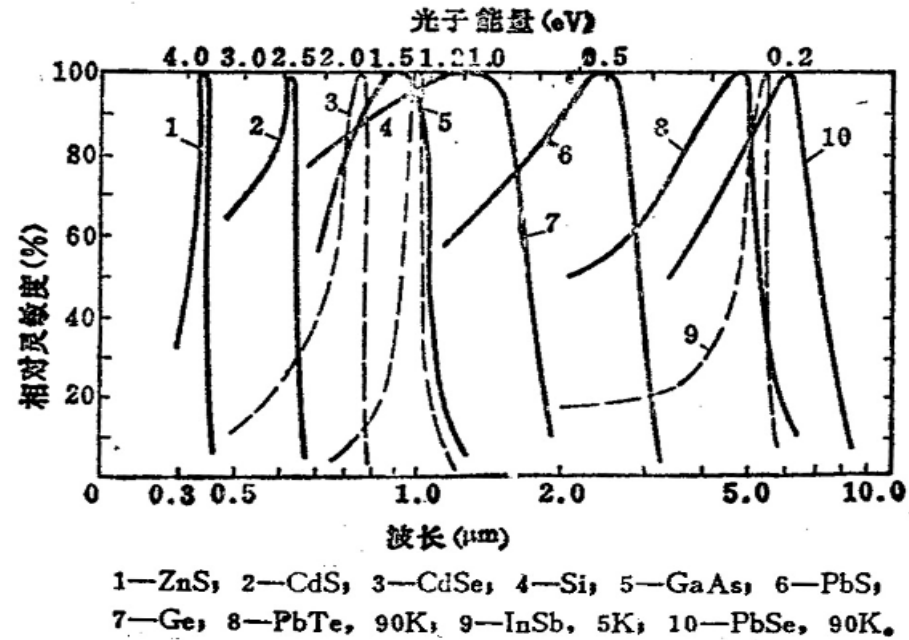


§4.2 光电探测器基本参数

三、光电导弛豫

2. 光谱响应

- 光谱响应特性是光电导的一个重要性能指标
- 决定着光电导的应用范围和灵敏度
- 光电导的光谱响应范围是由它的跃迁类型所决定的



某波长光波响应度与灵敏度表达式

$$R(\lambda) = \frac{V_p(\lambda)}{P(\lambda)} \quad \left(\frac{V}{W} \right)$$

$$S(\lambda) = \frac{I_p(\lambda)}{P(\lambda)} \quad \left(\frac{A}{W} \right)$$

§4.3 光电探测器噪声参数

一、噪声来源

噪声的来源多种多样，所有的光电探测器都会产生噪声，有些来自大自然，有些来自器件本身，还有些来自应用环境，无论来自哪里，都会对光电探测器的性能产生一定的影响。

研究表明热噪声、闪烁噪声、散粒噪声和产生-复合噪声是其内部噪声的主要部分。

特点：随机，不可预测；统计平均值为0。

表征：均方值（方均值）表述。

§4.3 光电探测器的噪声来源与参数

一、噪声来源

1. 噪声表征

均方值（方均值）表述

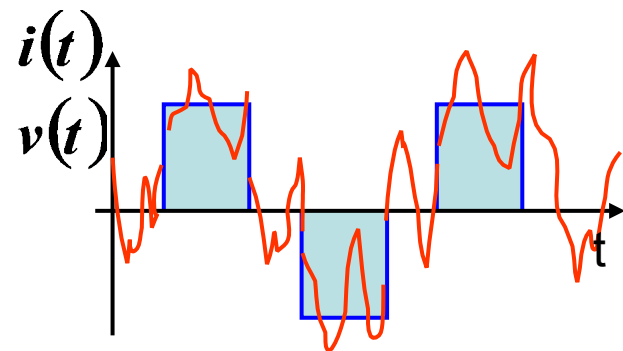
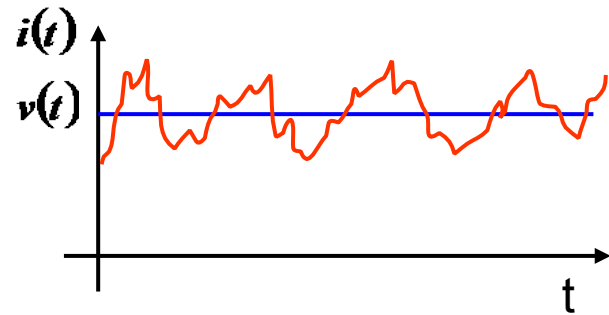
$$\overline{i_N^2} = \frac{1}{T} \int_0^T [i(t) - i(t)_{\text{平均}}]^2 dt$$

$$\overline{v_N^2} = \frac{1}{T} \int_0^T [v(t) - v(t)_{\text{平均}}]^2 dt$$

总噪声：

$$\overline{i_N^2} = \overline{i_{N1}^2} + \overline{i_{N2}^2} + \overline{i_{N3}^2} + \dots$$

$$\overline{v_N^2} = \overline{v_{N1}^2} + \overline{v_{N2}^2} + \overline{v_{N3}^2} + \dots$$



§4.3 光电探测器的噪声来源与参数

一、噪声来源

2. 热噪声 载流子无规则热运动（白噪声）

热噪声均方振幅电压值可表示为 $\overline{v_T^2} = 4KTR\Delta f$

电流均方值为 $\overline{i_T^2} = \frac{4KT\Delta f}{R}$

热噪声的功率谱密度为 $p_T(f) = 4KTR$

3. 散粒噪声

散粒噪声均方振幅电压值可表示为

$$\overline{v_s^2} = 2qI\Delta fR^2$$

电流均方值为 $\overline{i_s^2} = 2qI\Delta f$ 功率谱密度为 $p_T(f) = 2qIR$

热电子的随机发射产生的噪声，称为散粒噪声，也被称为散弹噪声

§4.3 光电探测器的噪声来源与参数

一、噪声来源

4. 产生-复合噪声

均方振幅电压值可表示为

$$\overline{v_{g-r}^2} = 4qI\Delta fM^2R^2$$

电流均方值为

$$\overline{i_{g-r}^2} = 4qI\Delta fM^2$$

5. 闪烁噪声

电流均方值为

$$\overline{i_f^2} = \frac{AI^\alpha \Delta f}{f^\beta}$$

功率谱密度为

$$p_f(f) \cong 1/f$$

电子-空穴对的产生与复合是随机起伏的，产生-复合噪声的实质是散粒噪声，然而为了突出产生与复合两个要素的作用，将其称作产生-复合散粒噪声，简称为产生-复合噪声

闪烁噪声是由负极表层部分的不均匀，产生随机激发的电子，它是频率范围在1KHz以内的低频噪声，也称为低频噪声和1/f噪声

§4.3 光电探测器的噪声来源与参数

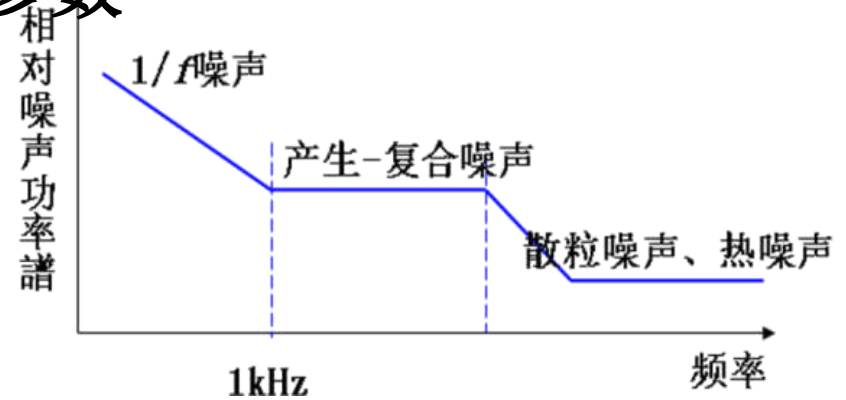
一、噪声来源

6. 光子噪声

电流均方值为

$$\overline{i_p^2} = 2qI\Delta f$$

光子噪声指光子在传输过程中的起伏，引起光生电流的起伏所产生的噪声

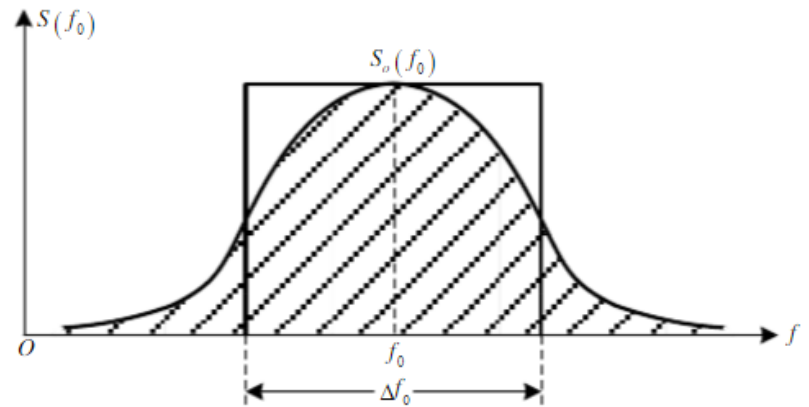


7. 等效噪声带宽

等效噪声带宽 Δf

$$\Delta f = \frac{1}{A_m} \int_0^{\infty} A(f) df$$

A_m - 最大功率增益 $A(f)$ - 频谱功率增益



§4.3 光电探测器的噪声来源与参数

二、光电探测器噪声参数

1. 等效噪声功率-NEP

等效噪声功率是指当光电探测器的信噪比等于1时入射光信号的功率大小，它反映了光电探测器噪声电压的大小及其探测微弱信号的能力。

即探测器输出的光信号电流等于噪声电流时的光功率。

单位面积上的辐射光功率，也就是噪声等效功率与光电探测器靶面积的比值

$$NEI = \frac{NEP}{A_D}$$

$$NEP = \frac{P}{\frac{I_P}{\sqrt{i_N^2}}} = \frac{\sqrt{i_N^2}}{\frac{I_P}{P}} = \frac{\sqrt{i_N^2}}{S} \quad (W)$$

$\therefore NEP \downarrow \downarrow \rightarrow$ 探测微弱信号能力引

§4.3 光电探测器的噪声来源与参数

二、光电探测器噪声参数

2. 归一化探测率

人们采用NEP的倒数来表示探测能力，越大则探测器的灵敏度越高

$$D = \frac{1}{NEP} = \frac{S}{\sqrt{i_N^2}}$$

$$D^*(\lambda, f, \Delta f) = \frac{S}{\frac{\sqrt{i_N^2}}{(A \times \Delta f)^{1/2}}}$$
$$= \frac{1}{\frac{NEP}{(A \times \Delta f)^{1/2}}} = D \times (A \times \Delta f)^{1/2}$$

§4.4 光电二极管的基本结构与工作机制

功能：将光信号转换成电信号的pn结二极管。

类型：光电二极管(常规pn结型)；

pin光电二极管；

雪崩光电二极管；

金属-半导体(势垒接触)光电二极管；

光电晶体管(双极型、单极型)。

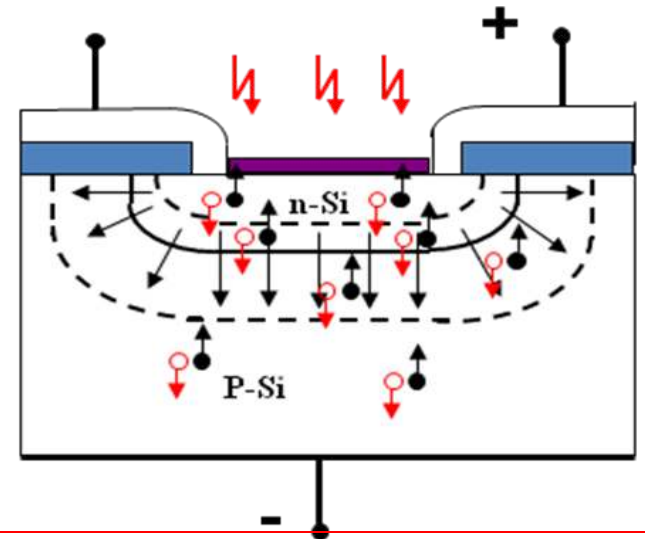
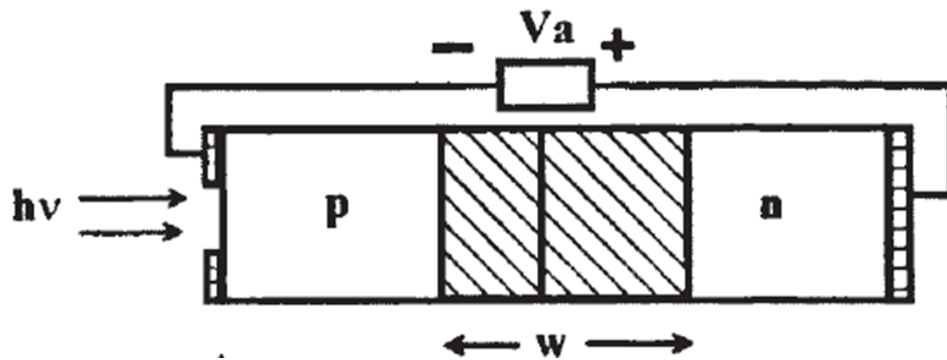
原理：光生载流子定向运动；

光生载流子区域---

中性区、扩散区、空间电荷区。

§4.4 光电二极管的基本结构与工作机制

一、光电二极管的基本结构

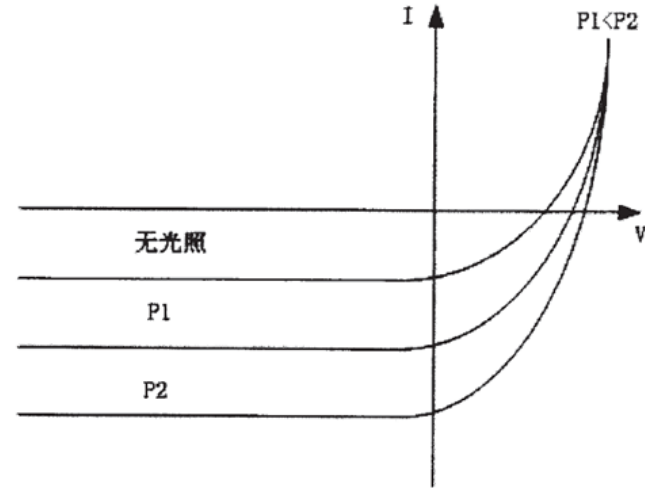
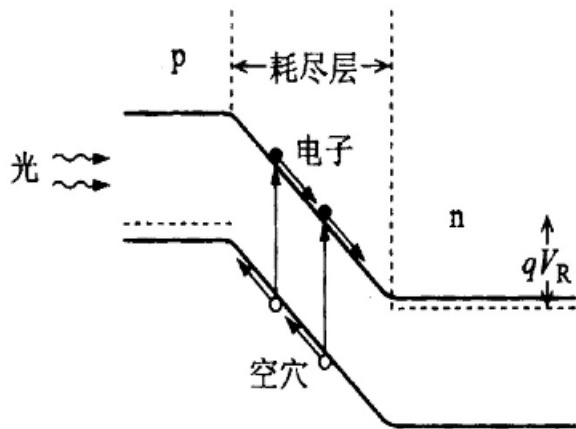


在外加反向偏压和内建电势共同产生的电场作用下，电子向n区漂移，空穴向p区漂移，从而在外电路中产生电流，即为光生电流。吸收入射光子而产生光生载流子的区域，称为吸收区。

高速工作时，耗尽区必须保持很薄以缩短渡越时间；为了增加量子效率（每个入射光子产生的电子--空穴对数目），耗尽区必须足够厚，在响应速度和量子效率之间应取折中。

§4.4 光电二极管的基本结构与工作机制

二、光电二极管的工作机制



pn结反偏;

光生载流子构成输出电流。

对光生电流有贡献区域?

光生电流与光电池是否相等?

光生电流是否常数(理想)?

所有光生载流子区

一般不等

一般常数

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/875302014334011203>