

半导体物理

主讲人：蒋玉龙

微电子学楼312室， 65643768

Email: yljiang@fudan.edu.cn

<http://10.14.3.121>

第六章 半导体中载流子的输运

6.1 载流子的漂移运动

6.2 载流子的散射

6.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系

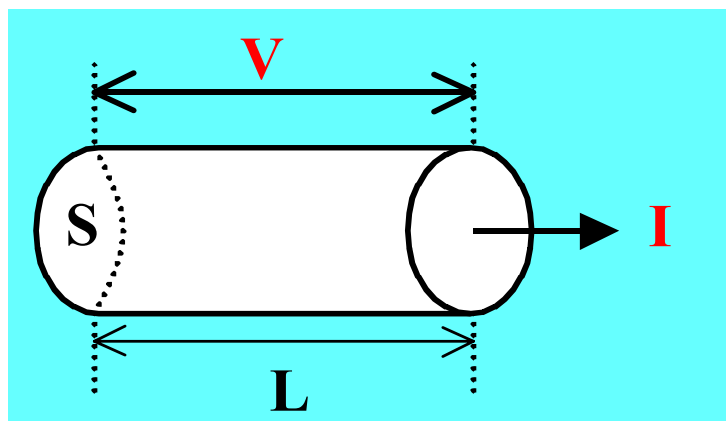
6.4 强电场下的输运

6.1 载流子的漂移运动₁

6.1.1 电导的微观理论

电导的宏观理论：欧姆定律

$$V = R I$$



$$R = \rho \frac{L}{S}$$

$$V = \rho \frac{L}{S} I$$

$$J = \frac{I}{S}$$

$$|\vec{E}| = \frac{V}{L}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

电导率

σ

载流子浓度

载流子迁移率

6.1 载流子的漂移运动₂

6.1.1 电导的微观理论

载流子漂移运动

– 在外加电场作用下所作的定向运动

设电子浓度为 n ，平均速度为 \bar{v}

则电流
$$I = \frac{(\bar{v}\Delta t \cdot S)n(-q)}{\Delta t} = (-q)n\bar{v}S$$

$$J = (-q)n\bar{v}_d$$

平均漂移速度

电子的加速度

$$a = \frac{f}{m_n^*} = \frac{q}{m_n^*} E$$

电子的漂移速度

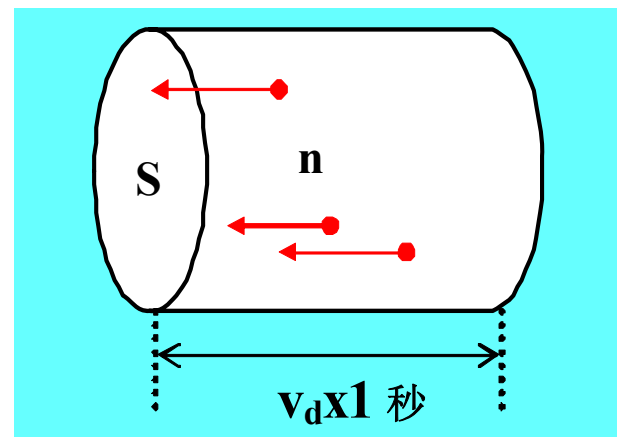
$$v_d(t) = at$$

$$\bar{v}_d \propto E$$

$$J = nq\bar{v}_d = nq\mu|\vec{E}| = \sigma|\vec{E}|$$

$$|\bar{v}_d| = \mu|E|$$

$$\sigma = nq\mu$$



$$|\bar{v}_d| = \mu|\vec{E}|$$

迁移率（单位：
cm²/V·s，恒取正值）

6.1 载流子的漂移运动₃

6.1.2 半导体的电导率和迁移率

在半导体中，两种载流子： n ， p

$$J = J_n + J_p = (nq\mu_n + pq\mu_p)|\vec{E}|$$

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$$

强 n 型， $n \gg p$ $\sigma = nq\mu_n$

强 p 型， $p \gg n$ $\sigma = pq\mu_p$

本征 $\sigma = qn_i(\mu_n + \mu_p)$

第六章 半导体中载流子的输运

6.1 载流子的漂移运动

6.2 载流子的散射

6.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系

6.4 强电场下的输运

6.2 载流子的散射₁

6.2.1 载流子散射的概念

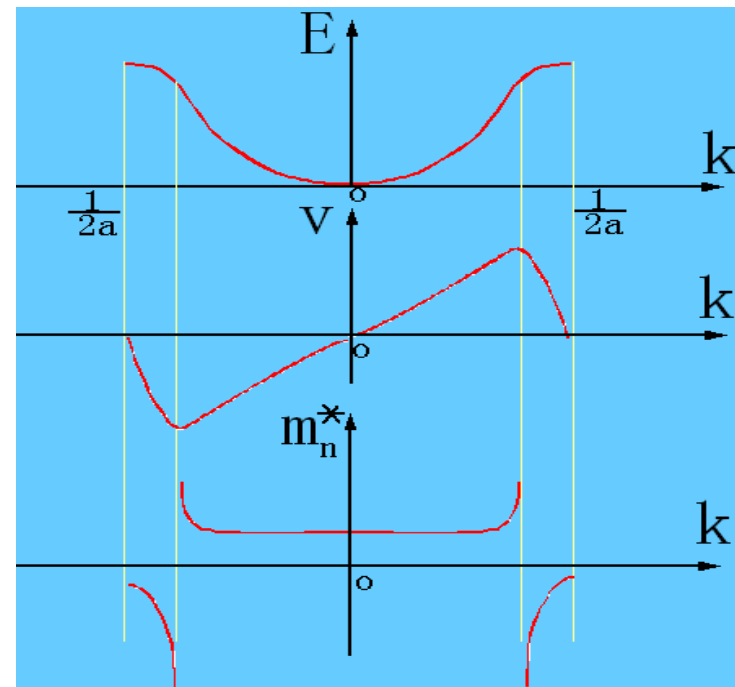
问题①：理想半导体，在 $T = 0\text{ K}$ 时，电子在外场 F 的作用下，做什么运动？

1° 匀加速运动

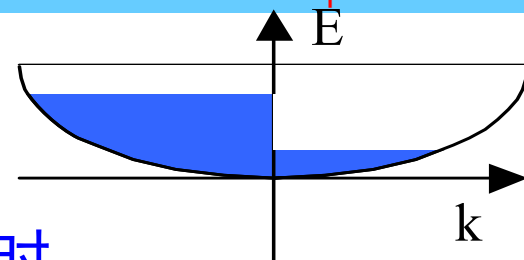
$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m_n^*}$$

2° Bloch 振荡

实际上 Bloch 振荡也很难发生，
原因——散射

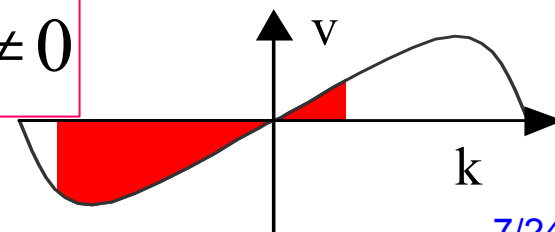


不满带电子能导电



有外电场时

$$\sum v(k) \neq 0$$



6.2 载流子的散射₂

6.2.1 散射几率、平均自由时间及其与迁移率的关系

设有 N_0 个电子以速度 v 沿某方向运动

$N(t)$ —— 在 t 时刻所有未受到散射的电子数

P —— 散射几率，单位时间内受到散射的次数

则在 $t \rightarrow t+dt$ 时间被散射的电子数

$$N(t)Pdt = N(t) - N(t+dt) = -\frac{dN(t)}{dt} \cdot dt$$

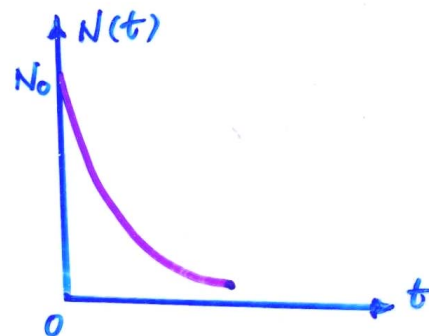
$$\rightarrow N(t) = N_0 \exp(-Pt)$$

平均自由时间
(弛豫时间)

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^\infty t \cdot PN_0 \exp(-Pt) dt = \frac{1}{P}$$

$$N(t) = N_0 \exp(-t/\tau)$$

$t \rightarrow t+dt$ 受到散射
的电子数



6.2 载流子的散射₃

6.2.1 散射几率、平均自由时间及其与迁移率的关系

— τ 的物理意义

$$\tau = \frac{1}{P}$$

载流子的自由时间有一个统计分布，但简单地可以认为所有电子从时间 $t = 0$ 开始被加速“自由”地运动，平均来说当 $t = \tau$ 时，电子受到一次散射。

—平均漂移速度

设 $t = 0$ 时电子受到一次散射，初速度为 v_0 ，经过时间 t 后再次受到散射，在散射前的速度

$$v(t) = v_0 - \frac{q}{m_n^*} Et$$

取平均

$$\langle v(t) \rangle = \langle v_0 \rangle - \left\langle \frac{q}{m_n^*} Et \right\rangle$$

→ = 0

→

$$\bar{v}_d = \frac{1}{N_0} \int_0^\infty \left(-\frac{q}{m_n^*} Et \right) \frac{1}{\tau} N_0 \exp(-t/\tau) dt = -\frac{qE}{m_n^*} \tau_n$$

6.2 载流子的散射₄

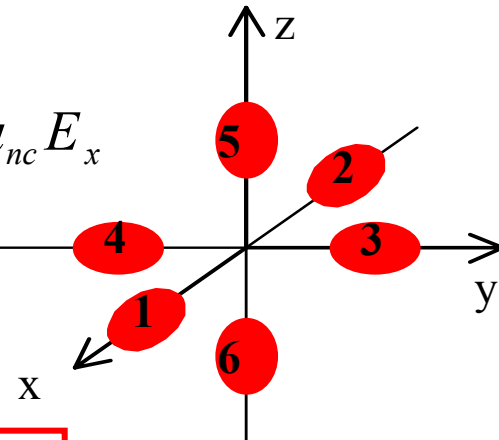
6.2.1 散射几率、平均自由时间及其与迁移率的关系

$$\boxed{-\bar{v}_d = -\frac{qE}{m_n^*} \tau_n} \xrightarrow{|\bar{v}_d| = \mu |\bar{E}|} \boxed{\mu_n = \frac{q \tau_n}{m_n^*}} \quad \boxed{\mu_p = \frac{q \tau_p}{m_p^*}}$$

各向异性n型半导体的电导率

x方向 $J_x = \sum_{i=1}^6 \frac{n}{6} q \mu_i E_x = \frac{2}{6} n q \mu_l E_x + \frac{4}{6} n q \mu_t E_x = n q \mu_{nc} E_x$

y方向 $J_y = n q \mu_{nc} E_y$ z方向 $J_z = n q \mu_{nc} E_z$



$$\vec{J} = J_x \vec{i} + J_y \vec{j} + J_z \vec{k}$$

$$\boxed{\vec{J} = n q \mu_{nc} \vec{E}}$$

$$\boxed{\mu_{nc} = \frac{1}{3} (\mu_l + 2 \mu_t)}$$

$$\boxed{m_{nc}^*}$$

$$\mu_l = \frac{q \tau}{m_l^*} \quad \mu_t = \frac{q \tau}{m_t^*}$$

$$\boxed{\mu_{nc} = \frac{q \tau}{m_{nc}^*}}$$

$$\boxed{\frac{1}{m_{nc}^*} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{m_l^*} + \frac{2}{m_t^*} \right)}$$

电子电导
有效质量

6.2 载流子的散射⁵

6.2.2 载流子的主要散射机制

散射的原因：周期势场被破坏（晶体偏离理想） 微扰势 ΔV

1. 电离杂质中心散射

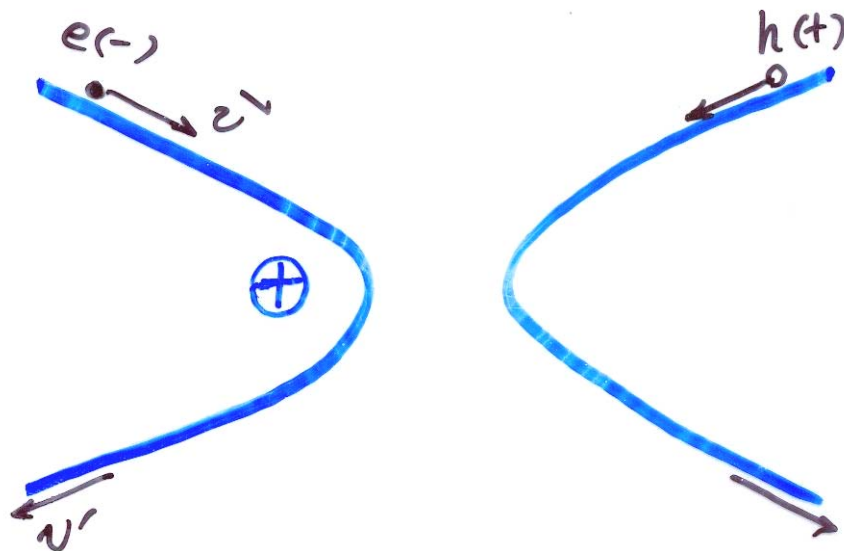
库仑力的作用，弹性散射

$$P_i \propto N_i T^{-3/2}$$

$$\tau_i \propto \frac{T^{3/2}}{N_i} \quad \mu_i \propto \frac{T^{3/2}}{N_i}$$

物理意义

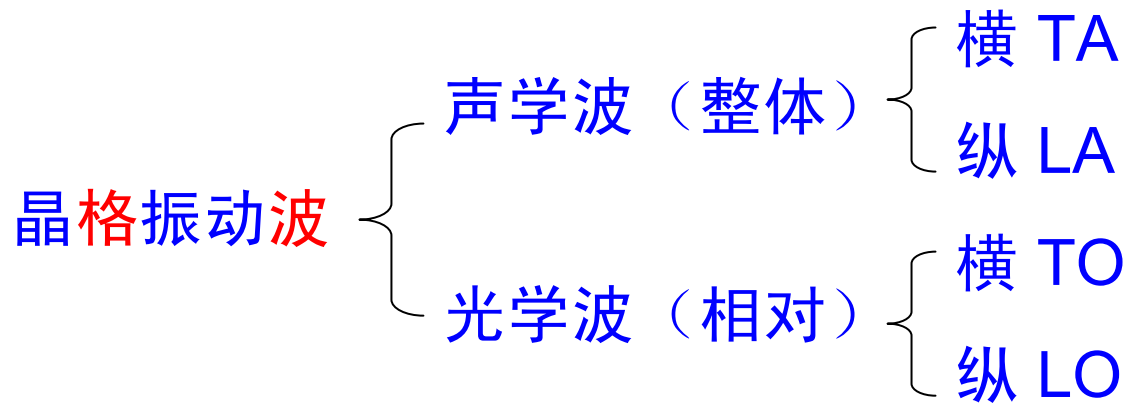
1. N_i 越大，散射几率越大；
2. T 越高，载流子平均热运动速度越大，散射几率越小。



6.2 载流子的散射₅

6.2.2 载流子的主要散射机制

2. 晶格振动散射 (声子散射) 晶格振动类似于谐振子 (弹性链)



频率为 ω_q 的格波的能量是量子化的
声子

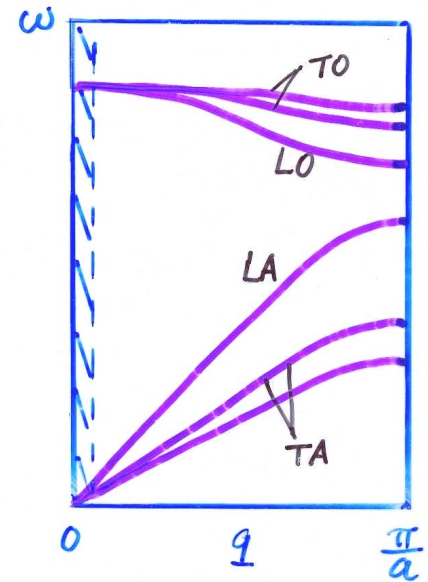
根据统计物理, 温度为 T 时

频率为 ω_q 的格波的平均能量

$$\bar{E} = \bar{n} \hbar \omega_q = \frac{\hbar \omega_q}{\exp(\hbar \omega_q / kT) - 1}$$

频率为 ω_q 的格波的平均声子数

$$\bar{n} = \frac{1}{\exp(\hbar \omega_q / kT) - 1}$$



6.2 载流子的散射₆

6.2.2 载流子的主要散射机制

声子是一种准粒子，它既有能量又有动量。

电子受晶格振动的散射 —— 电子与声子的散射
(格波) (吸收或释放一个声子)

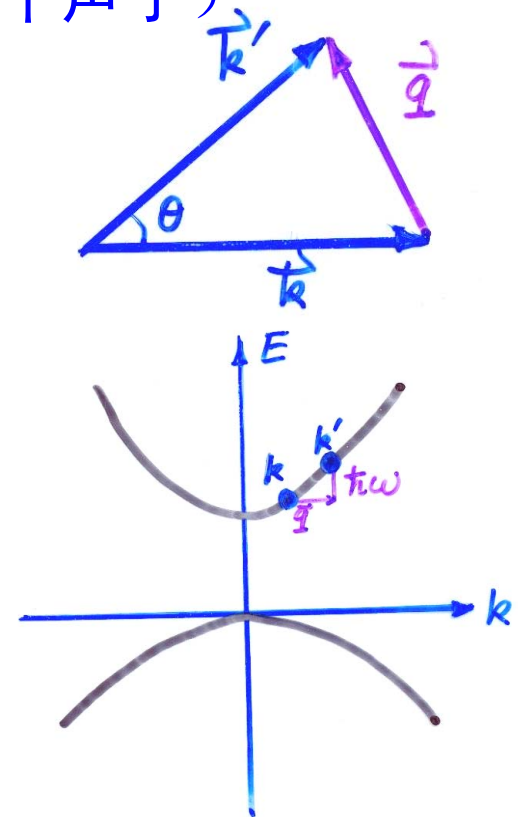
声子散射遵循能量守恒和动量守恒定律

$$\begin{cases} E' - E = \hbar\omega \\ \hbar\vec{k}' - \hbar\vec{k} = \hbar\vec{q} \end{cases}$$

具有单能谷的半导体中，对电子起散射作用的主要是长波，即 $q \approx 0$ 附近的波。

$$\begin{cases} \text{长声学波: } \omega(q) = vq & \text{弹性散射} \\ \text{长光学波: } \omega(q) = \omega(0) & \text{非弹性散射} \end{cases}$$

↑ 常数 (声速)



6.2 载流子的散射₇

6.2.2 载流子的主要散射机制

量子力学微扰理论得出

$$\text{声学波散射几率} \quad P_s \propto T^{3/2} \quad \tau_s \propto T^{-3/2} \quad \mu_s \propto T^{-3/2}$$

$$\begin{aligned} \text{光学波散射几率} \quad P_o &\propto [\exp(\hbar\omega_o/k_B T) - 1]^{-1} \\ \tau_o &\propto \mu_o \propto [\exp(\hbar\omega_o/k_B T) - 1] \end{aligned}$$

3. 其它散射机制

(1) 等价能谷间散射

q 较大, ω 也较大 —— 非弹性散射

(2) 中性杂质散射

重掺杂, 低温

(3) 缺陷散射

6.2 载流子的散射₈

6.2.2 载流子的主要散射机制

