半导体物理B

Semiconductor Physics B

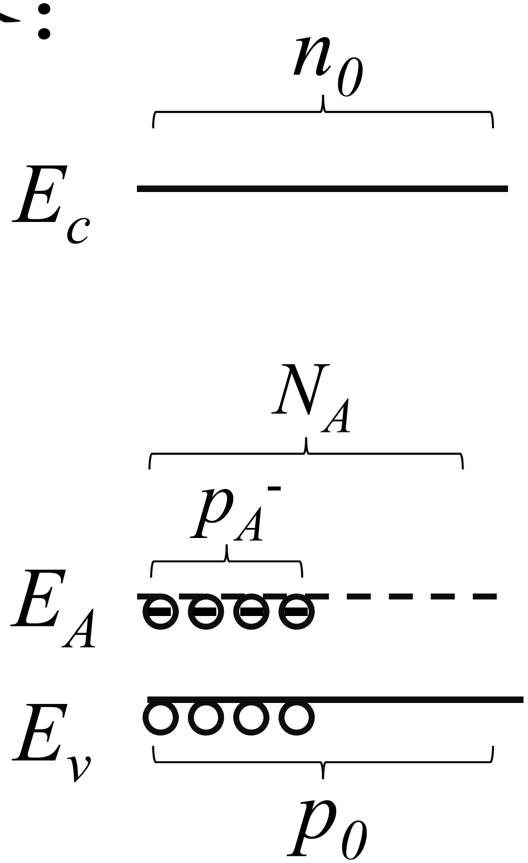
程骏骥

电子科技大学

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

思考题

（1）某Si中，每百万个Si原子掺有一个p型杂质原子，计算室温下材料中少数载流子的浓度。（已知Si晶体的原子密度为$4.96\times10^{22}\,\mathrm{cm}^{-3}$，$n_i = 1.5\times10^{10}\,\mathrm{cm}^{-3}$）

思考题

解：（1）$N_A =（4.96 \times 10^{22}）\times 10^{-6}$

$= 4.96 \times 10^{16}（cm^{-3}）>> 10n_i$

所以 $p_0 \approx N_A = 4.96 \times 10^{16}（cm^{-3}）$

故少数载流子的浓度

$$n_0 = \frac{n_i^{\ 2}}{p_0} = \frac{\left(1.5 \times 10^{10}\right)^2}{4.96 \times 10^{16}} \cong 4.5 \times 10^3 \left(cm^{-3}\right)$$

思考题

（1）某Si中，每百万个Si原子掺有一个p型杂质原子，计算室温下材料中少数载流子的浓度。（已知Si晶体的原子密度为$4.96\times10^{22}\,cm^{-3}$，$n_i = 1.5\times10^{10}\,cm^{-3}$）

（2）温度升到573K时，$n_i \approx 3\times10^{15}\,cm^{-3}$，设掺入的杂质浓度不变，问此时半导体呈现什么导电性？电子与空穴的浓度大致等于多少？

思考题

（2）573K时，

由电中性条件： $n_0 + N_A = p_0$

及质量作用定律：$n_0 p_0 = n_i^2$

得到 $p_0 \approx ??? \times 10^{16}\ \mathrm{cm^{-3}}$

所以 $n_0 = ??? \times 10^{14}\ \mathrm{cm^{-3}}$

可见， $p_0 > n_0$

因此，半导体仍呈现为p型导电性.

思考题

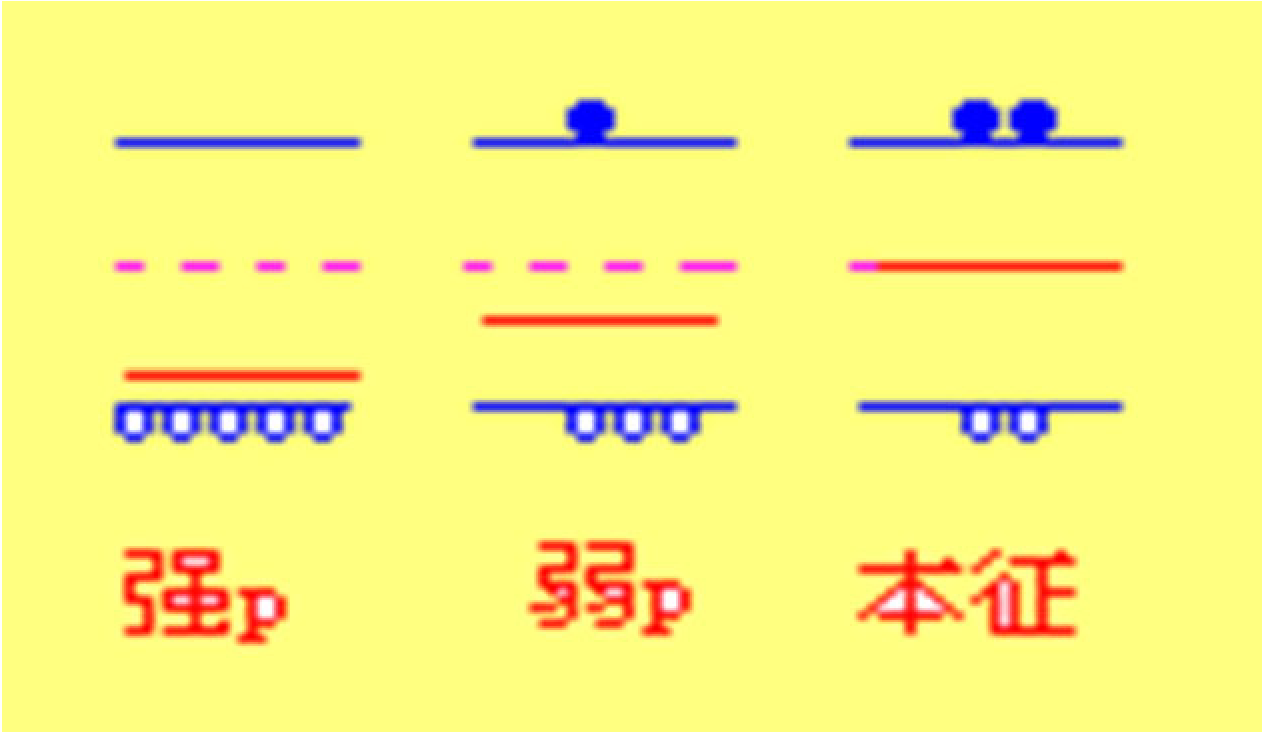
（1）某Si中，每百万个Si原子掺有一个p型杂质原子，计算室温下材料中少数载流子的浓度。（已知Si晶体的原子密度为$4.96\times10^{22}\,cm^{-3}$，$n_i = 1.5\times10^{10}\,cm^{-3}$）

（2）温度升到573K时，$n_i \approx 3\times10^{15}\,cm^{-3}$，设掺入的杂质浓度不变，问此时半导体呈现什么导电性？电子与空穴的浓度大致等于多少？

（3）画出室温下该p型Si的能带图，当杂质原子浓度增加时，费米能级将如何变化？

思考题

（3）当杂质原子浓度增加时



习题3

To calculate the thermal-equilibrium electron and hole concentration in a germanium sample with a given doping concentration.

Consider a germanium sample at $T = 300$ K in which $N_D = 5 \times 10^{13}$ cm^{-3} and $N_A = 0$.

Assume that now $n_i = 2.4 \times 10^{13}$ cm^{-3}.

习题3

Solution:

From $\begin{cases} n_0 = N_D + p_0 \\ n_0 p_0 = n_i^2 \end{cases}$

Then $n_0 = \dfrac{N_D}{2} + \dfrac{\sqrt{{N_D}^2 + 4{n_i}^2}}{2}$

$$= \frac{5 \times 10^{13}}{2} + \frac{\sqrt{(5 \times 10^{13})^2 + 4(2.4 \times 10^{13})^2}}{2}$$

$$\approx 5.97 \times 10^{13}(\mathrm{cm}^{-3})$$

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{(2.4 \times 10^{13})^2}{5.97 \times 10^{13}} = 9.65 \times 10^{12}(\mathrm{cm}^{-3})$$

习题4

To determine the required donor impurity concentration to obtain a specified E_F.

Silicon at T=300 K contains an acceptor impurity concentration of N_A=10^{16} cm^{-3}. Determine the concentration of donor impurity that must be added so that the silicon in n type and the Fermi energy is 0.20 eV below the conduction band edge. $N_c = 2.8 \times 10^{19}\ cm^{-3}$.

Solution:

From $$n_0 = N_c \cdot e^{-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}}$$

$$= 2.8 \times 10^{19} \cdot \exp\left(-\frac{0.20}{0.0259}\right)$$

$$= 1.24 \times 10^{16} \left(cm^{-3}\right)$$

$$\gg n_i$$

We have $N_D - N_A = n_0$

Then

$$N_D = 1.24 \times 10^{16} + N_A = 2.24 \times 10^{16} \left(cm^{-3}\right)$$

习题5

To determine the Fermi-level position and the maximum doping concentration at which the Boltzmann approximation is still valid.

Consider p-type silicon, at $T=300K$, doped with boron. We may assume that $E_A - E_v = 0.045$ eV and the limit of the Boltzmann approximation occurs when $E_F - E_A = 3k_0T$.

$n_i = 1.5E10\ cm^{-3}$.

•Solution:

If we assume that $E_{Fi} \approx E_i$,

from

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

Then $$N_A = n_i \cdot e^{-\frac{E_F - E_i}{k_0 T}}$$

$$= n_i \cdot e^{\frac{\frac{E_g}{2} - (E_A - E_v) - (E_F - E_A)}{k_0 T}} = \cdots\cdots =$$

$$= 3 \quad \times 10^{17} \left(cm^{-3} \right)$$

习题6

例：判断并予以修正、给出正确问题和答案：

- 为什么禁带宽度越宽，掺杂浓度越高，相应器件的极限工作温度就越高？

- 提示：如果掺杂使得半导体成为简并半导体，则掺杂浓度越高将导致禁带越窄.

- 一定温度的非简并半导体，禁带宽度越宽，n_i越小，掺杂浓度越高，n_D^+或n_A^-越大，升高温度方可使n_i超过n_D^+或n_A^-

思考题

设两块n型硅的施主浓度分别为1.5×10^{14} cm^{-3}及10^{12} cm^{-3}，试分别计算它们500 K时的n_0与p_0。

已知500 K时Si的$n_i = 3.5\times10^{14}$ cm^{-3}

解：

500 K时硅中施主已全部电离，故：

$$\begin{cases} n_0 = N_D + p_0 \\ n_0 p_0 = n_i^2 \end{cases}$$

例题

求解上述方程组，得：

$$\begin{cases} n_0 = \dfrac{N_D}{2}\left(1+\sqrt{1+\dfrac{4{n_i}^2}{{N_D}^2}}\right) \\ p_0 = \dfrac{n_i^2}{n_0} \end{cases}$$

代入： $N_D = 1.5 \times 10^{14}\ \mathrm{cm}^{-3}$和 $n_i = 3.5 \times 10^{14}\ \mathrm{cm}^{-3}$

得： $n_0 \approx 4.3 \times 10^{14}\ \mathrm{cm}^{-3}$， $p_0 \approx 2.8 \times 10^{14}\ \mathrm{cm}^{-3}$

差别已不明显

代入： $N_D = 10^{12}\ \mathrm{cm}^{-3}$和 $n_i = 3.5 \times 10^{14}\ \mathrm{cm}^{-3}$

得： $n_0 = p_0 \approx 3.5 \times 10^{14}\ \mathrm{cm}^{-3}$ 已到本征温区