半导体物理B

Semiconductor Physics B

程骏骥

电子科技大学

思考题

例：试计算300 ℃时Si本征费米能级的相对位置

已知300 ℃时Si的$m_n^* \approx 1.08\ m_0$，$m_p^* \approx 0.56\ m_0$

$E_g(300\ \mathrm{K}) = 1.12\ \mathrm{eV}$，$E_g(573\ \mathrm{K}) = 0.8995\ \mathrm{eV}$

解：热平衡态下，本征载流子成对出现，故：

$$n_{0i} = p_{0i} \qquad (1)$$

又已知：

$$\begin{cases} n_0 = N_c \cdot e^{-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}} & (2) \\ p_0 = N_v \cdot e^{-\frac{E_F - E_v}{k_0 T}} & (3) \end{cases}$$

思考题

将(2), (3)代入(1)，则：

$$N_c \cdot e^{-\frac{E_c - E_{Fi}}{k_0 T}} = N_v \cdot e^{-\frac{E_{Fi} - E_v}{k_0 T}}$$

$$\Rightarrow \quad E_{Fi} = E_i + \frac{k_0 T}{2} \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right)$$

代入导带和价带有效状态密度：

$$N_c = 2\left(\frac{2\pi m_n^* k_0 T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \qquad N_v = 2\left(\frac{2\pi m_p^* k_0 T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$$

得： $$E_{Fi} = E_i + \frac{k_0 T}{2} \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right)^{\frac{3}{2}}$$

思考题

$$E_{Fi}=E_i+\frac{k_0T}{2}\ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right)^{\frac{3}{2}}$$

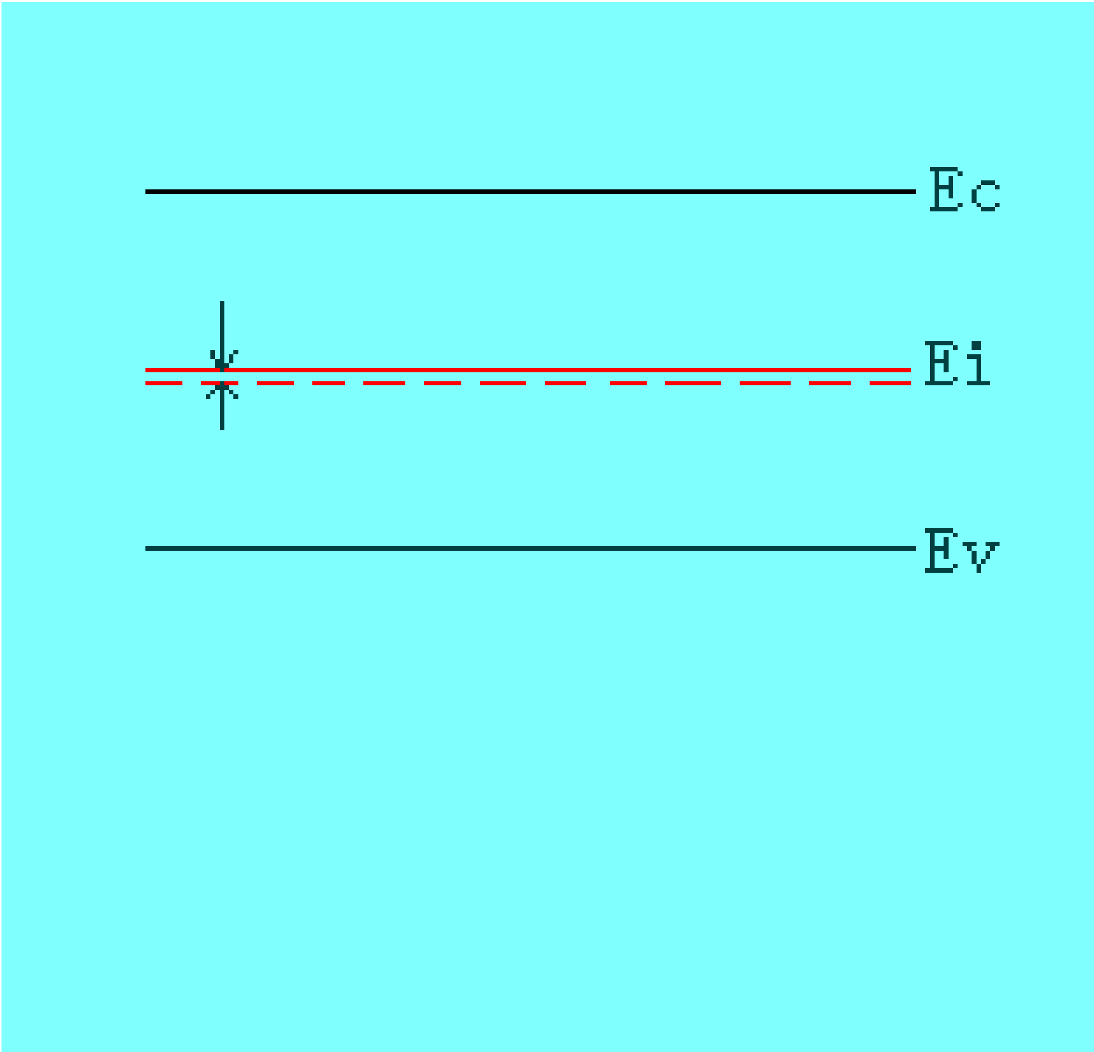
代入：$m_p^*\approx 0.56m_0$， $m_n^*\approx 1.08m_0$

$$\Rightarrow E_{Fi}=E_i-0.02446\ \mathrm{eV}$$

代入：$E_g(573\ \mathrm{K})=E_g(0\ \mathrm{K})-\frac{\alpha T^2}{\beta+T}=0.8995\ \mathrm{eV}$

得：$\frac{E_{Fi}-E_i}{E_g(573\ \mathrm{K})}\approx -2.72\ \%$

思考题



思考题

已知某半导体材料的N_c和N_v、E_c和E_v。

(1) 求其本征载流子浓度n_i和本征费米能级E_{Fi}

思考题

解：(1) 热平衡时本征载流子成对出现，故：

$$n_i = n_{0i} = p_{0i}$$

$$\therefore n_i = \sqrt{n_{0i} \cdot p_{0i}}$$

代入平衡载流子浓度方程得：

$$n_i = \sqrt{\left[N_c \cdot e^{-\frac{E_C - E_{Fi}}{k_0 T}}\right] \cdot \left[N_v \cdot e^{-\frac{E_{Fi} - E_v}{k_0 T}}\right]}$$

$$= \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_C - E_v}{2k_0 T}}$$

思考题

再求本征费米能级：

$$\because n_{0i} = p_{0i}$$

$$\therefore N_c \cdot e^{-\frac{E_c - E_{Fi}}{k_0 T}} = N_v \cdot e^{-\frac{E_{Fi} - E_v}{k_0 T}}$$

对等式两边取对数：

$$\Rightarrow \quad E_{Fi} = \frac{1}{2}(E_c + E_v) + \frac{k_0 T}{2} \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right)$$

思考题

已知某半导体材料的N_c和N_v、E_c和E_v。

(1) 求其本征载流子浓度n_{i}和本征费米能级E_{Fi}

(2) 论证n_0、p_0与n_{i} 、E_F之间有如下关系

$$\begin{cases} n_0 = n_i \cdot e^{-\frac{E_i - E_F}{k_0 T}} \\ p_0 = n_i \cdot e^{-\frac{E_F - E_i}{k_0 T}} \end{cases}$$

思考题

(2) 证：

平衡载流子浓度

$$\begin{cases} n_0 = N_c \cdot e^{-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}} \rightarrow (1) \\ p_0 = N_v \cdot e^{-\frac{E_F - E_v}{k_0 T}} \rightarrow (2) \end{cases}$$

本征载流子浓度

$$\begin{cases} n_i = N_c \cdot e^{-\frac{E_c - E_i}{k_0 T}} \rightarrow (3) \\ n_i = N_v \cdot e^{-\frac{E_i - E_v}{k_0 T}} \rightarrow (4) \end{cases}$$

式(1)/(3)，则有：

$$\frac{n_0}{n_i} = \frac{N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}}}{N_c e^{-\frac{E_c - E_i}{k_0 T}}} = e^{-\frac{E_i - E_F}{k_0 T}}$$

思考题

即

$$n_0 = n_i e^{-\frac{E_i - E_F}{k_0 T}}$$

同理可得：

$$p_0 = n_i e^{-\frac{E_F - E_i}{k_0 T}}$$

证毕。

习题2

已知室温下，Si的有效态密度分别为$N_c = 2.8 \times 10^{19}$ cm^{-3} 和 $N_v = 1.1 \times 10^{19}$ cm^{-3}。

（1）计算77 K时的N_c和N_v(假设有效质量基本不随温度变化)

习题2

解：

（1）假设载流子的有效质量基本不随温度变化

$$由 N_c = 2\frac{(2\pi m_n{}^* k_0 T)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \Rightarrow \frac{N_c(77\ \mathrm{K})}{N_c(300\ \mathrm{K})} = \frac{(77)^{\frac{3}{2}}}{(300)^{\frac{3}{2}}}$$

$$N_c(77\ \mathrm{K}) = N_c(300\ \mathrm{K})\left(\frac{77}{300}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$= (2.8 \times 10^{19})\left(\frac{77}{300}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$= 3.64 \times 10^{18}\ (\mathrm{cm}^{-3})$$

习题2

同理：

$$由 N_v = 2\frac{(2\pi m_p{}^* k_0 T)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \quad \Longrightarrow \frac{N_v(77\ \mathrm{K})}{N_v(300\ \mathrm{K})} = \frac{(77)^{\frac{3}{2}}}{(300)^{\frac{3}{2}}}$$

$$故：N_v(77\ \mathrm{K}) = N_v(300\ \mathrm{K})\left(\frac{77}{300}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$= (1.1 \times 10^{19})\left(\frac{77}{300}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$= 1.43 \times 10^{18}\ (\mathrm{cm}^{-3})$$

习题2

已知室温下，Si的有效态密度分别为$N_c = 2.8 \times 10^{19}$ cm^{-3} 和 $N_v = 1.1 \times 10^{19}$ cm^{-3}。

（1）计算77 K时的N_c和N_v(假设有效质量基本不随温度变化)

（2）E_g(77 K) = 1.166 eV，求此时本征载流子浓度

（3）若77 K时，某n型硅的电子浓度为10^{17} cm^{-3}，已知未掺入受主且$E_C - E_D = 0.02$ eV，求掺入的施主浓度N_D为多少？

习题2

（2）77 K时的本征载流子浓度：

$$n_i = \sqrt{N_c(77\ \mathrm{K})N_v(77\ \mathrm{K})} \cdot e^{-\frac{E_g(77\ \mathrm{K})}{2k_0T}}$$

$$= \sqrt{(3.64 \times 10^{18})(1.43 \times 10^{18})} \cdot e^{-\frac{1.166}{2\times0.026\times\left(\frac{77}{300}\right)}}$$

$$= 2.61 \times 10^{-20}\,(\mathrm{cm}^{-3})$$

本征激发极微弱，可以忽略

习题2

已知室温下，Si的有效态密度分别为$N_c = 2.8 \times 10^{19}$ cm^{-3} 和 $N_v = 1.1 \times 10^{19}$ cm^{-3}。

（1）计算77 K时的N_c和N_v(假设有效质量基本不随温度变化)

（2）E_g(77 K) = 1.166 eV，求此时本征载流子浓度

（3）若77 K时，某n型硅的电子浓度为10^{17} cm^{-3}，已知未掺入受主且$E_C - E_D = 0.02$ eV，求掺入的施主浓度N_D为多少？

习题2

（3）77 K时，低温忽略本征激发，电中性条件为

$$n_0 = {n_D}^+ \quad \Longrightarrow n_0 = \frac{N_D}{1 + 2e^{-\frac{E_D - E_F}{k_0 T}}}$$

$$N_D = n_0\left(1 + 2e^{-\frac{E_D - E_F}{k_0 T}}\right)$$

$$= n_0\left(1 + 2e^{\frac{(E_c - E_D) - (E_c - E_F)}{k_0 T}}\right)$$

$$= n_0\left(1 + \frac{2n_0}{N_c} e^{\frac{\Delta E_D}{k_0 T}}\right)$$

代入$n_0 = 10^{17}\ \mathrm{cm}^{-3}$，$E_C - E_D = 0.02\ \mathrm{eV}$，得：

$$N_D \approx 2.1 \times 10^{17}\ \mathrm{cm}^{-3}$$

思考题

向某半导体中掺入浓度为N_D的施主杂质，试问：

(1) 从完全束缚至完全电离，E_F随T的变化趋势；

(2) $E_F = E_D$时，有多少杂质电离？若已知ΔE_D和此刻N_c，则 n_0为多少？

答：

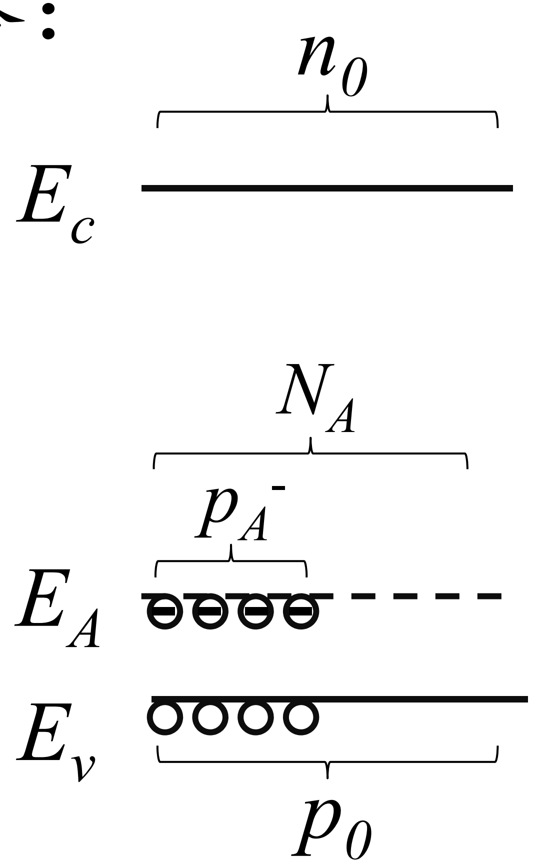
$$n_D^+ = \frac{N_D}{1+2e^{-\frac{E_D-E_F}{k_0T}}} = \frac{1}{3}N_D$$

$$n_0 = N_c e^{-\frac{E_c-E_F}{k_0T}} = N_c e^{-\frac{E_c-E_D}{k_0T}} = N_c e^{-\frac{\Delta E_D}{k_0T}}$$

思考题

试画出掺杂为N_A的p型半导体处于强电离区的电荷分布图，并求出其载流子浓度和费米能级。

答：



由电中性方程得：$\boxed{p_0 = N_A}$

再由质量作用定律得：

$$\boxed{n_0 = n_i^2 / N_A}$$

代入平衡载流子浓度方程

$$p_0 = N_v \cdot e^{-\frac{E_F - E_v}{k_0 T}}$$

得：$\boxed{E_F = E_v - k_0 T \ln(N_A / N_v)}$