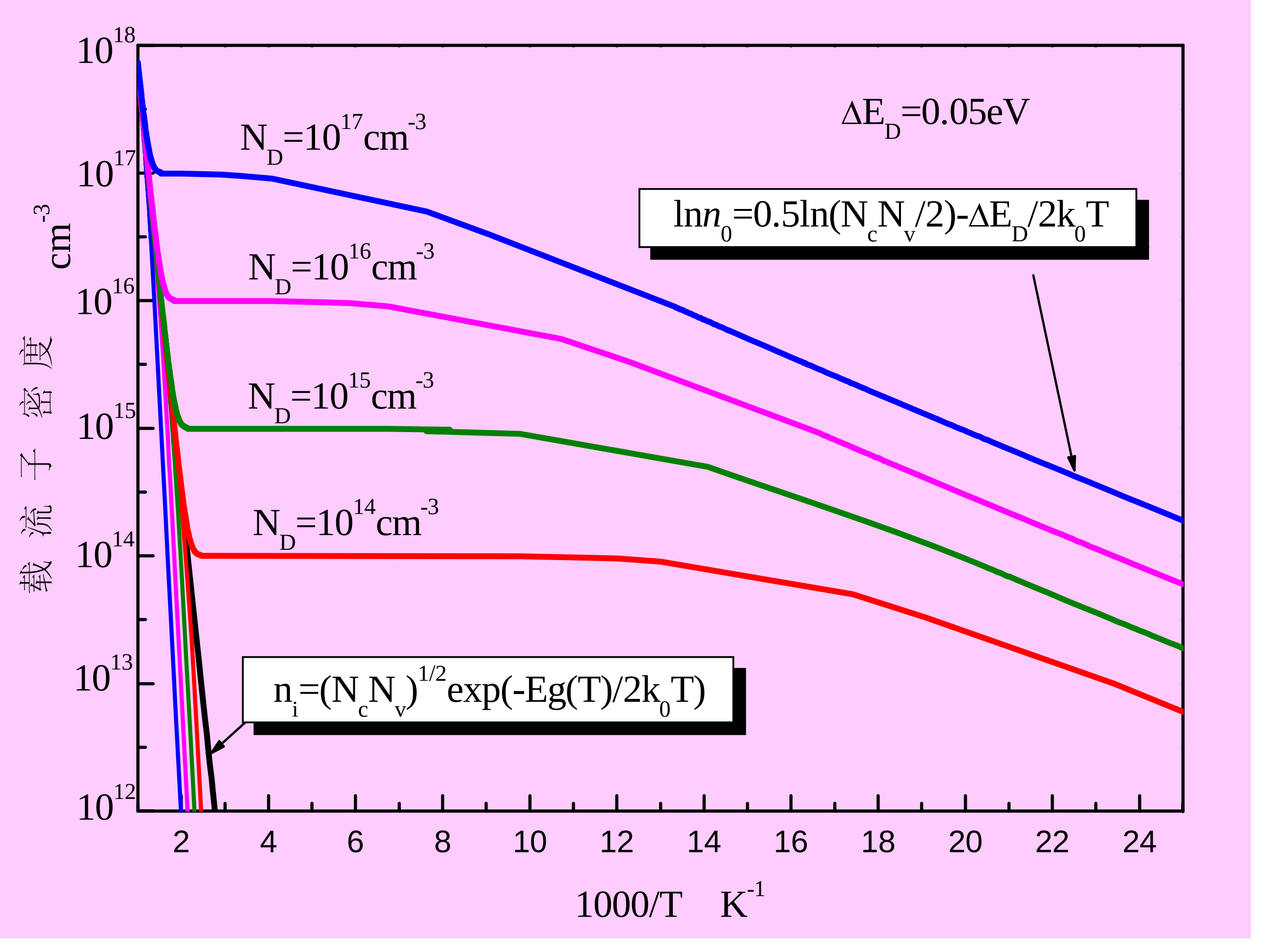
前节要点

n型半导体电子密度随温度的变化



三、载流子的冻析效应(Freeze-out)

指简并半导体和杂质电离能偏高的宽禁带半导体中未电离杂质浓度较高的情况。利用电中性条件讨论冻析比例随掺杂条件与温度的变化。

$$n_D=\frac{N_D}{1+\frac{1}{g_D}\exp(\frac{E_D-E_F}{kT})}$$

$$n_D^+=N_D-n_D=\frac{N_D}{1+g_D\exp\left(-\frac{E_D-E_F}{k_0T}\right)}$$

$$p_A=\frac{N_A}{1+\frac{1}{g_A}\exp(\frac{E_F-E_A}{kT})}$$

$$p_A^-=N_A-p_A=\frac{N_A}{1+g_A\exp\left(-\frac{E_F-E_A}{k_0T}\right)}$$

对受主取$\boldsymbol{g_A}$= **4**，因为价带顶有轻重空穴之分

计算载流子密度要使用费米积分

因为是重掺杂，n型材料的电中性条件可忽略 p_0 ,即 $n_0 = n_D^+$

$$n_0 = N_C \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}(\xi_C)$$

$$n_D^+ = N_D - n_D = \frac{N_D}{1 + g_D \exp\left(-\frac{E_D - E_F}{k_0 T}\right)}$$

$$N_C \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}(\xi_C) = \frac{N_D}{1 + 2\exp\left(-\frac{E_D - E_F}{k_0 T}\right)} = \frac{N_D}{1 + 2\exp\left(\frac{\Delta E_D + E_F - E_C}{k_0 T}\right)}$$

如果已知费米能级的位置和杂质电离能，则N_D 可求；

如果已知N_D和杂质电离能，则费米能级的位置可求，但数学处理较难，须利用费米积分的解析模型；例如

$$F_{1/2}(\xi) = \frac{2\xi^{3/2}}{3} + \frac{\pi^2}{12\xi^{1/2}}$$ $\xi > 1.25$ 式（2-92） 或

$$F_{1/2}(\xi) = \frac{2\sqrt{\pi}\exp(\xi)}{4 + \exp(\xi)}$$ $\xi < 2$ 式（2-101）

【例题】已知6H-SiC中氮的电离能为0.1eV，求室温下掺氮n型6H-SiC在ξ_C=-2的弱简并状态的杂质浓度及电离度。

已知6H-SiC的$N_C=8.9\times10^{19}cm^{-3}$。

解：由电中性条件 $$N_C\frac{2}{\sqrt{\pi}}F_{1/2}(\xi_C)=\frac{N_D}{1+2\exp\left(\frac{\Delta E_D}{kT}+\xi\right)}$$

知杂质浓度 $$N_D=\frac{2N_C}{\sqrt{\pi}}[1+2\exp(\xi)\exp(\frac{\Delta E_D}{kT})]\cdot F_{1/2}(\xi_C)$$

杂质电离度 $$\frac{n_D^+}{N_D}=\frac{1}{1+2\exp\left(\frac{\Delta E_D}{kT}+\xi\right)}$$

由已知条件ξ_C=-2查表2-2知$F_{1/2}(-2)=0.115$，连同其他已知条件$N_C=8.9\times10^{19}cm^{-3}$、$\Delta E_D=0.1eV$、室温$kT=0.026eV$带入式中，

算得 $N_D=1.6\times10^{20}\,\mathrm{cm}^{-3}$ $\qquad\frac{n_D^+}{N_D}=7.3\%$

四、禁带窄化

重掺杂半导体中，由于杂质原子间距缩短，波函数发生重叠，孤立的杂质能级扩展为带 ，称为杂质能带。

1、重掺杂对半导体能带结构和载流子运动的影响

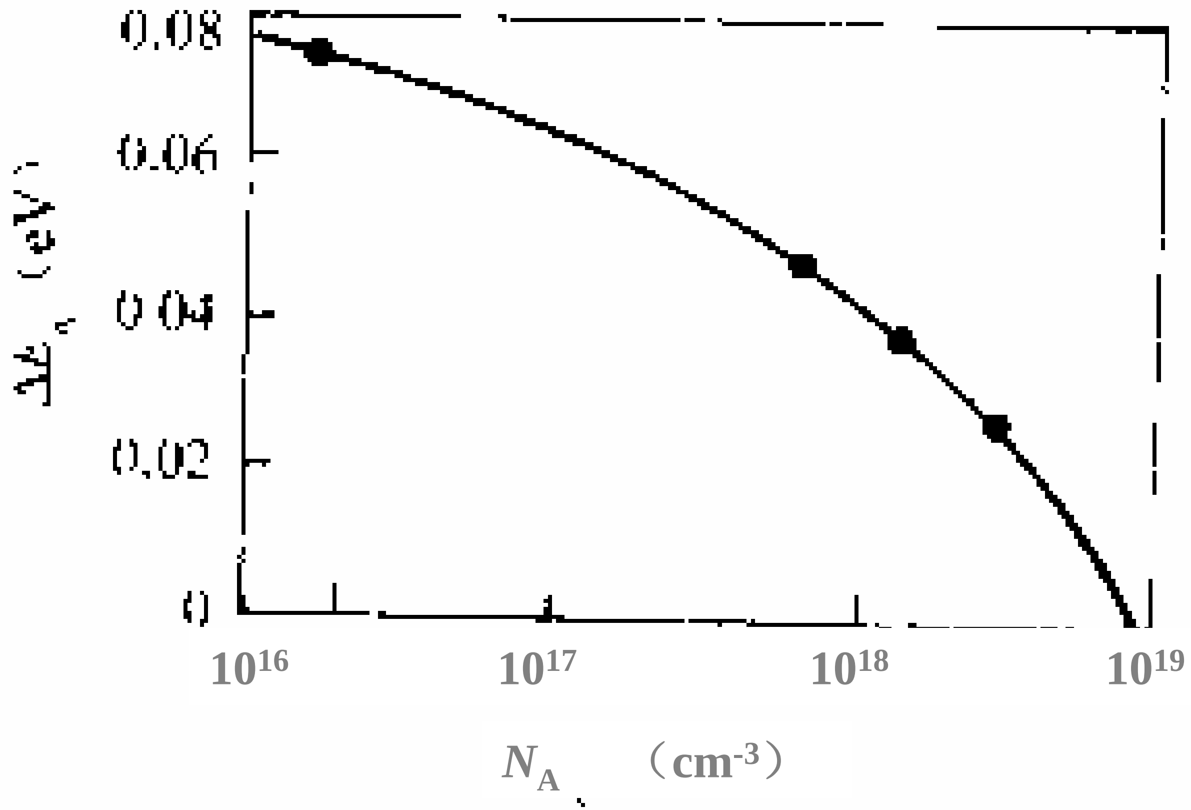
在重掺杂半导体中，杂质原子间距的缩小主要从以下三个方面对半导体的能带结构和载流子运动发生影响：

1）杂质带中电子在杂质原子之间作共有化运动，参与导电

2）杂质电离能减小；

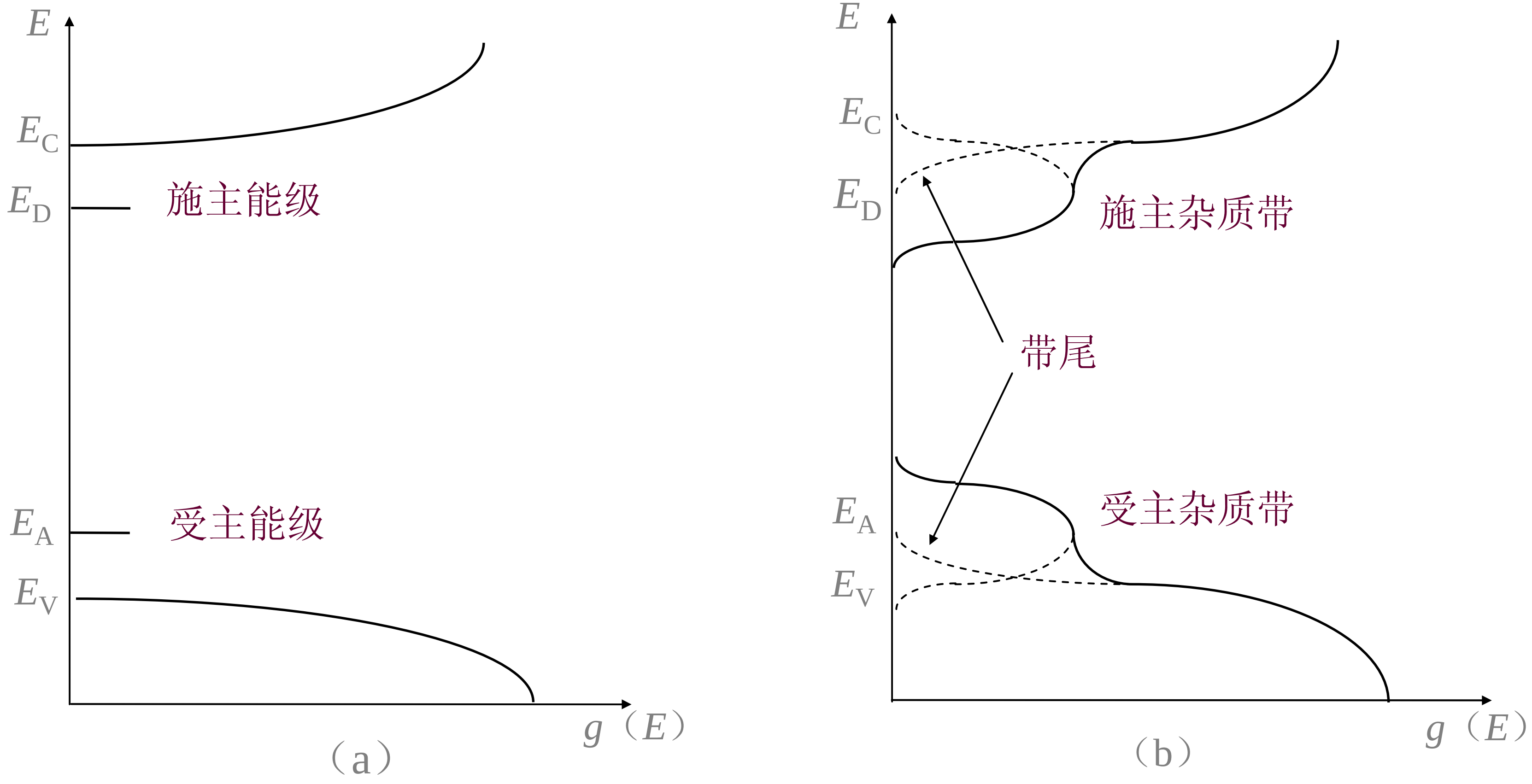
3）杂质能带扩展至与导带（或价带）相连，使禁带变窄

硅中硼的电离能随杂质浓度的升高而下降



硅中硼浓度超过 $8\times10^{18}/cm^3$ 后，载流子冻析效应基本消失，硼的电离能在其浓度达到 $8\times10^{18}/cm^3$ 时接近于零。

轻掺杂（a）和重掺杂（b）半导体的能带结构



半导体导电能力的描述

一、欧姆定律的微分形式

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

二、恒定电场下载流子的漂移运动

$$J_n=-qn\upsilon_{dn}=-qn\mu_n\mathcal{E}$$

$$J_p=qpv_{dp}=qp\mu_p\mathcal{E}$$

三、半导体的电导率

$$\sigma_n=qn\mu_n$$

$$\sigma_{\mathrm{p}}=qp\mu_p$$

四、非简并半导体的载流子密度

$$n_0=N_C\exp(-\frac{E_C-E_F}{kT})=n_i\exp(\frac{E_F-E_i}{kT})$$

$$p_0=N_V\exp(-\frac{E_F-E_V}{kT})=n_i\exp(\frac{E_i-E_F}{kT})$$

§ 2.4 载流子迁移率

§ 2.4.1 恒定电场下载流子漂移运动的微观描述

一、载流子的热运动和平均自由时间

t=0时刻的N_0个电子，散射几率为P，N(t)表示在时刻 t 尚未遭受散射的电子数，N(t)随时间的变化率：

$$\frac{dN(t)}{dt}=\lim\frac{N(t+\Delta t)-N(t)}{\Delta t}=-PN(t)$$

该微分方程的解是 $N(t)=N_0e^{-Pt}$

在t 到 $t+\Delta t$ 之间受到散射的电子数目 $PN_0e^{-Pt}dt$

其自由时间为t,

N_0个电子的平均自由时间 $\tau=\frac{1}{N_0}\int_0^{\infty}N_0Pe^{-pt}tdt=\frac{1}{P}$

二、电场中载流子的平均漂移速度

设电子在t=0时刻经受第一次散射后具有的初速度为v_0，在时刻 t 经受第二次散射时的即时速度为$v(t)$，则

$$v(t)=v_0+\frac{qE}{m^*}t$$

因为对大量载流子的v_0求和为零，因此利用上式求平均速度只需对第二项积分，即

$$\bar{v}=\frac{1}{N_0}\int_0^\infty N_0Pe^{-pt}\frac{qE}{m^*}tdt=\frac{qE}{m^*}\tau$$

电子的迁移率

$$\mu=\frac{q\tau}{m^*}$$

§ 2.4.2 决定迁移率大小的物理因素

由电子迁移率和空穴迁移率的微观含义表达式

$$\mu = \frac{q\tau_n}{m_n^*} \qquad \mu = \frac{q\tau_p}{m_p^*}$$

可知，载流子迁移率的大小决定于两个因素：一是载流子有效质量的大小，二是散射机构作用的强弱。

多种散射机构同时起作用时的迁移率

$$P = P_I + P_{II} + P_{III} + \ldots$$

$$\frac{1}{\tau} = P_I + P_{II} + P_{III} + \ldots = \frac{1}{\tau_I} + \frac{1}{\tau_{II}} + \frac{1}{\tau_{III}} + \cdots$$

$$\mu^{-1} = \mu_I^{-1} + \mu_{II}^{-1} + \mu_{III}^{-1} + \ldots$$

§ 2.4.3 有效质量各向异性时的迁移率

对m_n*各向异性的多能谷半导体，计算迁移率时要考虑到不同能谷中电子沿同一电场方向的有效质量不同。

以硅为例，设电场沿 x 方向，则两个[100]能谷中的电子沿电场方向的迁移率 $\mu_1 = q\tau_n/m_l$，其余4个能谷中的电子沿电场方向的迁移率 μ_2和 μ_3则应等于$q\tau_n/m_t$。设电子密度为n，分布在每个能谷中的电子数相等，即各$n/6$，则J_x应是六个能谷中的电子对电流贡献的总和，即

$$J_x = \frac{n}{3}q\mu_1 E_x + \frac{n}{3}q\mu_2 E_x + \frac{n}{3}q\mu_3 E_x = \frac{1}{3}nq(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3)E_x$$

$$= nq\mu_C E_x$$

$$\mu_C = \frac{1}{3}(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3)$$

$$\mu_C = \frac{1}{3}(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3) = \frac{1}{3}\left(\frac{q\tau_n}{m_l} + 2\frac{q\tau_n}{m_t}\right)$$

$$\mu_C = \frac{q\tau_n}{m_C}$$

$$\frac{1}{m_C} = \frac{1}{3}\left(\frac{1}{m_l} + \frac{2}{m_t}\right)$$

称$\boldsymbol{m_c}$为电导有效质量

砷化镓等半导体具有各向同性的电子有效质量，常用半导体的空穴有效质量一般按各向同性看待，均不存在上述问题。

- 作业：2-11、12