第 一 章 载流子输运过程

产生和复合过程是在能带图上的垂直向关系，输运则是在能带图的水平向的运动。输运的增强有两种主要的形式：漂移与扩散。

1.1 漂移

漂移电流的定义

$$J_n = qnv_{drift} = qn\mu_n\mathscr{E}$$

其中 μ_n 是迁移率。

在外场的作用下，方程中的质量使用有效质量代替来等效内场

$$\frac{d\left(m_n^* v\right)}{dt} = -qE - \frac{m_n^* v}{\tau_n}$$

$$\begin{aligned}
&v(t) = -\tfrac{q\tau_n}{m_n^*}E\left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}}\right] \\
&= -\tfrac{q\tau_n}{m_n^*}E \quad (t \to \infty, 1 - 2ps) \\
&\equiv \mu_n E
\end{aligned}$$

1.2 迁移率

迁移率与散射时间满足

$$\mu_n = \frac{q\tau_n}{m_n^*}$$

在仅考虑电离的杂质时

$$\tau_n \sim \frac{T^{3/2}}{N_D}$$

在高温情况下，声子散射成为主导时

$$\tau_n \sim T^{-3/2}$$

对于不同种类的迁移率，总迁移率相当于并联。

1.3 高场效应

实际上就是速度饱和，之前的 $v=\dfrac{q\tau_N}{m_N^*}\mathscr{E}$，在 $\mathscr{E}$ 超过某个阈值之后，速度不再继续变化。

但是 GaAs 存在速度过冲现象，在提供的能量足够大的情况下，可以越到另一个能谷中。

1.4 扩散电流

D_P, D_N 分别是空穴、电子的扩散系数，单位是 $\mathrm{cm}^2/\mathrm{sec}$

$$J_P|_{\text{diff}} = -qD_P\nabla p$$

$$J_{N|\text{ diff}} = qD_N\nabla n$$

1.5 霍尔效应

对于某个材料的电阻率 ρ 有

$$\mathscr{E} = \rho J = \rho q(\mu_n n + \mu_p p)\mathscr{E}$$

那么

$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n p + \mu_p p)}$$

那么对于 n 型半导体 $\rho=\dfrac{1}{q\mu_n N_D}$，对于 p 型半导体 $\rho=\dfrac{1}{q\mu_p N_A}$。

Drude 模型

$$-qE - qv\times B - \frac{m^* v}{\tau} = 0$$

解得

$$\begin{aligned} m^* v &= -q\tau\mathscr{E} - q\tau v\times B \\ &\approx -q\tau\mathscr{E} - q\tau\left(-\frac{q\tau\mathscr{E}}{m^*}\right)\times B \\ &= -q\tau\mathscr{E} + \frac{q^2\tau^2}{m^*}\mathscr{E}\times B \\ v &= -\frac{q\tau\mathscr{E}}{m^*} + \frac{q^2\tau^2}{m^{*2}}\mathscr{E}\times B \end{aligned}$$

在弱磁场下

$$-q\mathscr{E} - \frac{m^* v}{\tau} \approx 0$$

解得

$$v' = \frac{-q\tau\mathscr{E}}{m^*}$$

对于一般的电流

$$\begin{aligned} J_n &= -qnv \\ &= \frac{q^2 n\tau}{m^*}\mathscr{E} - \frac{q^2 n\tau}{m^*}\frac{q\tau}{m^*}\mathscr{E} \times B \\ &= \sigma_0\mathscr{E} - \sigma_0\mu\mathscr{E} \times B \end{aligned}$$

解得霍尔电阻

$$\begin{bmatrix} J_x \\ J_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_0 & -\sigma_0\mu B_z \\ \sigma_0\mu B_z & \sigma_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$$

对于平衡态，$J_y = 0$ $B_z \approx 0$

$$\begin{bmatrix} J_x \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_0 & 0 \\ \sigma_0\mu B_z & \sigma_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$$

解得

$$R_H = \frac{E_y / B_z}{J_x} = -\frac{1}{qn}$$

R_H 通常在 0.5 到 2 之间

1.6 连续性方程

共有五组

$$\begin{aligned} &\tfrac{\partial n}{\partial t} = \tfrac{1}{q}\nabla \bullet J_N - r_N + g_N \\ &J_N = qn\mu_N E + qD_N\nabla n \\ &\tfrac{\partial p}{\partial t} = -\tfrac{1}{q}\nabla \bullet J_P - r_P + g_P \\ &J_P = qp\mu_P E - (qD_P\nabla p) \\ &\nabla \bullet D = q\left(p - n + N_D^+ - N_A^-\right) \end{aligned}$$

其中扩散项中的扩散系数满足爱因斯坦关系，体现了散射在载流子的扩散用户漂移中均起了主导的作用

$$\frac{D}{\mu} = \frac{k_B T}{q}$$

1.6.1 平衡态

满足

$$J_N = qn\mu_N E + qD_N \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}x}$$

解得

$$\frac{1}{n}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}x} = -\frac{\mu_n \mathscr{E}}{D_N}$$

那么在势场的不同位置有

$$n_2 = n_1 e^{-\int_0^L \frac{\mu_n}{D_n}\mathscr{E}} = n_1 e^{\frac{\mu_n V}{D_n}}$$

为了满足爱因斯坦关系，必然有两点的费米能级相等

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{N_C e^{-(E_{C2}-E_F)/kT}}{N_C e^{-(E_{C1}-E_F)/kT}} = e^{-(E_{C2}-E_{C1})/kT} = e^{qV/kT}$$

1.6.2 载流子电流

$$J_N = qn\mu_N E + qD_N \nabla n$$

$$J_P = qp\mu_P E - (qD_P \nabla p)$$

第一项是漂移电流，第二项是扩散电流。

1.6.3 连续性方程

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q}\nabla \bullet J_N - r_N + g_N$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q}\nabla \bullet J_P - r_P + g_P$$