非平衡载流子

复旦大学 微电子学系

13307130163

李琛

July 5, 2015

Contents

1 非平衡载流子的注入与复合 **3**

1.1 载流子 3

1.2 非平衡载流子 3

1.3 准平衡态和准费米能级 4

2 复合理论 **5**

2.1 复合方式 5

2.2 直接复合 5

2.3 间接复合 5

3 陷阱效应 **6**

4 载流子扩散 **7**

5 其他内容 **8**

6 连续性方程 **8**

1 非平衡载流子的注入与复合

1.1 载流子

- 载流子产生率$G(generation)$ 载流子复合率$R(recombination)$
- 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，$\Delta n << n_0, \Delta p >> p_0$（小注入）

  $\Delta n > n_0, \Delta p >> p_0$（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。

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

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

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

1.3 准平衡态和准费米能级

- 准平衡 $= \begin{cases} \text{电子子系统与晶格平衡} \rightarrow \quad E_F^n \\ \text{空穴子系统与晶格平衡} \rightarrow \quad E_F^p \\ \text{但电子子系统与空穴子系统不平衡} \end{cases}$

- 非平衡时没有统一E_F

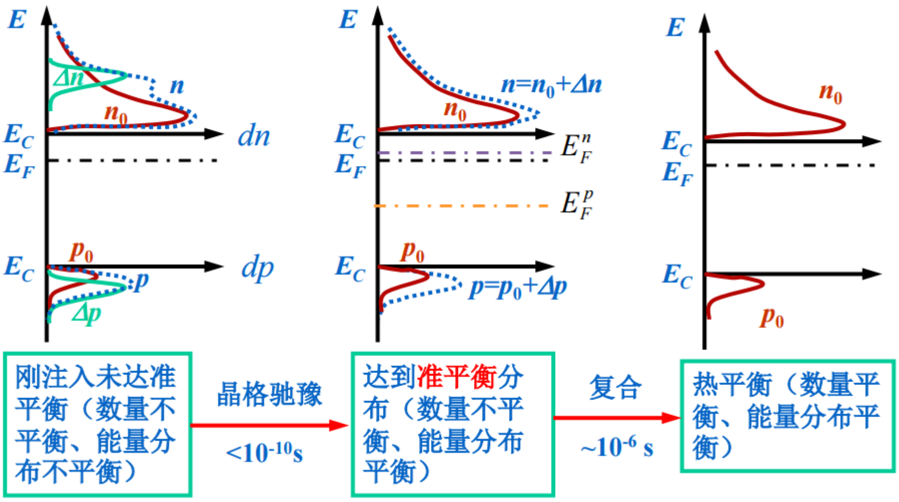

Figure 1: 非平衡状态的费米能级

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

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

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

- 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

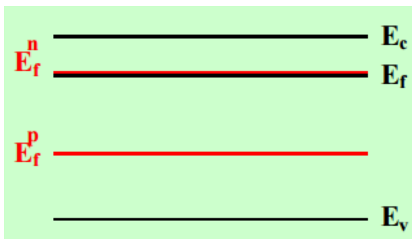

Figure 2: 费米能级图

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，$(n_0 + p_0) >> \Delta p, \tau = \frac{1}{r(n_0+p_0)}$
  又如果是n型半导体，$n_0 >> p_0, \tau = \frac{1}{rn_0}$

2.3 间接复合

- 间接复合的四个基本过程

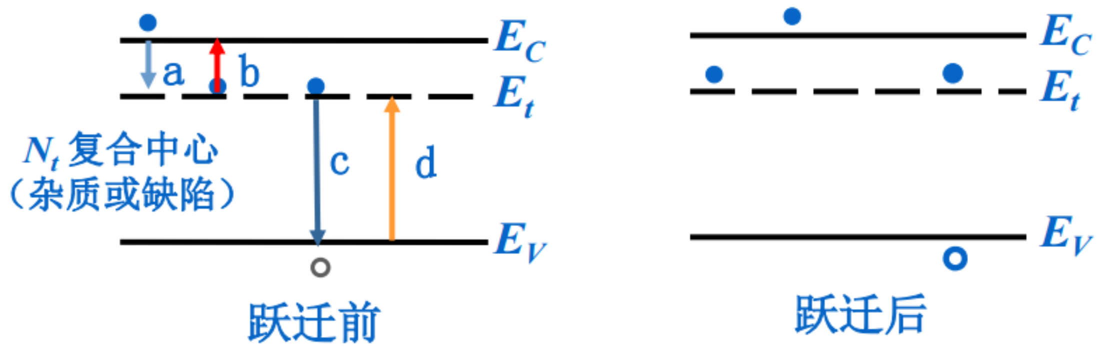

Figure 3: 间接复合的四个基本过程

  - 甲:复合中心从导带得到电子 电子俘获率$= r_nn(N_t - n_t)$
  - 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上的电子数n_t不变
  $a + d = b + c$,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$\Delta n_t$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，$\Delta n_t >> \Delta n$
- 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$\begin{cases} J_n = -D_n \nabla n \\ J_p = -D_p \nabla p \end{cases}$
- $\begin{cases} \text{总电子电流} j_n = eD_n \dfrac{dn}{dx} + ne\mu_n E \\ \text{总空穴电流} j_p = eD_p \dfrac{dp}{dx} + ne\mu_p E \end{cases}$
- 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，$j = -D_p \frac{d_{\Delta p}}{dx}$

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

    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$\begin{cases} \lim\limits_{x \to \infty} \Delta p = 0 \to B = 0 \\ \lim\limits_{x \to 0} \Delta p = (\Delta p)_0 \to A = (\Delta p)_0 \end{cases}$
  - $\therefore \Delta p(x) = (\Delta p)_0 \cdot e^{-\frac{x}{L_p}}$

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

6 连续性方程

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + g_0 - \mu_p E \frac{\partial p}{\partial x} - \mu_p p \frac{\partial E}{\partial x} - \frac{\Delta p}{\tau}$$

简化条件：

- **稳态** $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$
- **无电场** $E = 0$ $\frac{\partial E}{\partial x} = 0$
- **电场分布均匀** $\frac{\partial E}{\partial x} = 0$
- **载流子分布均匀** $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0$

特殊情况：

- **光激发** $E = 0$ $\frac{\partial E}{\partial x} = 0$ $g_p = 0$ $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0 \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau}$
- **瞬时光脉冲** $E = 0$ $\frac{\partial E}{\partial x} = 0$ $g_p = 0 \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{\Delta p}{\tau}$
- **瞬时电脉冲** $E \neq 0$ $\frac{\partial E}{\partial x} = 0$ $g_p = 0 \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p E \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\Delta p}{\tau}$
- **表面光照恒定+稳态** $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$ $\frac{\partial E}{\partial x} = 0$ $g_p = 0 \Rightarrow D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p E \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\Delta p}{\tau} = 0$
- **稳定条件下复合** $E = 0$ $\frac{\partial E}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ $\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \Rightarrow D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - g_p - \frac{\Delta p}{\tau} = 0$