

# 半导体物理及固体物理基础

## 第四章：半导体的导电性



孙斌

Email: [sunbin@suda.edu.cn](mailto:sunbin@suda.edu.cn)

<http://web.suda.edu.cn/sb2>

苏州大学 | 未来科学与工程学院

- 半导体中的电子状态
  - 晶格结构
  - 能带
- 杂质和缺陷能级
  - 缺陷
  - 杂质能级
- 载流子的统计分布
  - 状态密度
  - 费米-狄拉克分布
  - 载流子浓度
- 半导体的导电性
  - 漂移
  - 扩散
- 非平衡载流子
  - 产生
  - 复合
- pn结和金属-(氧化物)-半导体接触
  - 零偏
  - 反偏
  - 正偏

# 载流子输运 (Carrier Transport)



- 载流子(电子和空穴)的净流动, 产生电流;
- 产生载流子净流动的运动过程称为输运;

晶体中的两种基本输运机制:

**漂移(drift)运动**: 由**电场**引起的载流子运动;

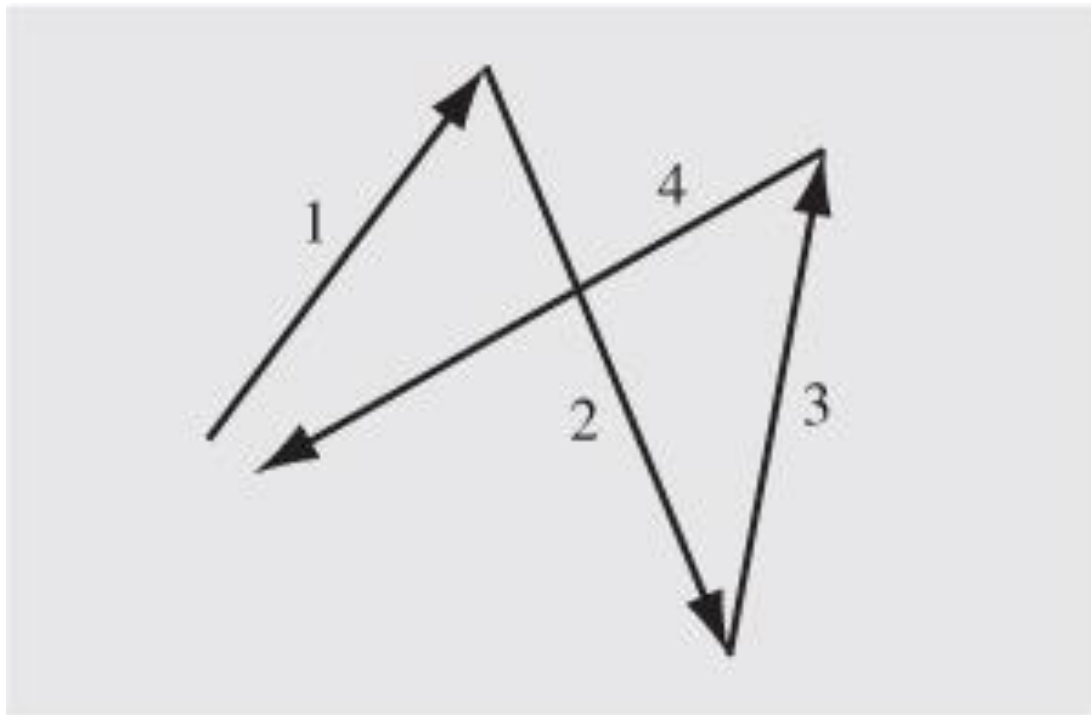
**扩散(diffusion)运动**: 由**浓度梯度**引起的载流子运动;

此外, 温度梯度也会引起载流子运动。

# 漂移 (Drift)

# 电子的运动

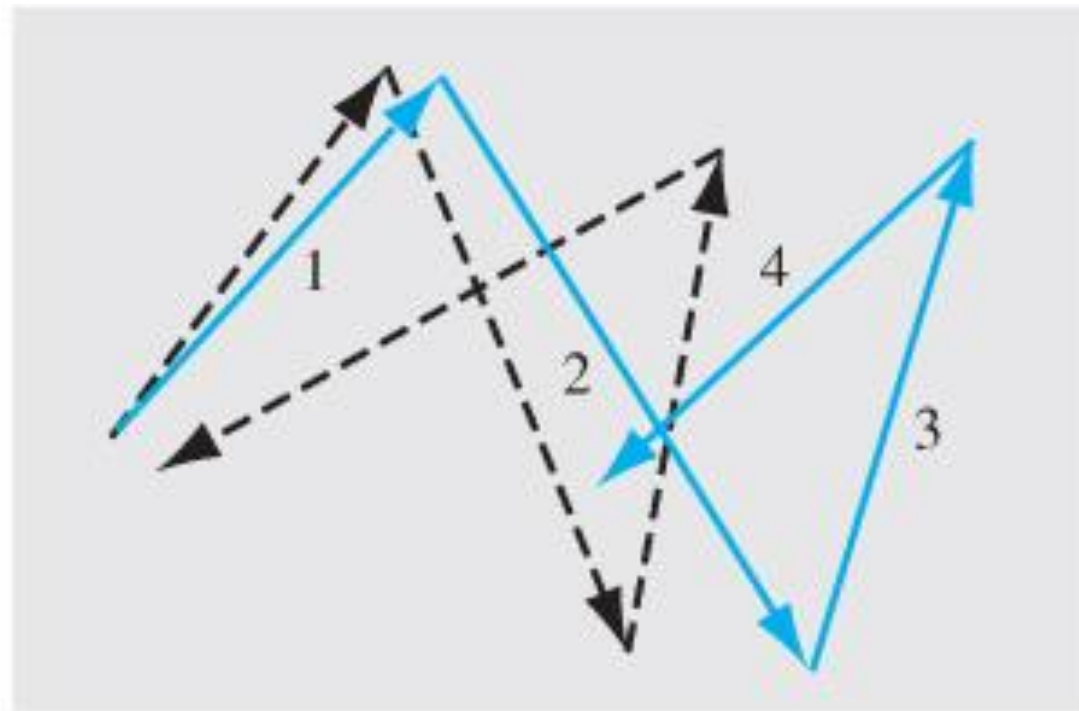
电子的无规则热运动



$$\frac{1}{2} m_0 v_{th}^2 = \frac{3}{2} kT$$

$$v_{th} \approx 10^7 \text{ cm/s}$$

电子在外电场作用下的漂移运动



←  
电场

$$F = eE$$

$$= m_p^* a$$

$$= m_p^* \frac{dv}{dt}$$

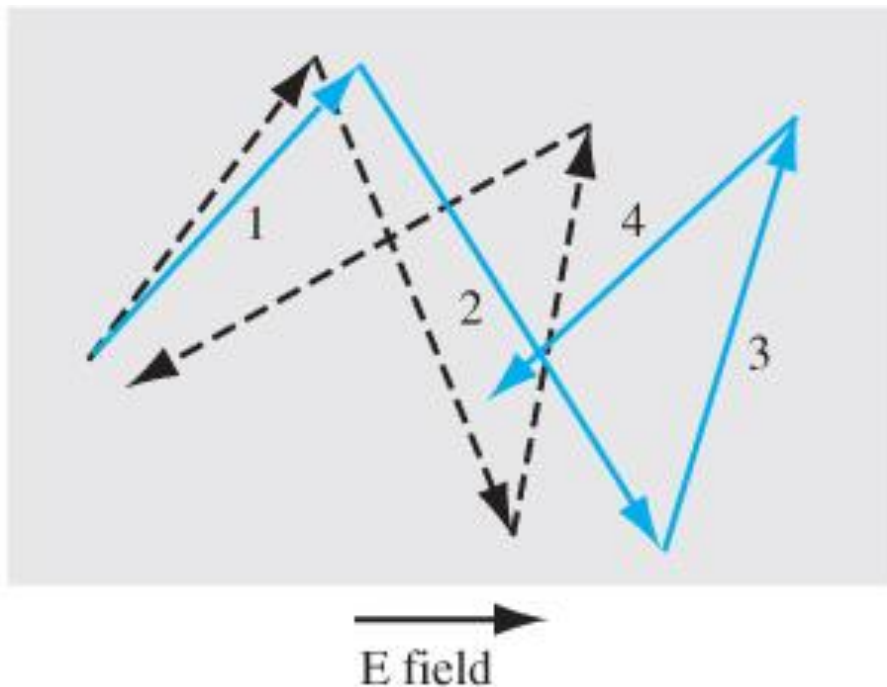
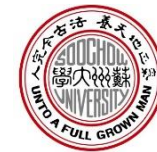
如果初始速度为0:

$$v = a\tau = \frac{eE}{m_p^*} \tau$$

空穴的平均自由时间  
(mean free time)

(为漂移速度, 不包含热速度)

# 空穴的漂移运动



空穴在两次碰撞之间的平均时间为  $\tau_{cp}$   
(平均自由时间)

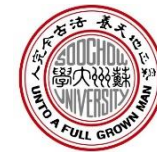
碰撞前的最大速度:

$$v_{\text{peak}} = \frac{eE}{m_p^*} \tau_{cp}$$

单个电子的平均漂移速度:

$$\tilde{v}_{\text{peak}} = \frac{1}{2} \frac{eE}{m_p^*} \tau_{cp}$$

# 迁移率 (mobility)



$$\tilde{v}_d = \frac{eE}{m_p^*} \tau_{cp} = \frac{e\tau_{cp}}{m_p^*} E$$
$$\mu_p = \frac{\tilde{v}_d}{E} = \frac{e\tau_{cp}}{m_p^*}$$

空穴:

$$\mu_p = \frac{e\tau_{cp}}{m_p^*}$$

电子:

$$\mu_n = \frac{e\tau_{cn}}{m_n^*}$$



# 散射机制

晶格散射和杂质散射



苏州大学  
SOOCHOW UNIVERSITY

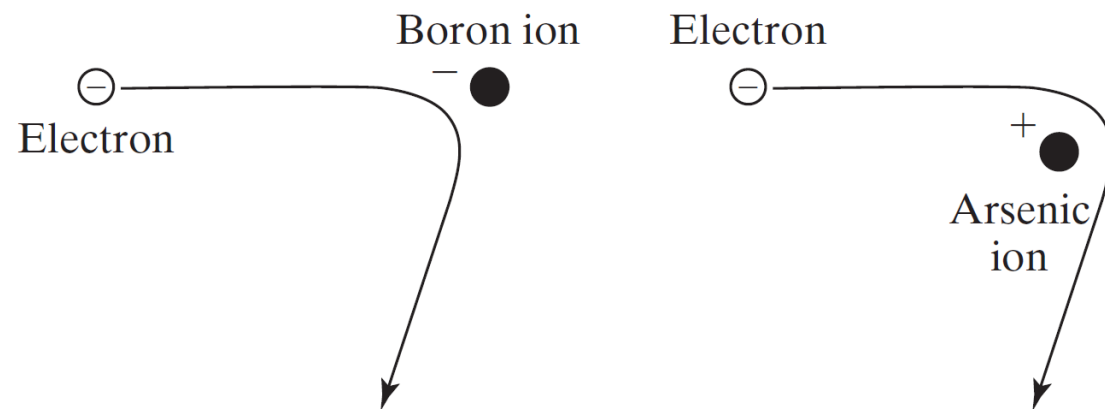
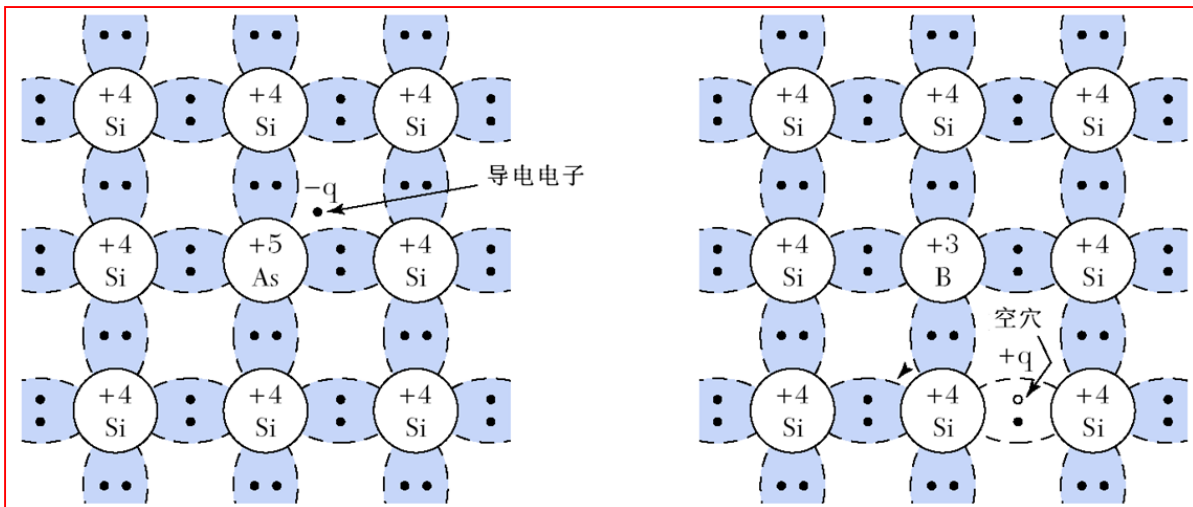
半导体中影响载流子迁移率的两种散射机制：

晶格散射(声子散射)：

$$\mu_L \propto T^{-\frac{3}{2}}$$

电离杂质散射：

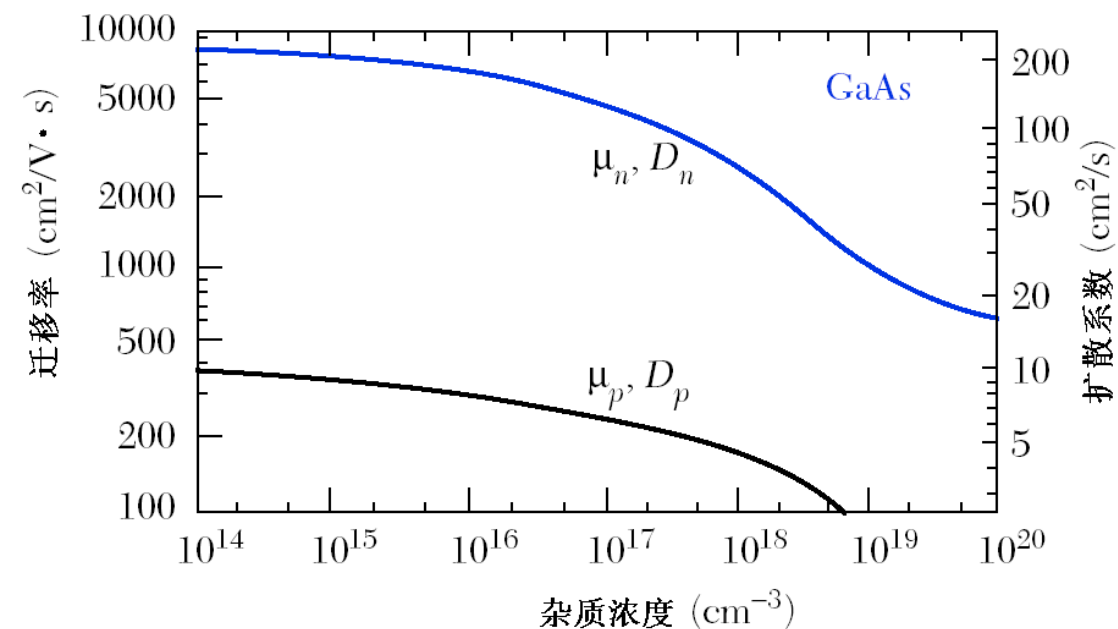
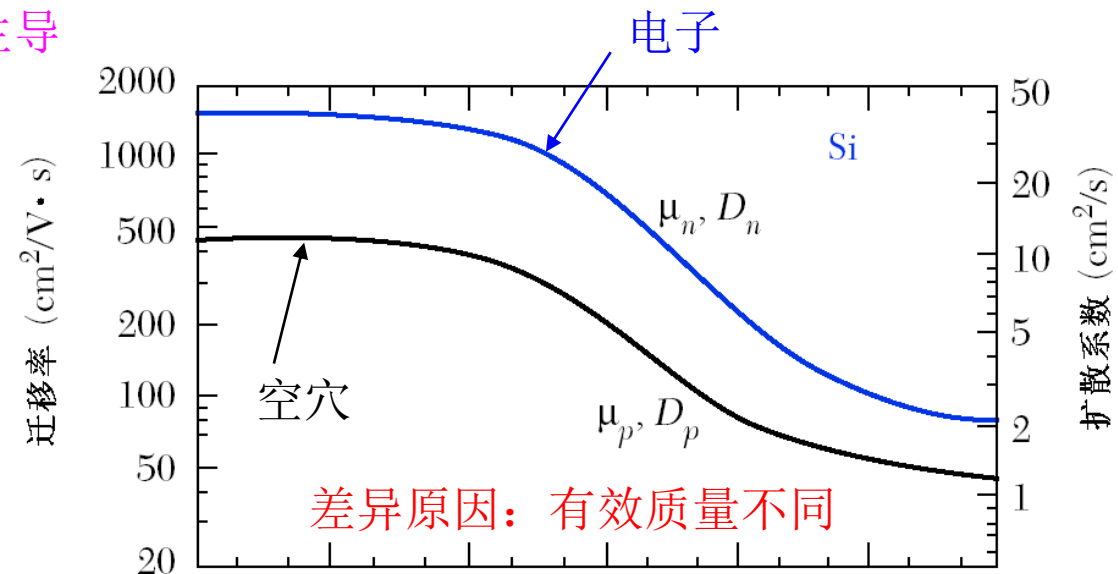
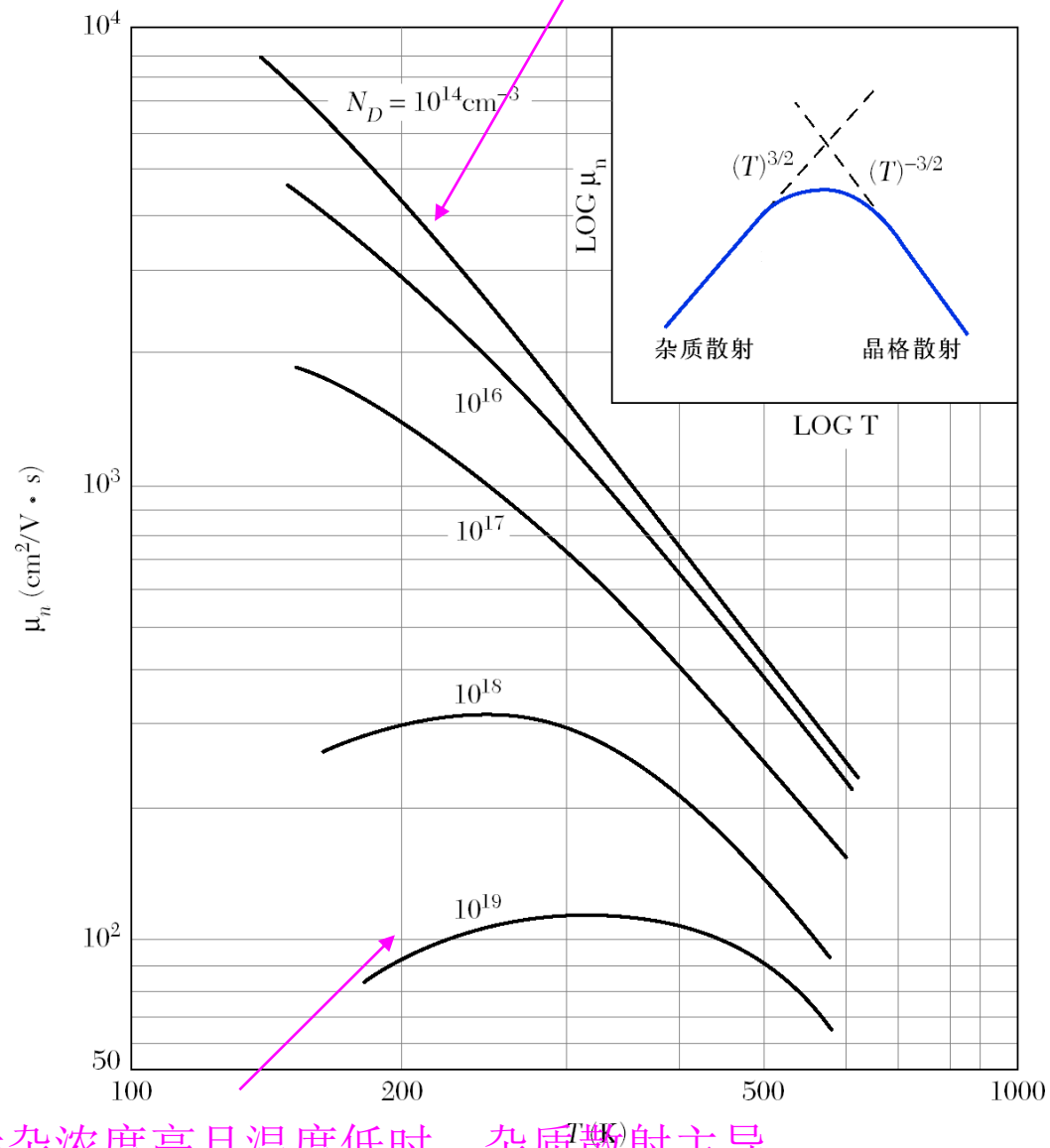
$$\mu_I \propto \frac{T^{+\frac{3}{2}}}{N_I} \quad N_I = N_d^+ + N_a^-$$



# 散射机制



掺杂浓度低时，声子散射主导



$\tau_L$ 表示由于晶格散射造成的碰撞之间的时间间隔,

$\frac{dt}{\tau_L}$ 表示微分时间 $dt$ 内受到晶格散射的次数。

$\tau_I$ 表示电离杂质散射造成的碰撞之间的时间间隔,

$\frac{dt}{\tau_I}$ 表示微分时间 $dt$ 内受到电离杂质散射的次数。

微分时间 $dt$ 内受到散射的总次数:

$$\frac{dt}{\tau} = \frac{dt}{\tau_L} + \frac{dt}{\tau_I} \quad \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_L} + \frac{1}{\tau_I} \quad \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I}$$

- 载流子在电场力的作用下的运动称为**漂移运动**
- 载流子电荷的净漂移形成**漂移电流**

密度为 $\rho$ 的体电荷以平均速度 $v_d$ 运动:

$$J_{drf} = \rho v_d \quad (\text{A/cm}^2)$$

若体电荷为空穴:

$$J_{p|drf} = e p v_d$$

# 漂移运动

空穴的漂移电流



在弱电场的作用下，空穴的平均漂移速度为：

$$v_{dp} = \mu_p E \quad \mu_p : \text{空穴的迁移率, 单位是 cm}^2/\text{Vs}$$

空穴的漂移电流：

$$J_{p|drf} = epv_{dp} = ep\mu_p E$$

电子的漂移电流:

$$\mathbf{J}_{n|drf} = \rho \mathbf{v}_{dn} = -en \mathbf{v}_{dn}$$

电子的平均漂移速度:

$$\mathbf{v}_{dn} = -\mu_n \mathbf{E}$$

电子的漂移电流:

$$\mathbf{J}_{n|drf} = -en(-\mu_n \mathbf{E}) = en\mu_n \mathbf{E}$$

# 漂移运动

电子和空穴的总漂移电流



空穴的漂移电流:

$$\mathbf{J}_{p|drf} = e p \mu_p \mathbf{E}$$

电子的漂移电流:

$$\mathbf{J}_{n|drf} = e n \mu_n \mathbf{E}$$

总的漂移电流:

$$\mathbf{J}_{n|drf} = e n \mu_n \mathbf{E} + e p \mu_p \mathbf{E} = (e n \mu_n + e p \mu_p) \mathbf{E}$$

漂移电流:

$$J_{drf} = en\mu_n E + ep\mu_p E = \boxed{(en\mu_n + ep\mu_p)E}$$

电导率:

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p$$

电阻率:

$$\rho = \frac{1}{en\mu_n + ep\mu_p} \approx \begin{cases} \frac{1}{en\mu_n} & \mathbf{n} \text{型半导体} \\ \frac{1}{ep\mu_p} & \mathbf{p} \text{型半导体} \end{cases}$$



# 电阻率与杂质浓度关系

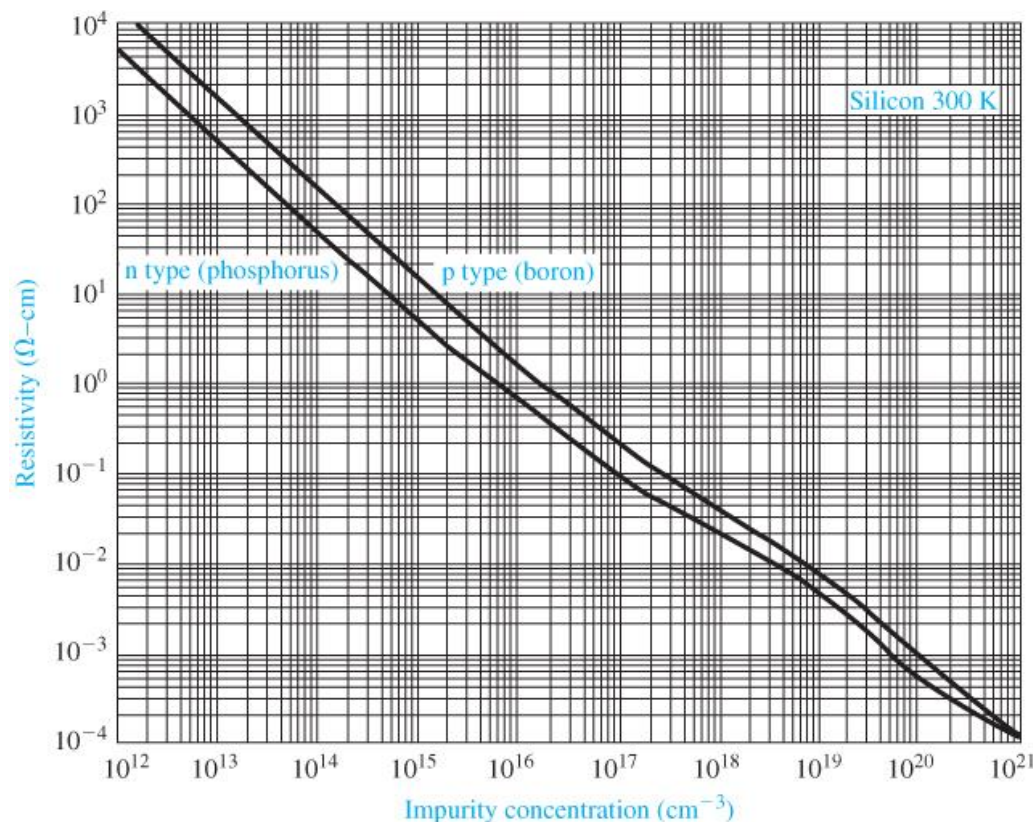


电导率:

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p$$

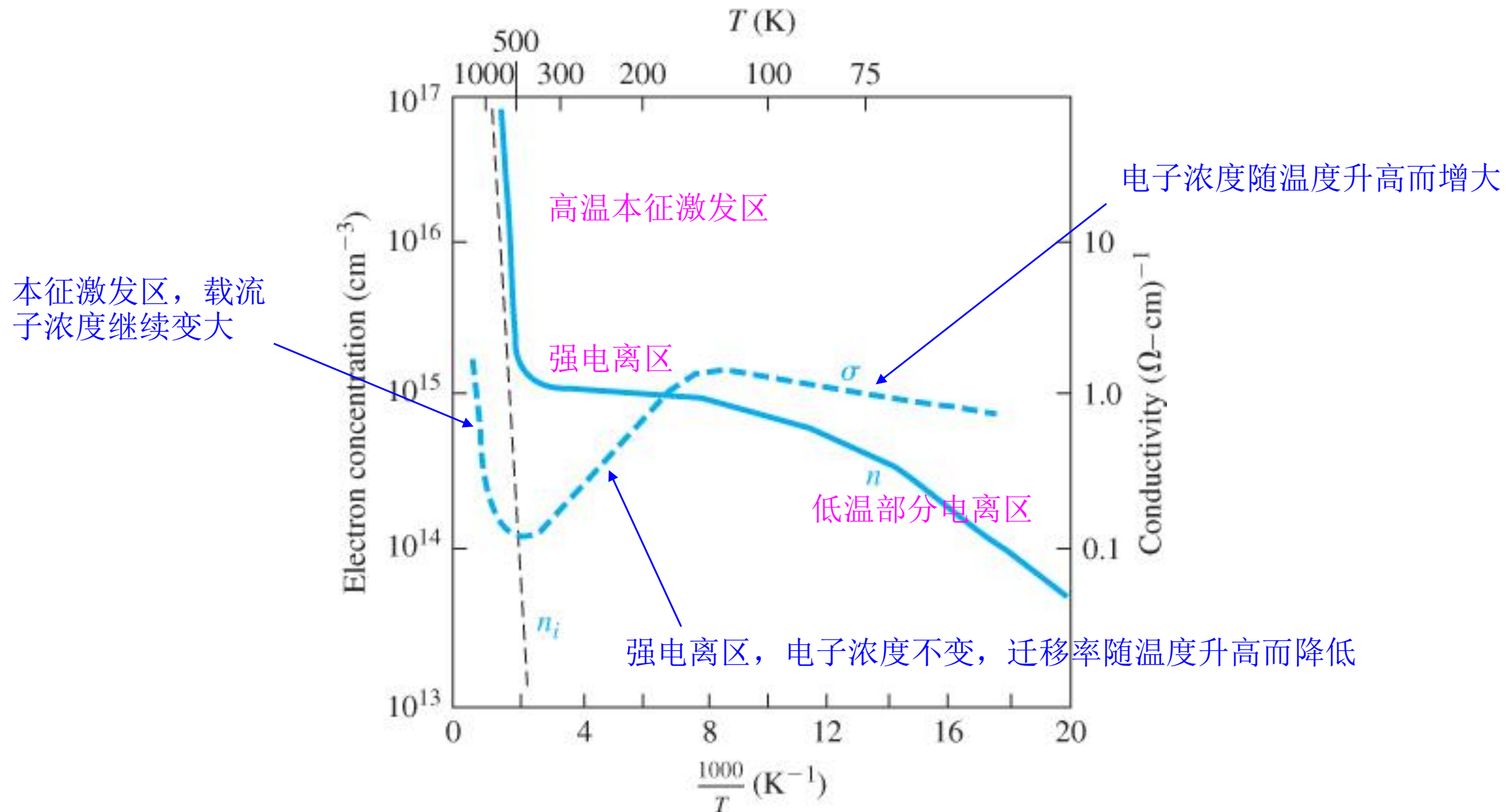
电阻率:

$$\rho = \frac{1}{en\mu_n + ep\mu_p}$$



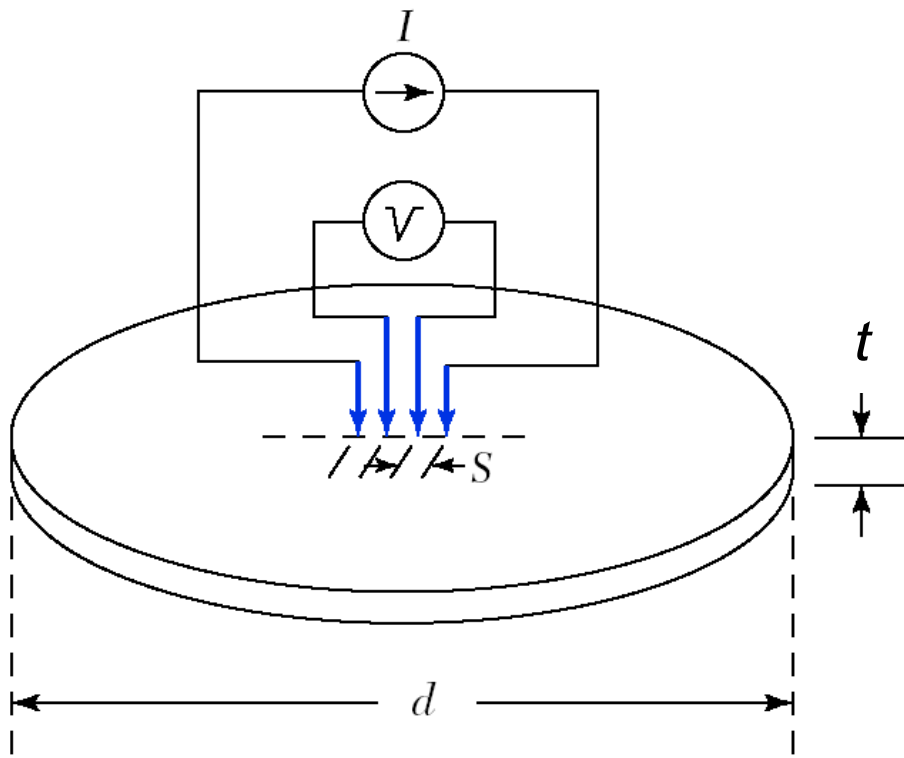
	Si	Ge	GaAs	InAs
$\mu_n$ ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )	1400	3900	8500	30,000
$\mu_p$ ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )	470	1900	400	500

# 电阻率与温度的关系



# 电阻率的测量

## 四探针法



电阻率:

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot CF \cdot t \quad (\Omega \cdot \text{cm})$$

$$\frac{d}{s} \gg 1, \quad CF = 4.54$$

方块电阻:

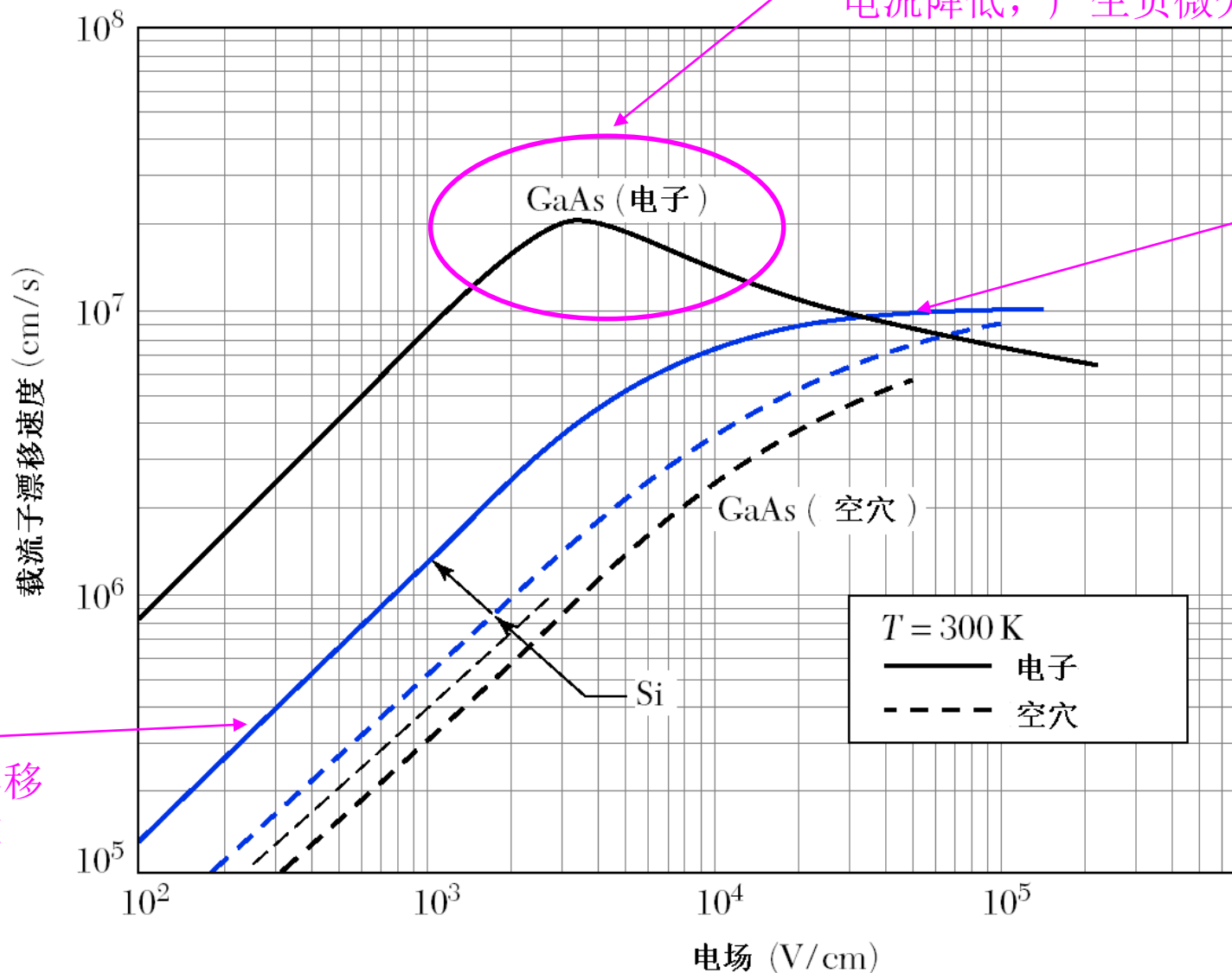
$$R_s = \frac{V}{I} \cdot CF \quad (\Omega)$$

$$R = \rho \frac{l}{Wt} = \frac{\rho}{t} \frac{l}{W}$$

# 饱和速度



GaAs材料比较特殊，漂移速度先达到峰值，后下降，即存在负斜率，也就是说电压增大，电流降低，产生负微分电阻效应。



强弱电场区，速度饱和

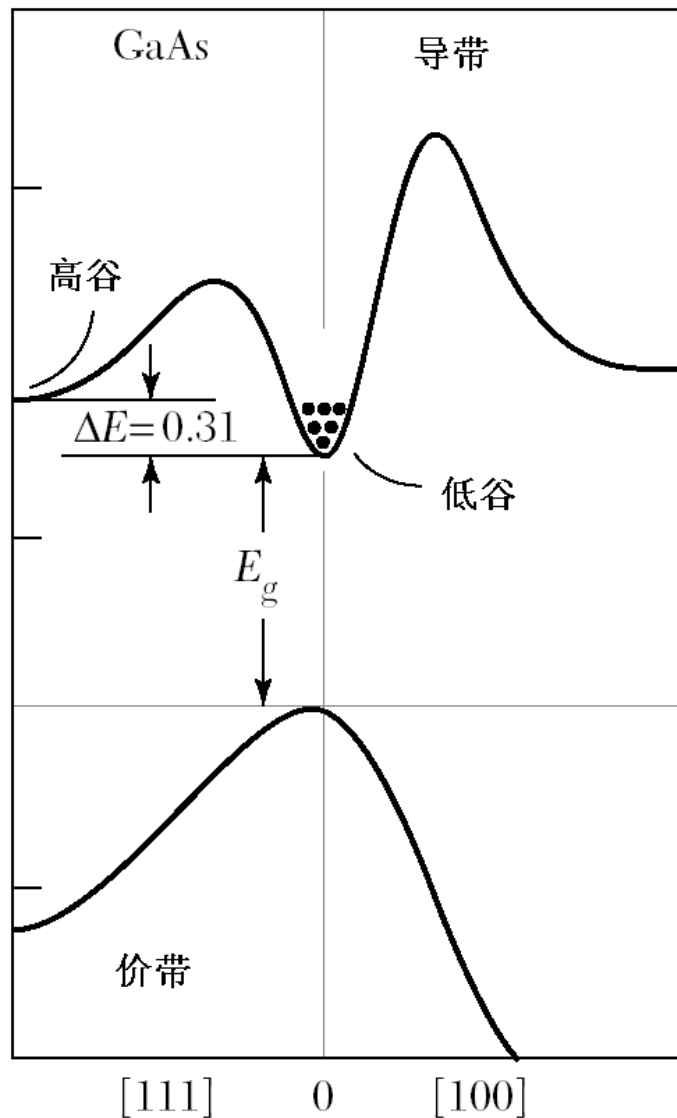
弱电场区，漂移速度线性增大

# GaAs强电场效应



能谷散射→有效质量变大→迁移率降低

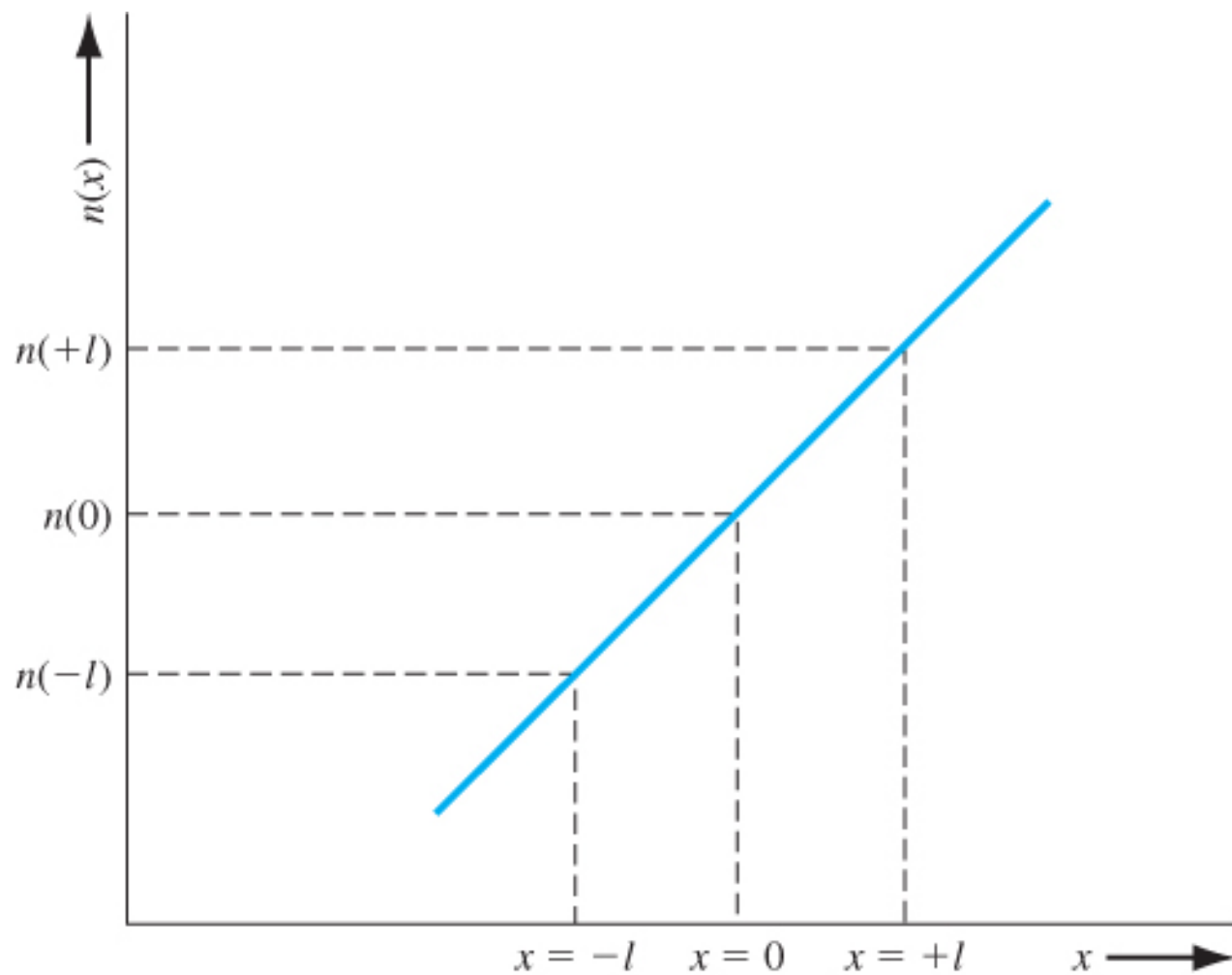
较高能谷的电子：  
有效质量为 $m_2$   
迁移率为 $\mu_2$   
浓度为 $n_2$



较低能谷的电子：  
有效质量为 $m_1$   
迁移率为 $\mu_1$   
浓度为 $n_1$

# 扩散 (Diffusion)

# 扩散运动 (Diffusion)



电子扩散电流:

$$J_{dif} = +ev_{th}l \frac{dn}{dx}$$

$$l_{cn} = v_{th}\tau_{cn}$$

$$= +eD_n \frac{dn}{dx}$$

$D_n$ : 电子扩散系数

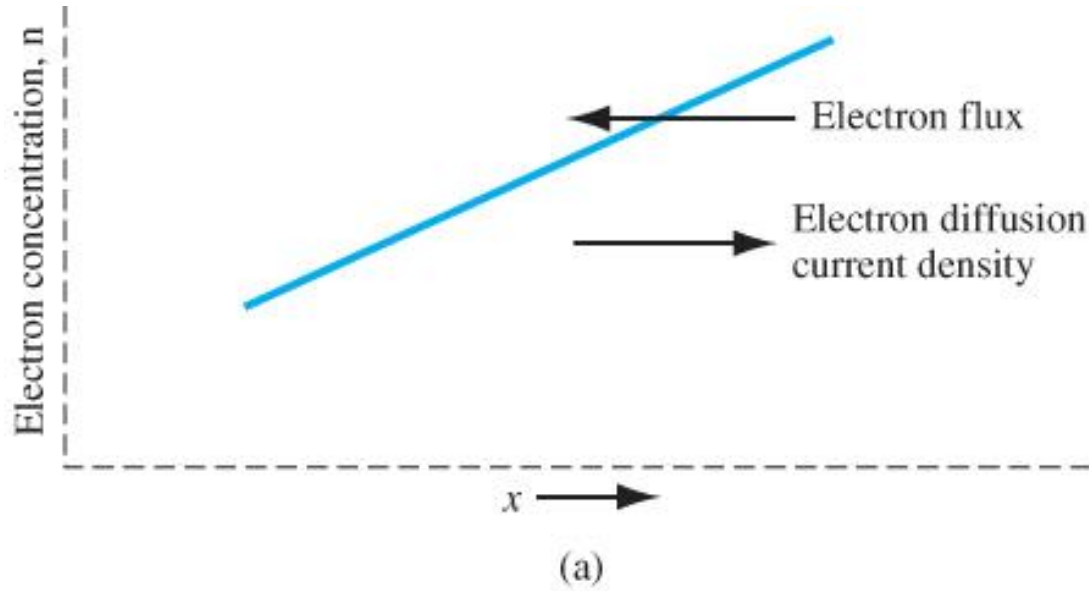
空穴扩散电流:

$$J_{dif} = -eD_p \frac{dp}{dx}$$

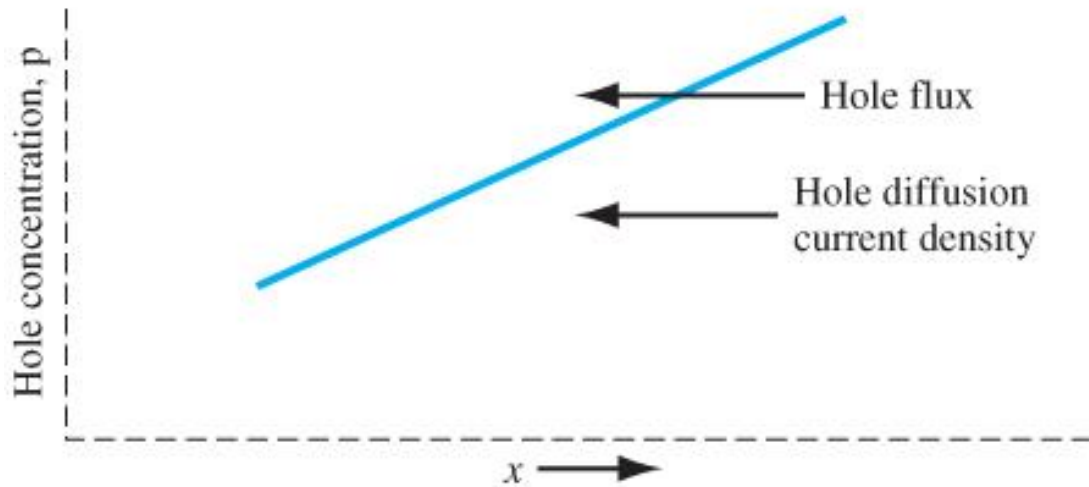
$D_p$ : 空穴扩散系数



# 扩散运动



$$J_{dif} = +eD_n \frac{dn}{dx}$$



$$J_{dif} = -eD_p \frac{dp}{dx}$$

漂移电流:

$$J_{drf} = en\mu_n E + ep\mu_p E = (en\mu_n + ep\mu_p) E$$

扩散电流:

$$J_{dif} = eD_n \frac{dn}{dx} - eD_p \frac{dp}{dx}$$

总电流:

$$J = en\mu_n E + ep\mu_p E + eD_n \frac{dn}{dx} - eD_p \frac{dp}{dx}$$

# 爱因斯坦关系

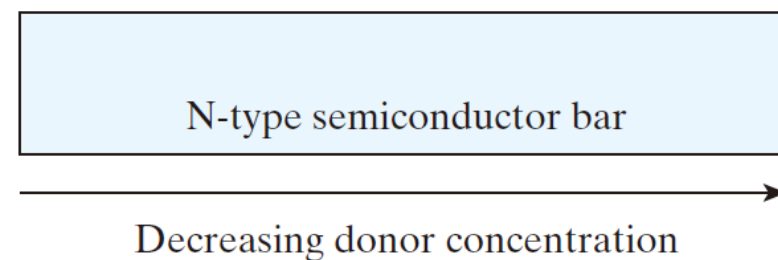
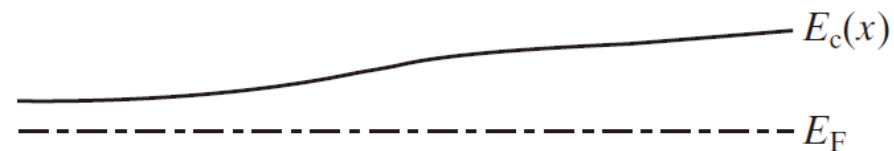
$$J_n = 0 = qn\mu_n \mathcal{E} + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$n = N_c e^{-(E_c - E_F)/kT}$$

$$\frac{dn}{dx} = \frac{-N_c}{kT} e^{-(E_c - E_F)/kT} \frac{dE_c}{dx}$$

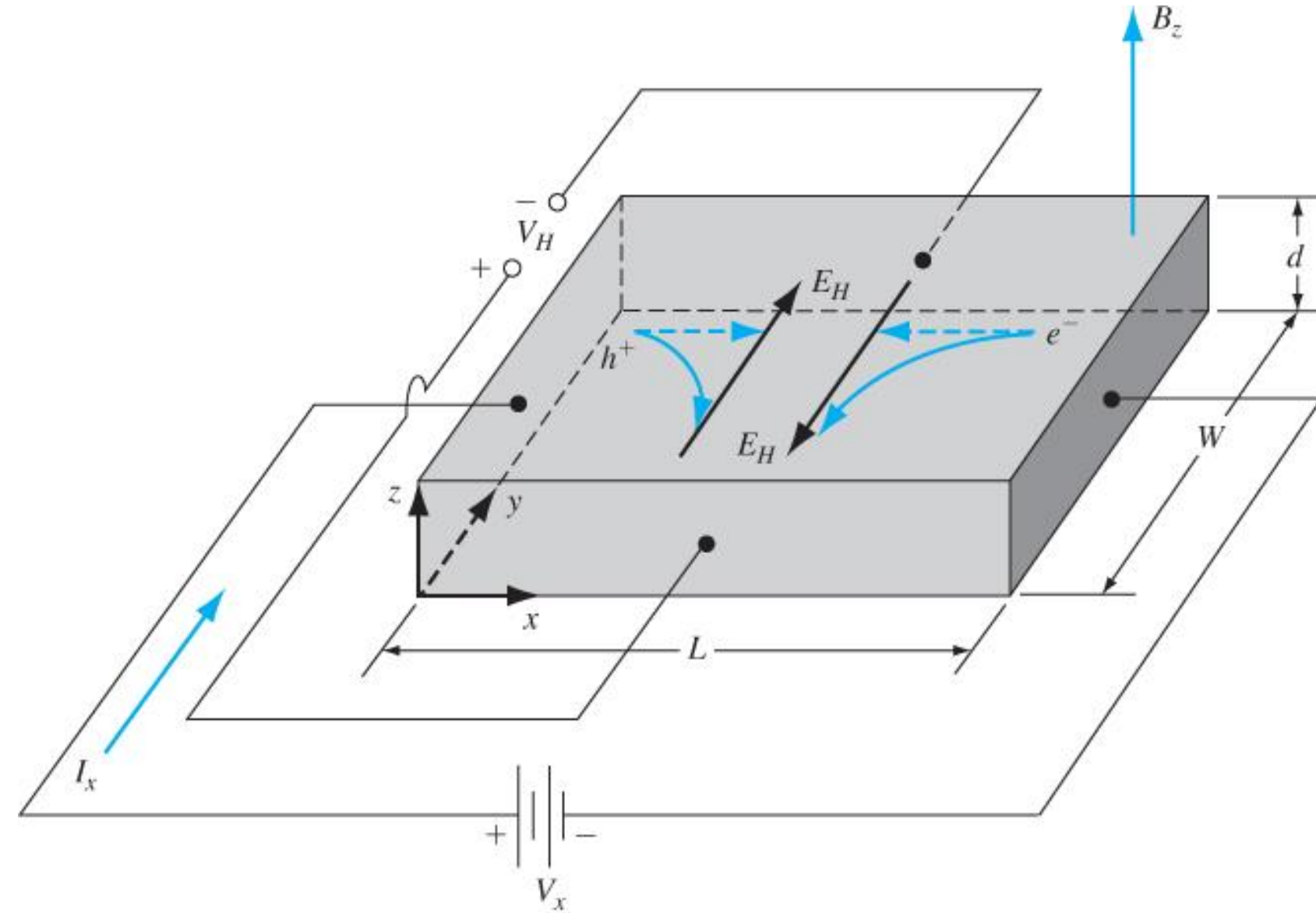
$$= \frac{-n}{kT} \frac{dE_c}{dx}$$

$$= \frac{-n}{kT} q \mathcal{E}$$



$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{e}$$

# 霍尔效应



$$qE_y = qv_x B_z$$

$$V_H = E_y W$$

# 扩散运动

$$qE_y = qv_x B_z$$

$$V_H = E_y W$$

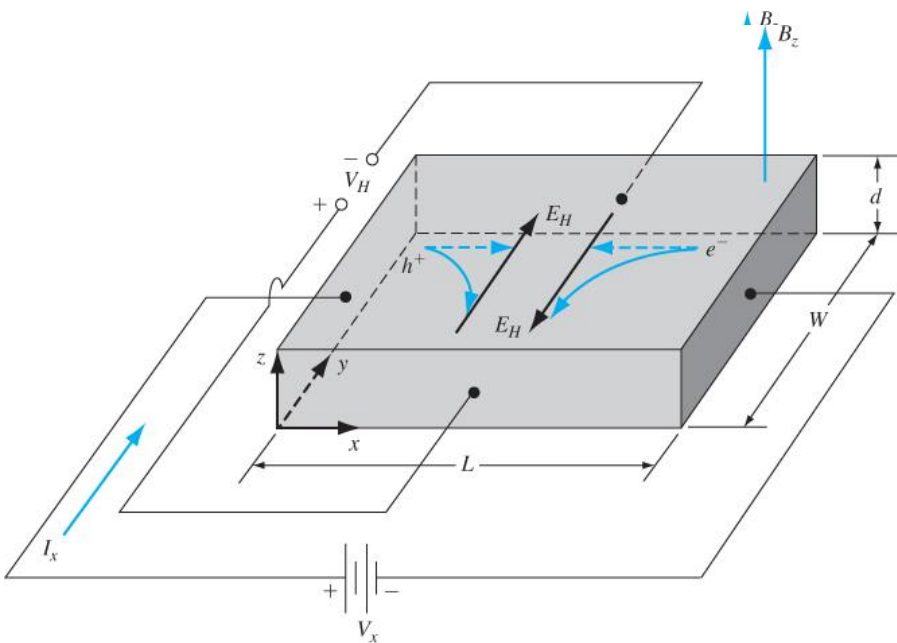
$$= v_x B_z W$$

$$= \frac{I}{epdW} B_z W$$

$$= \frac{IB_z}{epd}$$

$$p = \frac{IB_z}{edV_H}$$

$$n = -\frac{IB_z}{edV_H}$$



# 霍尔效应



$$J_x = epv_x = ep\mu_p E_x$$

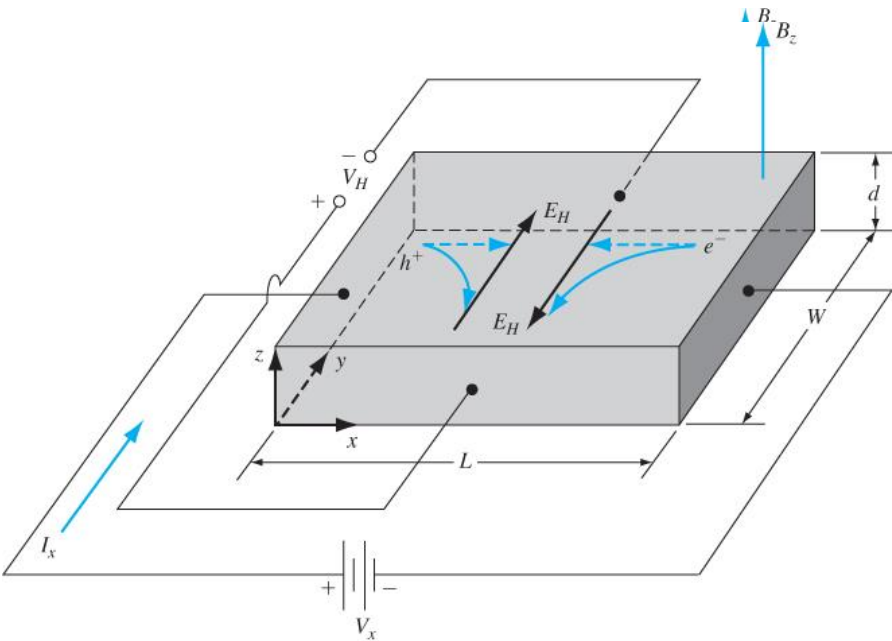
$$\frac{I_x}{dW} = ep\mu_p \frac{V_x}{L}$$

$$\mu_p = \frac{I_x L}{epdWV_x}$$

$$\mu_n = \frac{I_x L}{endWV_x}$$

$$p = \frac{IB_z}{edV_H}$$

$$n = -\frac{IB_z}{edV_H}$$



- 1) 欧姆定律
- 2) 载流子输运机制
  - 漂移(Drift): 外加电场
  - 扩散(Diffusion): 浓度梯度
- 3) 载流子散射机制
  - 晶格散射 (声子散射)
  - 电离杂质散射
- 4) 迁移率与温度、杂质浓度关系
- 5) 弱电场: 线性关系
- 6) 强电场: 速度饱和
- 7) 扩散系数
- 8) 爱因斯坦关系
- 9) 霍尔效应 (Hall Effect)
- 10) 霍尔电压
  - 载流子类型
  - 浓度
  - 迁移率