

非平衡载流子

复旦大学 微电子学系

13307130163

李琛

June 11, 2015

Contents

1	非平衡载流子的注入与复合	2
1.1	载流子	2
1.2	非平衡载流子	2
1.3	准平衡态和准费米能级	3
2	复合理论	4
2.1	复合方式	4
2.2	直接复合	4
2.3	间接复合	4
3	陷阱效应	5
4	载流子扩散	6
5	其他内容	7

1 非平衡载流子的注入与复合

1.1 载流子

- 载流子产生率 $G(\text{generation})$ 载流子复合率 $R(\text{recombination})$
- 平衡态 $G_0 = R_0$ 热平衡下 $G_{n0} = G_{p0} = R_{n0} = R_{p0}$

1.2 非平衡载流子

- 非简并半导体处于平衡态 $n_0 p_0 = N_v N_e \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right) = n_i^2$
- 非平衡状态 对半导体施加外界作用, 使半导体处于与热平衡状态偏离的状态。在非平衡状态下, 载流子浓度比平衡状态多出一部分($\Delta n = \Delta p$)
- 小注入 对于n型半导体, $\Delta n \ll n_0, \Delta p \gg p_0$ (小注入)
 $\Delta n > n_0, \Delta p \gg p_0$ (大注入)
- 光注入引起的附加电导率 $\Delta\sigma = \Delta n q \mu_n + \Delta p q \mu_p = \Delta p q (\mu_n + \mu_p)$
- 复合率 P 单位时间内的净复合消失掉的电子-空穴对数目。

$$\frac{d\Delta p(t)}{dt} = -P\Delta p(t) \implies \Delta p(t) = \Delta p_0 e^{(-Pt)}$$

$$\text{令 } P = 1/\tau \quad \Delta p(t) = \Delta p_0 e^{(-t/\tau)}$$

$$\text{非平衡载流子的平均寿命 } \bar{t} = \frac{\int_0^\infty t d\Delta p(t)}{\int_0^\infty d\Delta p(t)} = \tau \quad \text{其中 } \Delta p(\tau) = \frac{\Delta p_0}{e}$$

1.3 准平衡态和准费米能级

- 准平衡 = $\left\{ \begin{array}{l} \text{电子子系统与晶格平衡} \rightarrow E_F^n \\ \text{空穴子系统与晶格平衡} \rightarrow E_F^p \\ \text{但电子子系统与空穴子系统不平衡} \end{array} \right.$
- 非平衡时没有统一 E_F

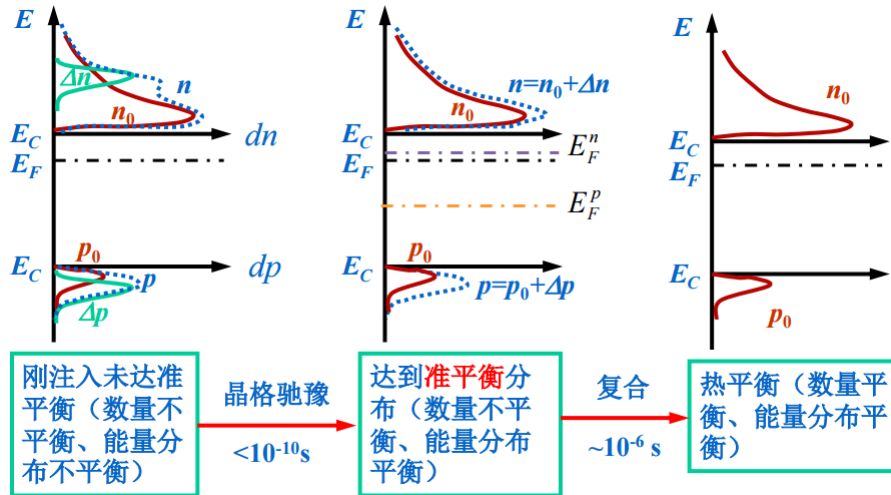


Figure 1: 非平衡状态的费米能级

$$n = n_0 + \Delta n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_f^n}{k_B T}\right) = n_0 \exp\left(\frac{E_f^n - E_f}{k_B T}\right)$$

$$p = p_0 + \Delta p = N_v \exp\left(-\frac{E_f^p - E_v}{k_B T}\right) = p_0 \exp\left(\frac{E_f - E_f^p}{k_B T}\right)$$

$$np = n_i^2 \exp\left(-\frac{E_f^n - E_f^p}{k_B T}\right)$$

- n型半导体中， E_F^n 与 E_F 很接近，

而 E_F^p 与 E_F 可以有显著差别，

$E_F^n - E_F^p$ 反映了系统偏移热平衡的程度



Figure 2: 费米能级图

2 复合理论

2.1 复合方式

- 按能量交换方式分，分为 辐射复合(光子复合(E - 光子))
与非辐射复合(声子复合(E - 声子)，俄歇复合(E - 电子))
- 按复合过程分，分为直接复合与间接复合

2.2 直接复合

- 导带电子直接落入价带的空状态
- 复合率 $R \propto np$ ，令 $R = rnp$ ，其中 r 为电子-空穴复合几率，只与 T 有关
- 产生率 $G = G_0$ ，只与 T 有关
- 热平衡时， $G = G_0 = R_0 = rn_0p_0 = rn_i^2$
- 净复合率 $U_d = R - G = r(np - n_i^2) = r(n_0 + r_0)\Delta p + r\Delta p^2 = r\Delta p(n_0 + p_0 + \Delta p)$
- 又由 $U_d = \Delta p/\tau$ ，得 $\tau = \frac{1}{r(n_0 + p_0 + \Delta p)}$
小注入时， $(n_0 + p_0) \gg \Delta p$ ， $\tau = \frac{1}{r(n_0 + p_0)}$
又如果是n型半导体， $n_0 \gg p_0$ ， $\tau = \frac{1}{rn_0}$

2.3 间接复合

- 间接复合的四个基本过程

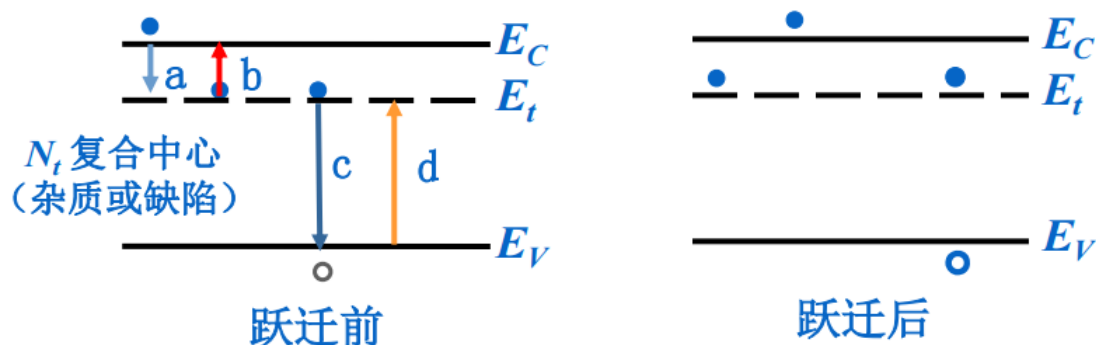


Figure 3: 间接复合的四个基本过程

- 甲: 复合中心从导带得到电子 电子俘获率 $= r_n n (N_t - n_t)$
- 乙: 导带从复合中心得到电子 电子发射率 $= s_- n_t$

- 丙:价带从复合中心得到电子 空穴俘获率 $= r_p p n_t$
- 丁:复合中心从价带得到电子 空穴发射率 $= s_+(N_t - n_t)$

- 稳态时, 满足 E_t 上的电子书 n_t 不变

$$a + d = b + c, \text{复合率 } U = a - b = c - d$$

- s_-, s_+ 均为常数, 可用平衡时参数求得

- 热平衡时,

$$a = b, c = d$$

$$s_- n_t = r_n n_0 (N_t - n_t), n_t = \frac{N_t}{1 + \exp\left(-\frac{E_t - E_F}{k_B T}\right)}$$

$$\therefore s_- = r_n n_1, n_1 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_t}{k_B T}\right)$$

$$s_+ = r_p p_1, p_1 = N_V \exp\left(-\frac{E_t - E_V}{k_B T}\right)$$

代入稳态条件 $a + d = b + c$, 得

$$n_t = N_t \frac{r_n n + r_p p_1}{r_n(n + n_1) + r_p(p + p_1)}, \quad U = \frac{N_t r_n r_p (np - n_i^2)}{r_n(n + n_1) + r_p(p + p_1)}$$



Figure 4: 费米能级与掺杂的关系

3 陷阱效应

- 杂质能级能显著俘获并收容一种过剩载流子

- 此时 $\Delta p = \Delta n + \Delta n_t$, 其中 Δn_t 为过剩载流子引起的中心上电子改变量
- 陷阱的作用: 增加少子寿命
- 有效的陷阱: 在 N_t 较低的情况下, $\Delta n_t \gg \Delta n$
- 成为陷阱的条件: $\Delta n_t = N_t \frac{n_1}{(n_0 + n_1)^2} \Delta n$

4 载流子扩散

- 若载流子分布存在浓度梯度, 则产生扩散流

- 扩散流公式
$$\begin{cases} J_n = -D_n \nabla n \\ J_p = -D_p \nabla p \end{cases}$$

- $$\begin{cases} \text{总电子电流 } j_n = eD_n \frac{dn}{dx} + ne\mu_n E \\ \text{总空穴电流 } j_p = eD_p \frac{dp}{dx} + ne\mu_p E \end{cases}$$

- 一维稳定扩散

– 稳定状态: 积累速率 $A =$ 净复合速率 U_d

– $p = p_0 + \Delta p$, p_0 是常数, $j = -D_p \frac{d\Delta p}{dx}$

$$A = -\nabla \cdot j = D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2}, U_d = \frac{\Delta p}{\tau}$$

$$\text{得到微分方程 } D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{\tau}$$

通解为 $\Delta p(x) = A \cdot e^{-\frac{x}{L_p}} + B \cdot e^{-\frac{x}{L_p}}$, 其中 $L_p = \sqrt{D_p \tau}$, 为扩散长度

– 代入边界条件
$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow \infty} \Delta p = 0 \rightarrow B = 0 \\ \lim_{x \rightarrow 0} \Delta p = (\Delta p)_0 \rightarrow A = (\Delta p)_0 \end{cases}$$

– $\therefore \Delta p(x) = (\Delta p)_0 \cdot e^{-\frac{x}{L_p}}$

5 其他内容

- 爱因斯坦关系（扩散系数与迁移率的关系） $D = \frac{kT}{e} \mu$
成立条件:平衡，非简并
- 双极扩散:两种载流子扩散和漂移运动的差异，会使电场分布发生一定的变化，电场的变化可通过漂移影响两种载流子的运动，并使两种过剩载流子保持同步，不过当两种载流子数量相差悬殊的情况下，电场分布的变化对于少子运动产生的影响可以忽略不计。
- 丹倍效应:由双极扩散中，由于两种载流子的扩散系数不同，在有过剩载流子时，样品中将存在电场，称为丹倍电场，该电场在光照表面和背面建立电势差，称为丹倍电势差，这种效应即丹倍效应。
来源: 电子与空穴不同步，电子比空穴快
作用: 降低电子扩散，加速空穴扩散