

7.3 复合理论¹¹

7.3.3 间接复合

— τ 与 E_t 能级位置的关系

简单假设 $r_n = r_p = r$, 则

$$U = \frac{N_t r (np - n_i^2)}{(n + n_1) + (p + p_1)}$$

$$= \frac{N_t r (np - n_i^2)}{(n + p) + 2n_i \operatorname{ch}\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right)}$$

当 $E_t = E_i$ 时, U 极大

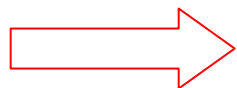
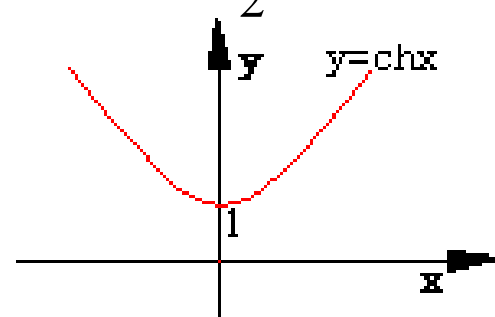
当 $|E_t - E_i| \gg kT$ 时, $U \rightarrow 0$

净复合率 $U = \frac{N_t r_n r_p (np - n_i^2)}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)}$

$$n_1 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_t}{kT}\right)$$

$$p_1 = N_V \exp\left(-\frac{E_t - E_V}{kT}\right)$$

双曲余弦 $\operatorname{ch}(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$



深能级 —— 有效的复合中心

7.3 复合理论¹²

7.3.3 间接复合

— τ 与温度 T 的关系 (设 n 型半导体, 且 E_t 位于禁带上半部)

1° 低温 $E_F > E_t$ $\tau = \frac{1}{N_t r_p}$

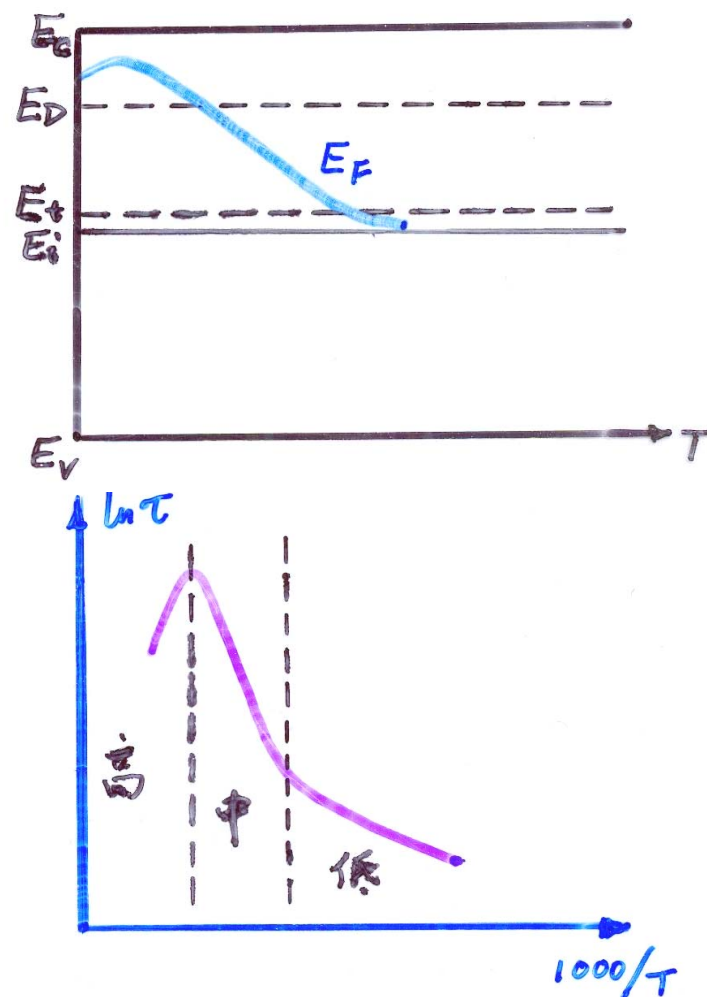
$$r_p = \sigma_+ \bar{v} T \propto T^{1/2} \propto T^{-n} \quad n = 2 \sim 4$$

2° 中温 $E_F < E_t$ $\tau = \frac{1}{N_t r_p} \frac{n_1}{n_0}$

$$N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_t}{kT}\right) \quad N_D$$

3° 高温 $E_F \approx E_i$ $\tau = \frac{1}{N_t r_p} \frac{n_1}{n_0}$

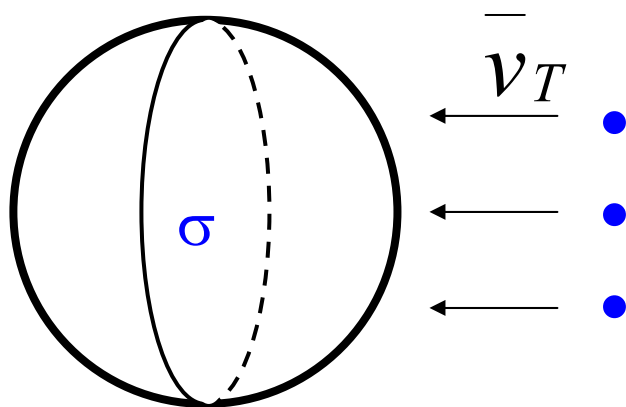
$$n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \quad n_i$$



7.3 复合理论¹³

7.3.3 间接复合

—俘获截面



单位时间内某个复合中心俘获电子（或空穴）的数目

$$n \cdot r_n = \sigma_- \bar{v}_T \cdot n$$

$$r_n = \sigma_- \bar{v}_T$$

$$r_p = \sigma_+ \bar{v}_T$$

$[cm^2]$

$[cm^3s^{-1}]$

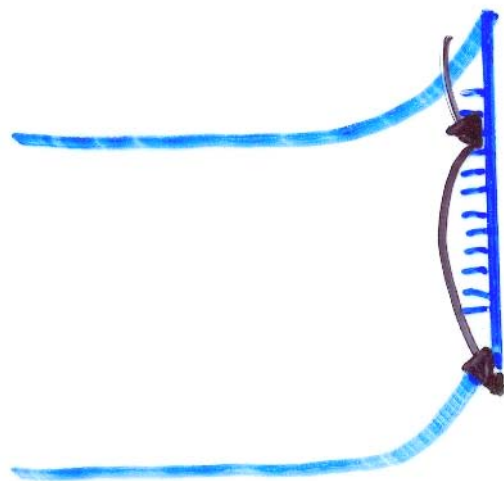
r_n 、 r_p 均可用 σ_- 、 σ_+ 来替换， $\sigma_{\pm} = 10^{-13} \sim 10^{-17} cm^2$

7.3 复合理论¹⁴

7.3.4 表面复合

表面态，通常都是深能级

——有效的复合中心



表面复合率

$$U_s = \frac{\text{复合数目}}{\text{单位时间} \cdot \text{单位表面积}} = s_p \cdot (\Delta p)_s$$

$[\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}] \qquad \qquad [\text{cm/s}][\text{cm}^{-3}]$

$$U_s = \sigma_+ \bar{v}_T N_{st} \cdot (\Delta p)_s = s_p \cdot (\Delta p)_s$$

\uparrow
 复合中心面密度

表面复合速度 $s_p = \sigma_+ \bar{v}_T N_{st}$

第七章 非平衡载流子

7.1 非平衡载流子的注入与复合

7.2 准费米能级

7.3 复合理论

7.4 陷阱效应

7.5 载流子的扩散运动

7.6 载流子的漂移运动、双极扩散

7.7 连续性方程

7.4 陷阱效应₁

7.4.1 陷阱现象

$$E_C \quad \underline{n_0 + \Delta n}$$

$$E_t \quad \text{---} \quad n_t^0 + \Delta n_t$$

$$E_V \quad \underline{p_0 + \Delta p}$$

$$\Delta p \neq \Delta n$$

$$\Delta p = \Delta n + \Delta n_t$$

若 $\Delta n_t > 0$, 电子陷阱作用

若 $\Delta n_t < 0$, 空穴陷阱作用

有效的陷阱: 在 N_t 较低条件下,
 $\Delta n_t \gg \Delta n \text{ (} \Delta p \text{)}$.

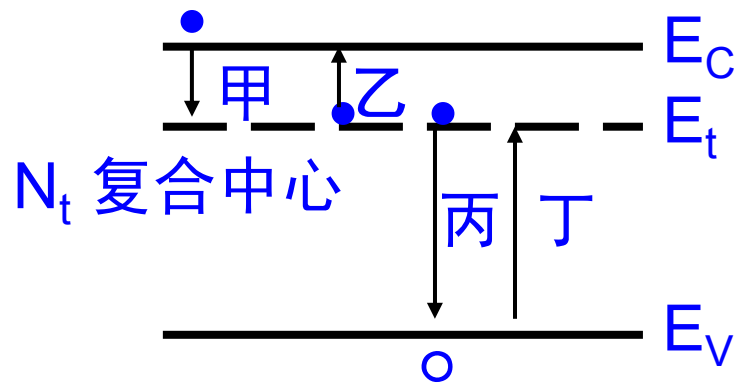
杂质能级积累非平衡载流子的作用称为陷阱效应

7.4 陷阱效应₂

7.4.2 成为陷阱的条件

杂质能级上的电子数

$$n_t = N_t \frac{r_n n + r_p p_1}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)}$$



$$\Delta n_t = \left(\frac{\partial n_t}{\partial n} \right)_0 \Delta n + \left(\frac{\partial n_t}{\partial p} \right)_0 \Delta p$$

$$n_t^0 = N_t \frac{r_n n_0 + r_p p_1}{r_n (n_0 + n_1) + r_p (p_0 + p_1)}$$

$$\left(\frac{\partial n_t}{\partial n} \right)_0 = N_t \frac{r_n [r_n (n_0 + n_1) + r_p (p_0 + p_1)] - r_n (r_n n_0 + r_p p_1)}{[r_n (n_0 + n_1) + r_p (p_0 + p_1)]^2}$$

$$= N_t \frac{r_n (r_n n_1 + r_p p_0)}{[r_n (n_0 + n_1) + r_p (p_0 + p_1)]^2}$$

$$\left(\frac{\partial n_t}{\partial p} \right)_0 = -N_t \frac{r_p (r_n n_0 + r_p p_1)}{[r_n (n_0 + n_1) + r_p (p_0 + p_1)]^2}$$

A

7.4 陷阱效应₃

7.4.2 成为陷阱的条件

$$\Delta n_t = \left(\frac{\partial n_t}{\partial n} \right)_0 \Delta n + \left(\frac{\partial n_t}{\partial p} \right)_0 \Delta p$$

$$\left(\frac{\partial n_t}{\partial n} \right)_0 = Ar_n (r_n n_1 + r_p p_0)$$

$$\left(\frac{\partial n_t}{\partial p} \right)_0 = -Ar_p (r_n n_0 + r_p p_1)$$

$$E_C \quad \frac{n_0 + \Delta n}{\quad}$$

$$E_t \quad \frac{n_t^0 + \Delta n_t}{\quad}$$

$$E_V \quad \frac{p_0 + \Delta p}{\quad}$$

$$\Delta p \neq \Delta n$$

$$\Delta p = \Delta n + \Delta n_t$$

若 $\Delta n_t > 0$, 电子
陷阱作用

若 $\Delta n_t < 0$, 空穴
陷阱作用

$$\begin{cases} \Delta n_t = Ar_n (r_n n_1 + r_p p_0) \Delta n - Ar_p (r_n n_0 + r_p p_1) \Delta p \\ \Delta n_t = \Delta p - \Delta n \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta n_t}{\Delta n} = \frac{Ar_n (r_n n_1 + r_p p_0) - Ar_p (r_n n_0 + r_p p_1)}{1 + Ar_p (r_n n_0 + r_p p_1)} = \frac{1 + Ar_n (r_n n_1 + r_p p_0)}{1 + Ar_p (r_n n_0 + r_p p_1)} - 1$$

$$\frac{\Delta n_t}{\Delta n} > 0 \quad \text{—— 电子陷阱}$$

7.4 陷阱效应₄

7.4.2 成为陷阱的条件

$$\frac{\Delta n_t}{\Delta n} = \frac{Ar_n(r_n n_1 + r_p p_0) - Ar_p(r_n n_0 + r_p p_1)}{1 + Ar_p(r_n n_0 + r_p p_1)} = \frac{1 + Ar_n(r_n n_1 + r_p p_0)}{1 + Ar_p(r_n n_0 + r_p p_1)} - 1$$

成为有效电子陷阱的条件: $\frac{\Delta n_t}{\Delta n} \gg 1$

则要求 $Ar_n(r_n n_1 + r_p p_0) \gg Ar_p(r_n n_0 + r_p p_1) \gg 1$

或 $Ar_n(r_n n_1 + r_p p_0) \gg 1 \gg Ar_p(r_n n_0 + r_p p_1)$

简单地 $r_n \gg r_p$

$$\Delta n_t = Ar_n(r_n n_1 + r_p p_0)\Delta n - Ar_p(r_n n_0 + r_p p_1)\Delta p$$

$$\Delta n_t \approx \left(\frac{\partial n_t}{\partial n} \right)_0 \Delta n \approx N_t \frac{r_n(r_n n_1 + 0)}{[r_n(n_0 + n_1)]^2} \Delta n = N_t \frac{n_1}{(n_0 + n_1)^2} \Delta n$$

7.4 陷阱效应⁵

7.4.2 成为陷阱的条件

$$r_n \gg r_p$$

$$\Delta n_t = N_t \frac{n_1}{(n_0 + n_1)^2} \Delta n$$

1° 当 $n_1 = n_0$ (即 $E_t = E_F$) 时 $(\Delta n_t)_{\max} = \frac{N_t}{4n_0} \Delta n$

2° 要使 Δn_t 大, n_0 最好为少子, 即 p 型半导体.

$r_n \gg r_p$ 陷阱俘获电子后, 很难俘获空穴, 因而被俘获的电子往往在复合前受到热激发又被重新释放回导带。

陷阱的作用 —— 增加少子寿命

第七章 非平衡载流子

7.1 非平衡载流子的注入与复合

7.2 准费米能级

7.3 复合理论

7.4 陷阱效应

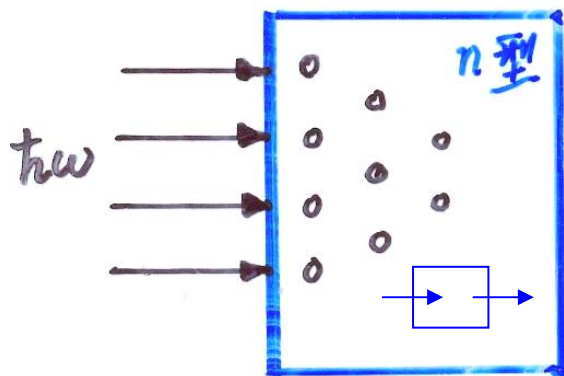
7.5 载流子的扩散运动

7.6 载流子的漂移运动、双极扩散

7.7 连续性方程

7.5 载流子的扩散运动₁

7.5.1 一维扩散方程



空穴 —— 非平衡少子 $\Delta p(x)$

扩散流密度 $s_p = -D_p \frac{d\Delta p(x)}{dx}$

空穴扩散系数
[cm²/s]

在 $x \rightarrow x+dx$ 范围内，单位时间内增加的空穴数 $[s_p(x) - s_p(x+dx)]A$
增加的空穴浓度

$$\left(\frac{d\Delta p}{dt}\right)_{\text{扩散}} = \frac{[s_p(x) - s_p(x+dx)]A}{Adx} = -\frac{ds_p(x)}{dx} = D_p \frac{d^2 \Delta p(x)}{dx^2}$$

一维扩散方程

而 $\left(\frac{d\Delta p}{dt}\right)_{\text{复合}} = -\frac{\Delta p(x)}{\tau}$

$$\frac{\partial \Delta p(x,t)}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 \Delta p(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\Delta p(x,t)}{\tau}$$