第五章 半导体的导电性

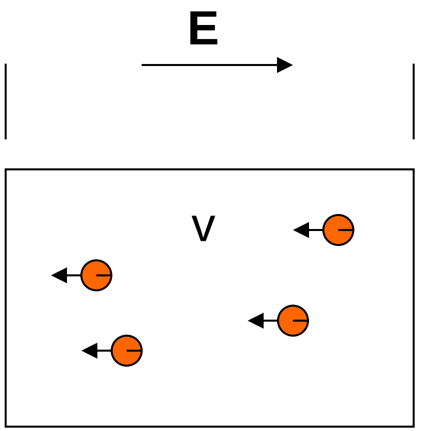
第一节 载流子的散射

一、散射的概念

1、漂移运动

$$J = nqv$$

E → F → a → v↑ → J↑



2、欧姆定律

$$J = \sigma E$$

E一定，J一定 ?

载流子受到了某种阻力，在运动过程中不断遭到“散射”，从电场作用获得的漂移速度便不断地散射到各个方向上去，使漂移速度不能积累起来。在外力和散射的双重影响下，有一平均漂移速度

按固体物理理论：
周期性势场下，考虑了有效质量，
电子的运动等效为自由电子运动。

当严格的周期势场遭到破坏，
载流子的运动就不是自由的，
载流子的运动会受到散射作用。

任何破坏周期势场的因素都
可以引起载流子的散射作用。

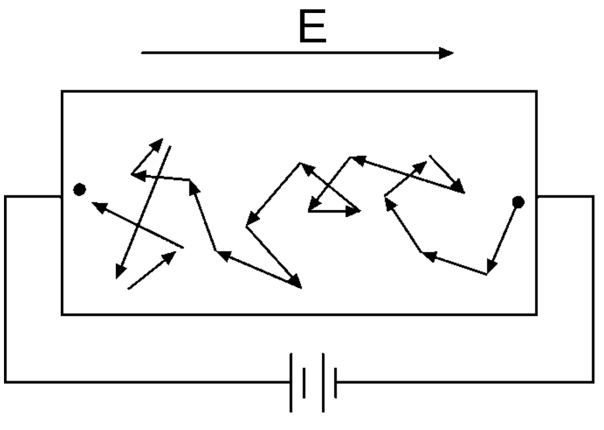
实际晶体，各种原因导致势场偏离严格周期势场。

热运动：原子不断在平衡位置附近振动，位移破坏了场的周期。

缺陷：杂质原子、原子本身几何排列上的缺陷引起势场偏离严格的周期性。

$$\Delta V(x) = V(x) - V_0(x)$$

附加势场　　实际的势场　　周期性势场



二、半导体的主要散射机制

- 电离杂质散射：电离杂质引起的散射
- 晶格散射与声子散射：由于晶格振动引起的散射
- 中性杂质散射：在杂质浓度不是很高时
- 电子或空穴散射：高载流子浓度
- 晶格缺陷散射：多晶体时很重要
- 表面散射：载流子在表面运动时受表面因素作用

粗糙度

1．电离杂质散射

杂质电离后带电（施+、

形成一个库仑场（ΔV）

局部破坏杂质附件周期

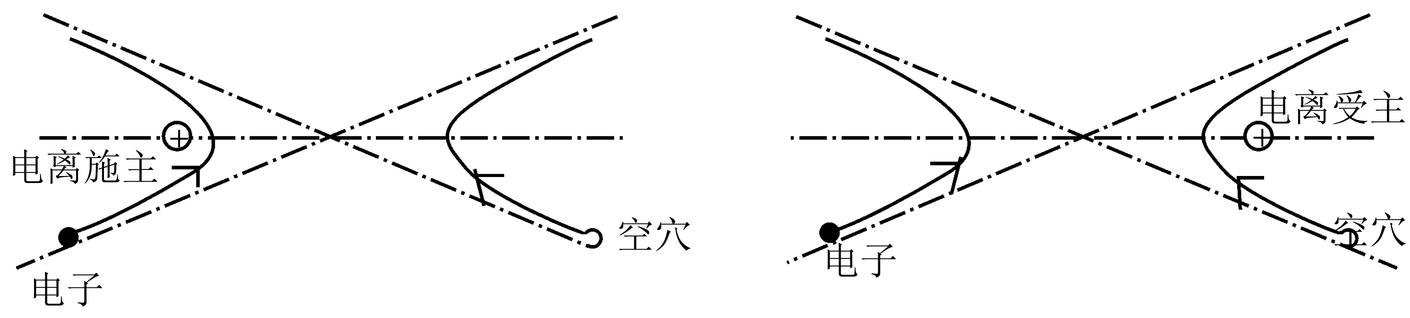
$$P_i \propto N_i T^{-3/2}$$

说明

1、Ni大，Pi大

2、T高，速度大，不易被散射，偏转小

3、低温情况下，电离杂质散射比较重要



2、晶格振动的散射

- 格波
  - 声
    - 横
      - 长
      - 短
    - 纵
  - 光
    - 横
    - 纵

⋮

声子动量应和电子动量具有同数量级

电子波长 $10^{-8}\,\mathrm{m}$

原子间距 $10^{-10}\,\mathrm{m}$

长波

声学波散射

长、纵声学波起主要作用 ?

↓

振动方向与传播方向一致 → 原子分布疏密变化 → 原子间距变化 → 禁带宽度波动

↓

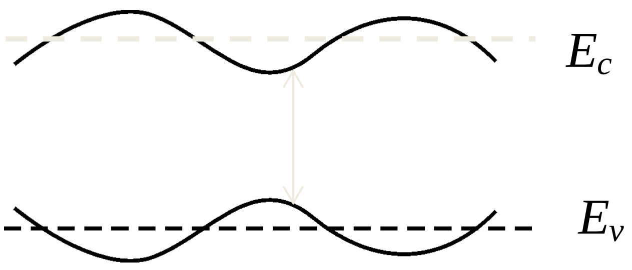
周期势场被破坏

特点：**a.ΔV-能带起伏引起**

b. $P_S \propto T^{3/2}$

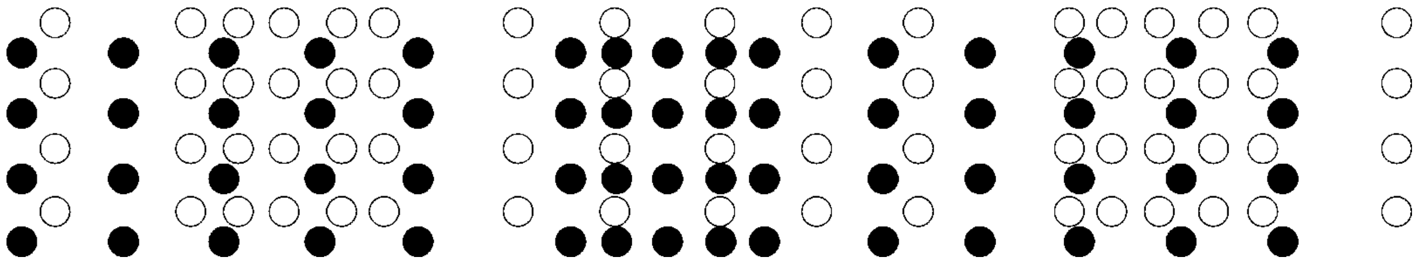
温度越高，晶格振动越强，散射几率越大

横波呢？



光学波散射

离子性半导体，温度较高时，长纵波散射作用重要



长纵光学波 → 两离子振动位移相反 → 电荷分布不均 → 产生电场 → 周期势场遭到破坏

特点：**a.ΔV-内电场引起**

b. $$P_o \propto \frac{(\hbar\upsilon_e)^{3/2}}{(K_BT)^{1/2}}\left[\frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\upsilon_e}{K_BT}\right)-1}\right]\frac{1}{f\left(\frac{\hbar\upsilon_e}{K_BT}\right)}$$

温度下降，散射几率按指数规律迅速减小。
光学波散射在低温时不起什么作用。

两种散射同时存在

$$P_L = P_S + P_o$$

不同半导体，两种散射强弱不同，
共价结合的元素半导体（硅和锗），长声学波散射为主，
离子性半导体中，长光学波散射为主

三、平均自由时间和散射几率的关系

1、概念

自由时间：电场作用下，载流子连续两次散射间的时间

平均自由时间 τ ：取多次自由时间的平均值

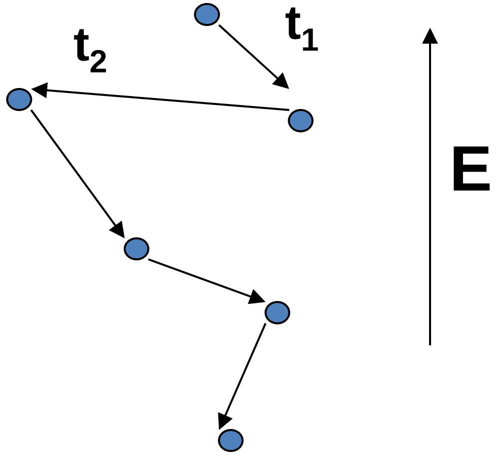
如：N个速度为v的载流子　　P－散射几率

t-t＋Δt被散射载流子数　　$N(t)P\Delta t$

N(t＋Δt)： t＋Δt未散射载流子数

N(t)：t时未散射的载流子数

$$N(t)-N(t+\Delta t)=N(t)P\Delta t$$



$$\frac{\mathrm{d}N(t)}{\mathrm{d}t}=\lim_{t\to 0}\frac{N(t+\Delta t)-N(t)}{\Delta t}=-N(t)P$$

解为 $$N(t)=N_0\mathrm{e}^{-pt}$$ t=0时未散射的载流子数

$$N(t+\Delta t)=N_0P\mathrm{e}^{-pt}\mathrm{d}t$$ Δt后被散射的载流子数

t—t＋Δt内遭到散射的所有载流子的自由时间均为τ

平均自由时间 $$\tau=\frac{1}{N_0}\int_0^{\infty}tN_0P\mathrm{e}^{-pt}\mathrm{d}t$$ 两次散射间所有载流子自由时间的总和

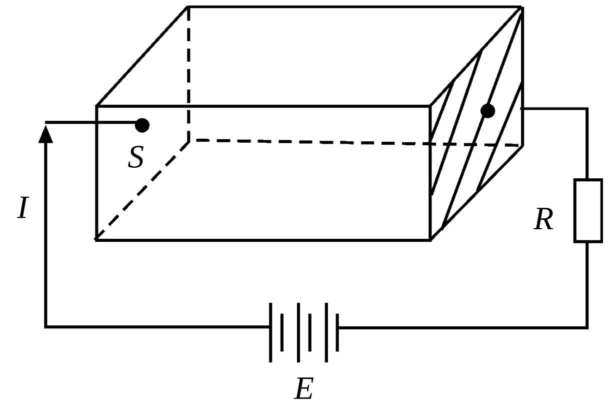
$$=\frac{1}{P}$$ 自由时间的总和

平均自由时间等于散射几率的倒数

第二节　载流子漂移运动基本规律

一、迁移率

假设：电场 E



电子各向同性，　有效质量 m_n^*

第一次散射t=0，沿x方向速度V_{0x}

加速运动t后速度V_x时受第二次散射，

$$V_x = V_{0x} - \frac{q}{m_n^*}\left|\vec{E}\right|t$$

X方向分量的平均值应为零

平均值即可得到平均漂移速度。

电子漂移速度的总和

每个电子获得的漂移速度

平均漂移速度 $$\frac{1}{N_0}\int_0^{\infty} -\left(q/m_n^*\right)|\boldsymbol{E}|t\, N_0 P \mathrm{e}^{-pt}\mathrm{d}t$$

遭到散射的电子数

$$\overline{V}_x = -\frac{q}{m_n^*}\frac{1}{P}|\boldsymbol{E}| = -\frac{q|\boldsymbol{E}|}{m_n^*}\tau_n$$

$$\mu = \frac{\left|\overline{V}_x\right|}{|\boldsymbol{E}|}$$

迁移率

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

$$\mu_p = \frac{q\tau_p}{m_p^*}$$

迁移率是描述载流子在电场中作漂移运动难易程度的物理量

$$\mu_n \ \square\ \mu_p$$

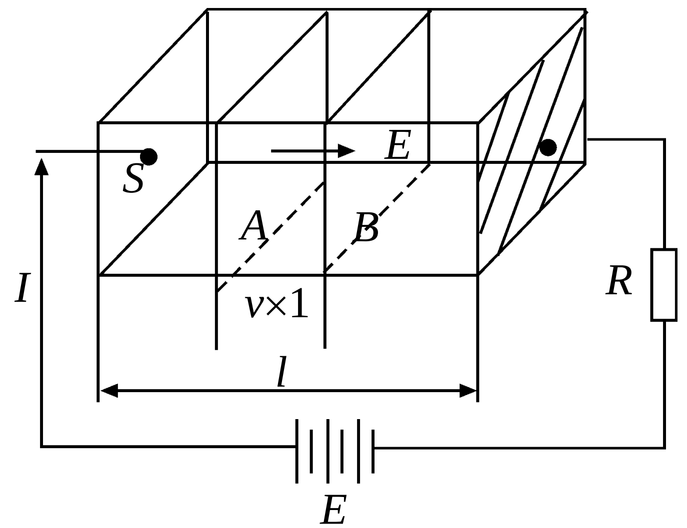
二、电导率

$$I = -nq\overline{V}_n \times 1 \times S$$

$$J_n = -nq\overline{V}_n$$

$$J_n = nq\mu_n \left| \boldsymbol{E} \right|$$

$$J_n = \sigma_n \left| \boldsymbol{E} \right|$$



$$\sigma_p = pq\mu_p == \frac{pq\tau_p}{m_p^*}$$

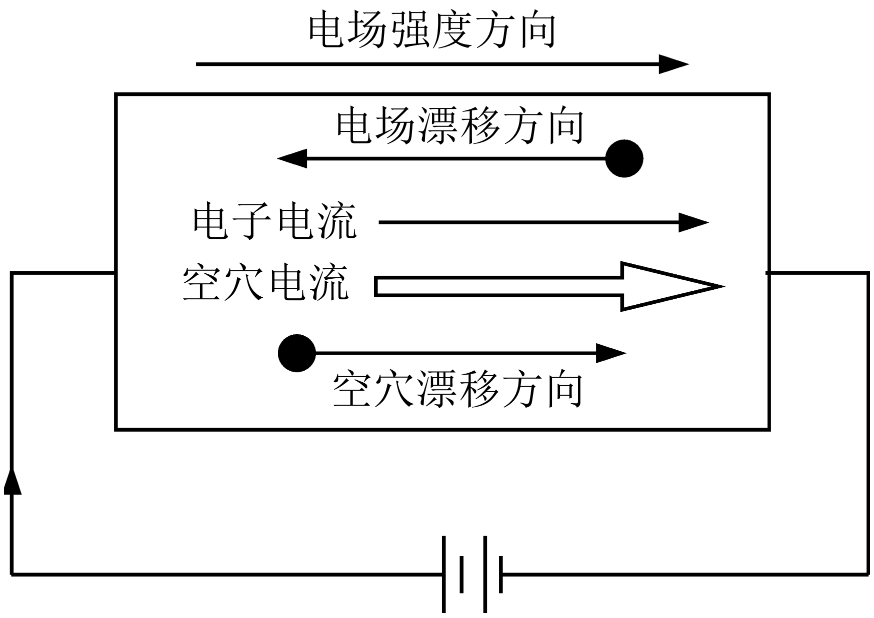
$$\sigma_n = nq\mu_n == \frac{nq\tau_n}{m_n^*}$$

电子与空穴同时参与导电：

$$J = J_n + J_P$$

总是：

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



n型半导体： $\sigma_n = nq\mu_n$

p型半导体： $\sigma_p = pq\mu_p$

电子、空穴同时导电： $\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$

本征半导体： $\sigma_i = n_i q\left(\mu_n + \mu_p\right)$

n型半导体： $\rho_n = \frac{1}{nq\mu_n}$

p型半导体： $\rho_p = \frac{1}{pq\mu_p}$

本征半导体： $\rho = \frac{1}{n_i q\left(\mu_n + \mu_p\right)}$

电子、空穴同时导电： $\rho = \frac{1}{nq\mu_n + pq\mu_p}$