半导体器件物理

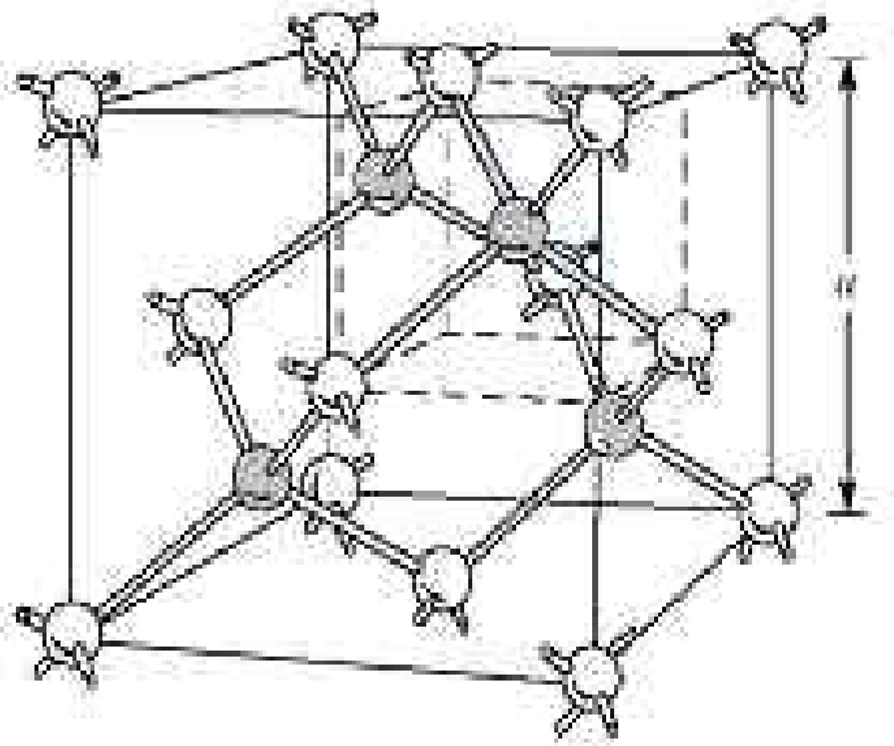
习题讲解

第二章

热平衡时的能带和载流子浓度

1. (a)硅中两最邻近原子的距离是多少？

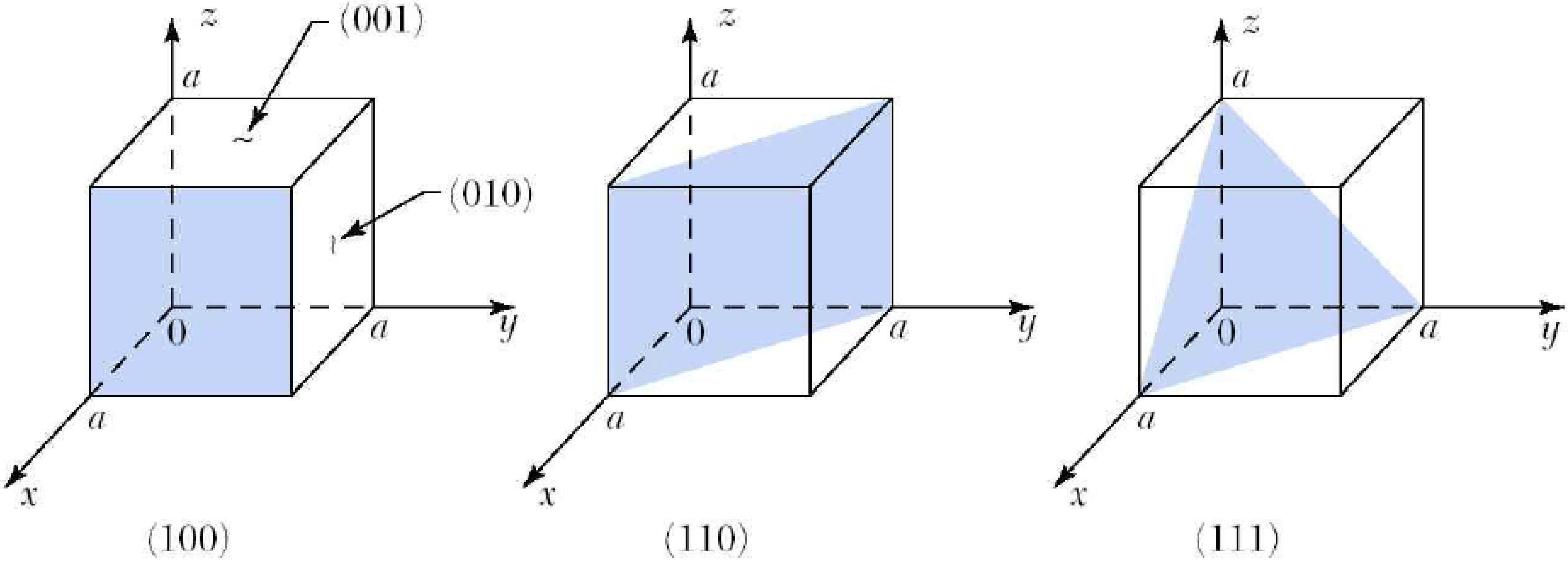
- 解答:
- (a)
- 硅的晶体结构是金刚石晶格结构，这种结构也属于面心立方晶体家族，而且可被视为两个相互套构的面心立方副晶格，此两个副晶格偏移的距离为立方体体对角线的1/4（$a\sqrt{3}/4$的长度）



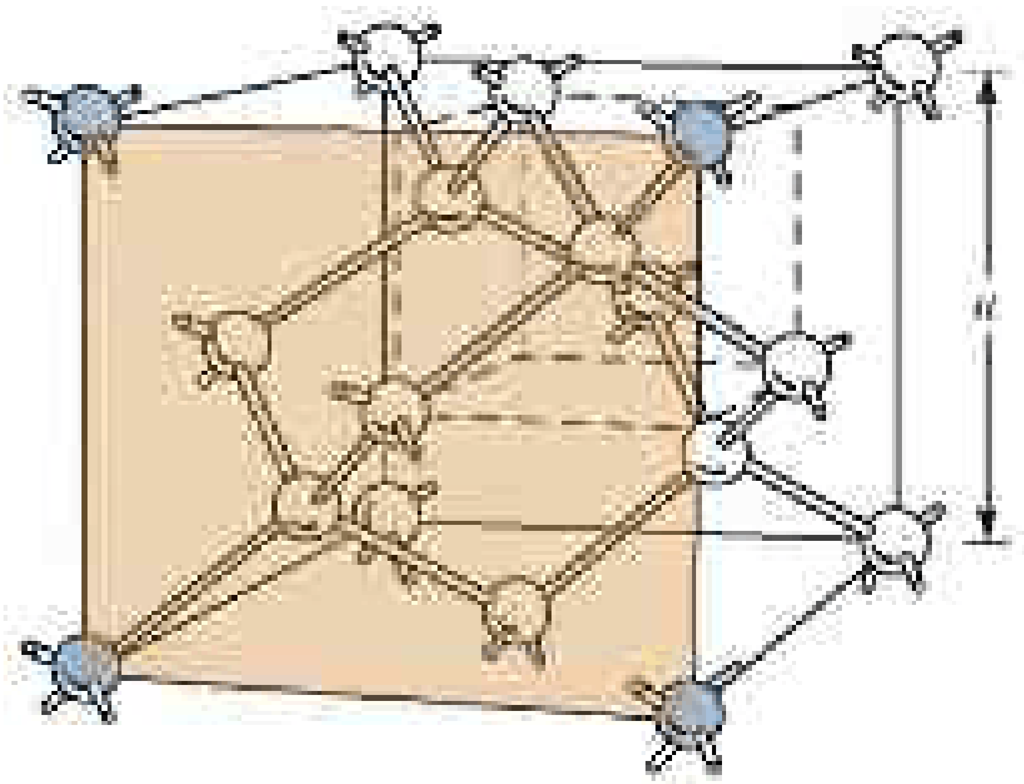
硅在300K时的晶格常数为5.43Å，

所以硅中最相邻原子距离$=\dfrac{\sqrt{3}}{4}\times 5.43 \approx 2.35\,\text{Å}$

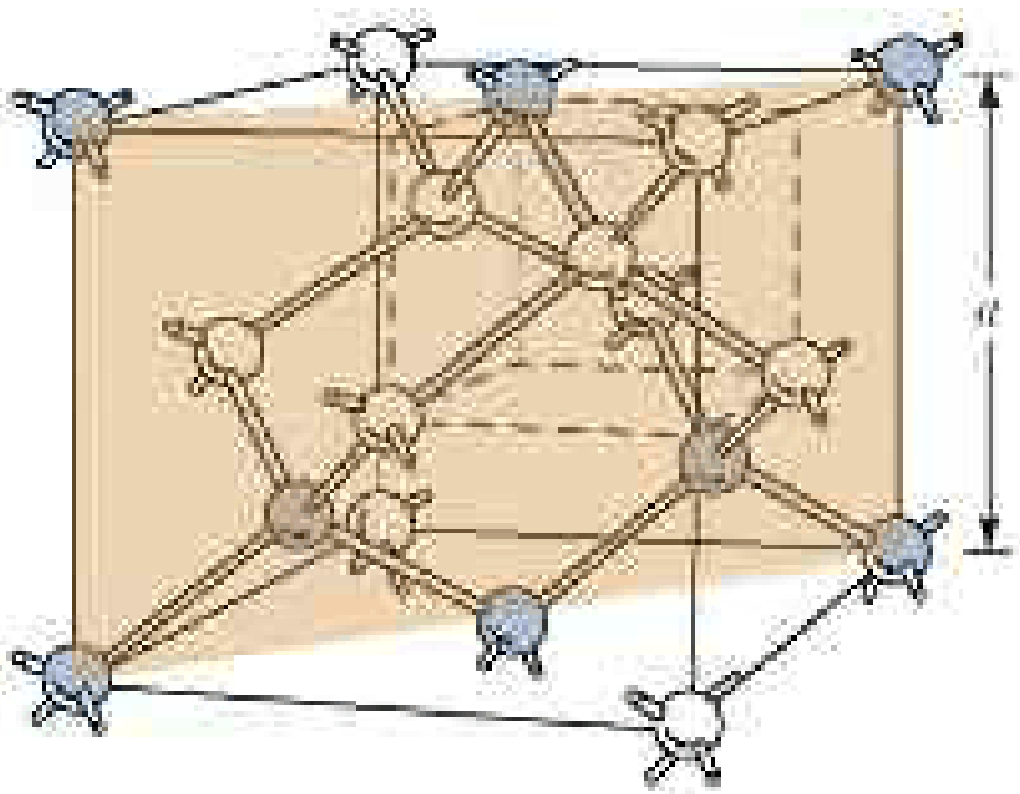
(b)计算硅中（**100**），（**110**），（**111**）三平面上每平方厘米的原子数。



- (1) 从(100)面上看，每个单胞侧面上有 $\frac{1}{4}\times 4+1=2$ 个原子
- 所以，每平方厘米的原子数= $\frac{2}{a^2}=\frac{2}{(5.43\times 10^{-8})^2}\approx 6.78\times 10^{14}$

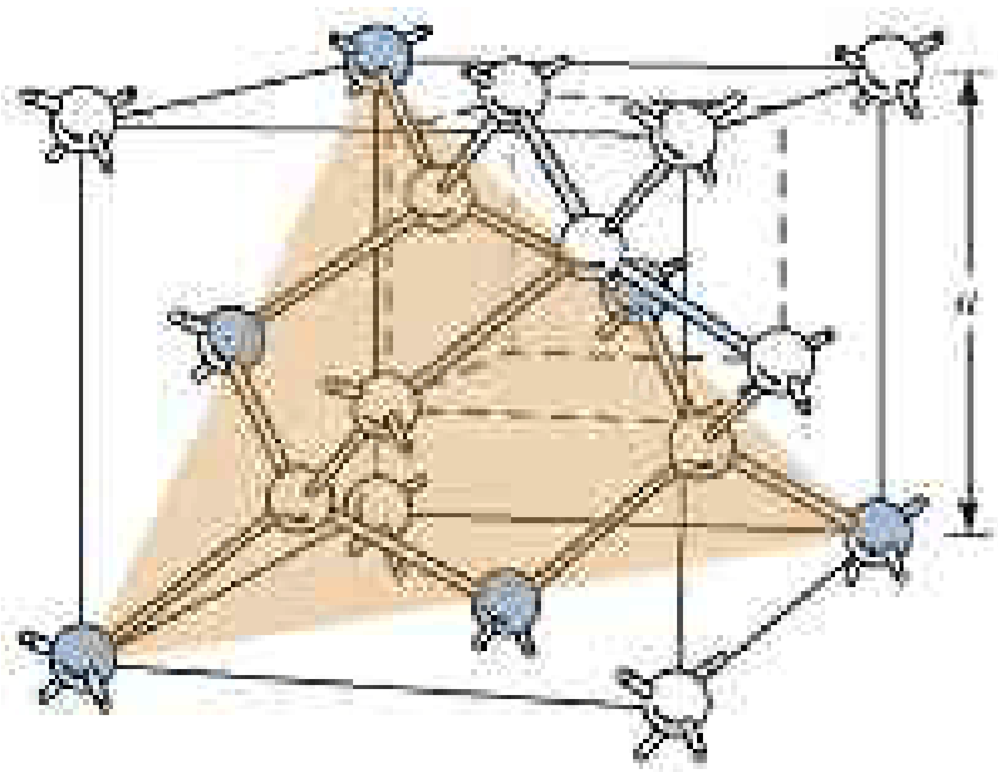


- (2) 从(110)面上看，每个面上有 $2+\frac{1}{2}\times 2+\frac{1}{4}\times 4=4$ 个原子
- 所以，每平方厘米中的原子数= $\frac{4}{\sqrt{2}a^2}=\frac{2\sqrt{2}}{(5.43\times 10^{-8})^2}\approx 9.6\times 10^{14}$

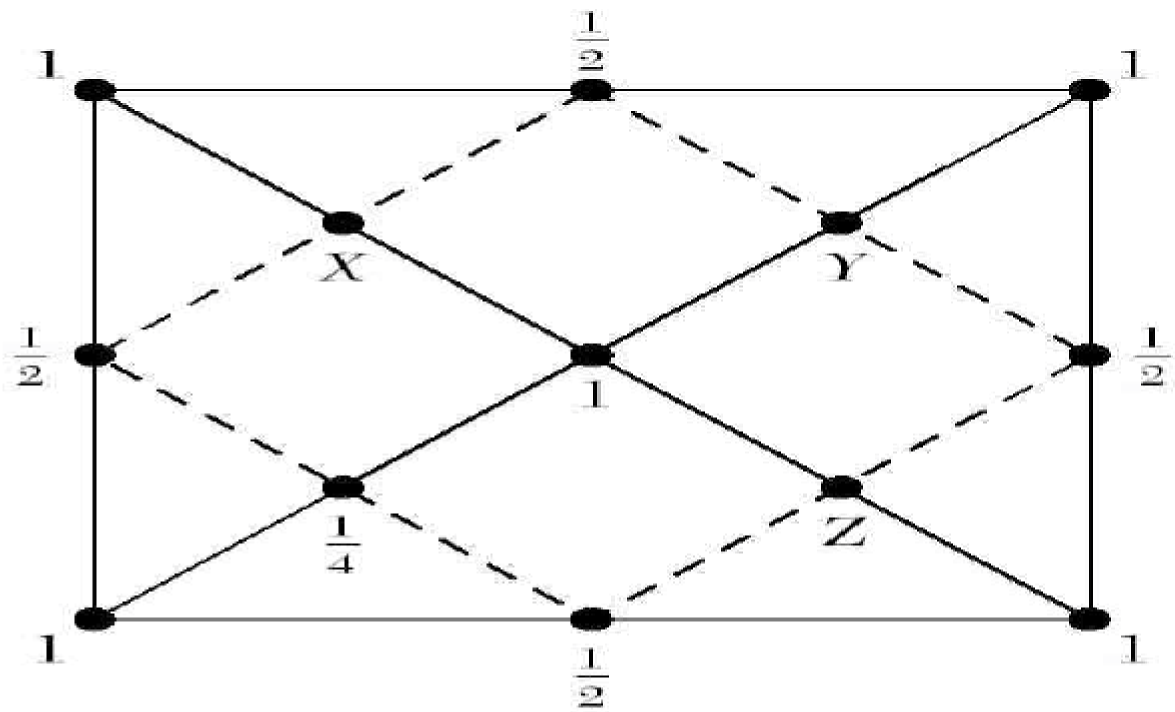


- (3) 从(111)面上看，每个面上有 $\frac{1}{6}\times 3+\frac{1}{2}\times 3=2$ 个原子
- 所以，每平方厘米的原子数=

$$\frac{2}{\frac{\sqrt{3}}{4}\cdot(\sqrt{2}a)^2}=\frac{4}{\sqrt{3}\times(5.43\times 10^{-8})^2}\approx 7.83\times 10^{14}$$



2. 假如我们将金刚石晶格中的原子投影到底部，原子的高度并以晶格常数为单位表示，如下图所示。找出图中三原子（X，Y，Z）的高度。



解：此正方形内部诸原子可视为是由一个顶点及其所在 三个邻面的面心原子沿体对角线平移1/4长度后，向底面投影所得。

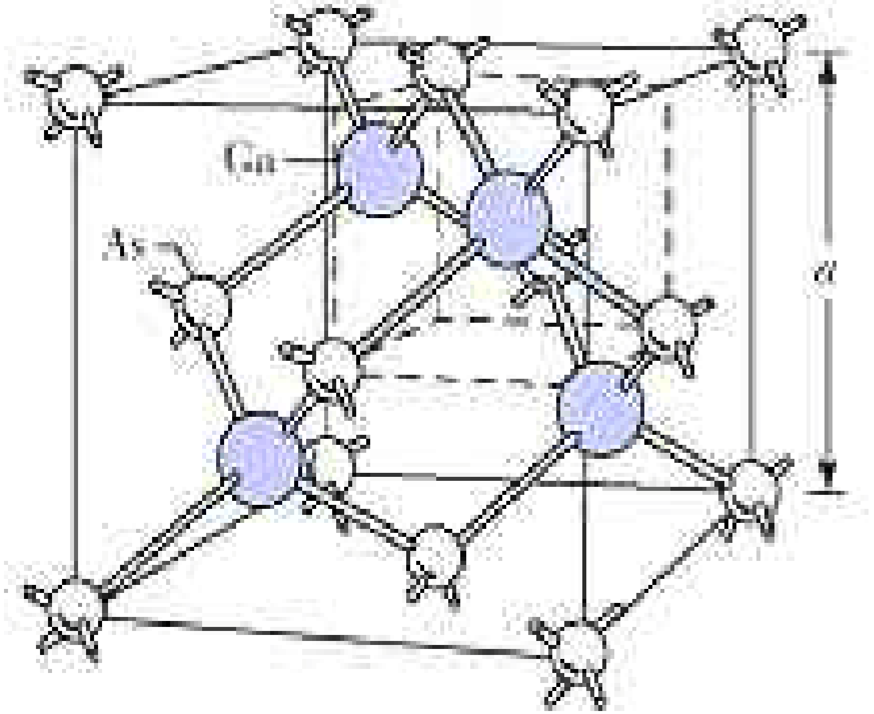
因此，x的高度为3/4

y的高度为1/4

z的高度为3/4

6. (a)计算砷化镓的密度（砷化镓的晶格常数为**5.65 Å**，且砷及镓的原子量分别为**69.72**及**74.92**克/摩尔）。

- 砷化镓为闪锌矿晶体结构



其中，每个单胞中有

$$\frac{1}{8}\times 8+\frac{1}{2}\times 6=4$$

个As原子，和4个Ga原子

所以，每立方厘米体积中的As和Ga原子数均为

$$\frac{4}{a^3}=\frac{4}{(5.65\times 10^{-8})^3}\approx 2.2\times 10^{22}cm^{-3}$$

密度 ＝每立方厘米中的原子数× 原子量/阿伏伽德罗常数

$$= 2.2 \times 10^{22} \times \frac{(69.72 + 74.92)}{6.02 \times 10^{23}} g/cm^3$$

$$= \frac{2.2 \times 144.64}{60.2} g/cm^3$$

$$\approx 5.29\, g/cm^3$$

(b)一砷化镓样品掺杂锡。假如锡替代了晶格中镓的位置，那么锡是施主还是受主? 为什么? 此半导体是n型还是p型?

- 答：因为镓为III族元素，最外层有3个电子；锡为IV族元素，最外层有4个电子，所以锡替换镓后作为施主提供电子，此时电子为多子，所以该半导体为n型。

12. 求出在300K时一非简并n型半导体导带中电子的动能。

解：在能量为dE范围内单位体积的电子数

N(E)F(E)dE,

而导带中每个电子的动能为$E-E_c$

所以导带中单位体积电子总动能为

$$\int_{Ec}^{+\infty}(E-Ec)N(E)F(E)dE$$

而导带单位体积总的电子数为

$$\int_{Ec}^{+\infty}N(E)F(E)dE$$

导带中电子平均动能：

$$\frac{\int_{Ec}^{+\infty}(E-Ec)N(E)F(E)dE}{\int_{Ec}^{+\infty}N(E)F(E)dE}$$

=3/2kT

14. 一半导体的本征温度为当本征载流子浓度等于杂质浓度时的温度。找出掺杂**10^{15}**磷原子/立方厘米的硅样品的本征温度。

- 解：根据题意有 $n_i = \sqrt{N_c N_v}\exp(-E_g/2kT)$, $N_D = 10^{15}cm^{-3}$

  本征温度时，$N_i=N_D$

  将$N_V \equiv 2(2\pi m_p kT/h^2)^{3/2}$和$N_C \equiv 12(2\pi m_n kT/h^2)^{3/2}$ 代入上式并化简，得

$$n_i = \left[24\times(m_p m_n)^{\frac{3}{2}}\times(\frac{2\pi kT}{h^2})^3\right]^{\frac{1}{2}}\times\exp(\frac{-E_g}{2kT})$$

为一超越方程，可以查图2.22得到近似解

对应 $n_i = 10^{15} cm^{-3}$

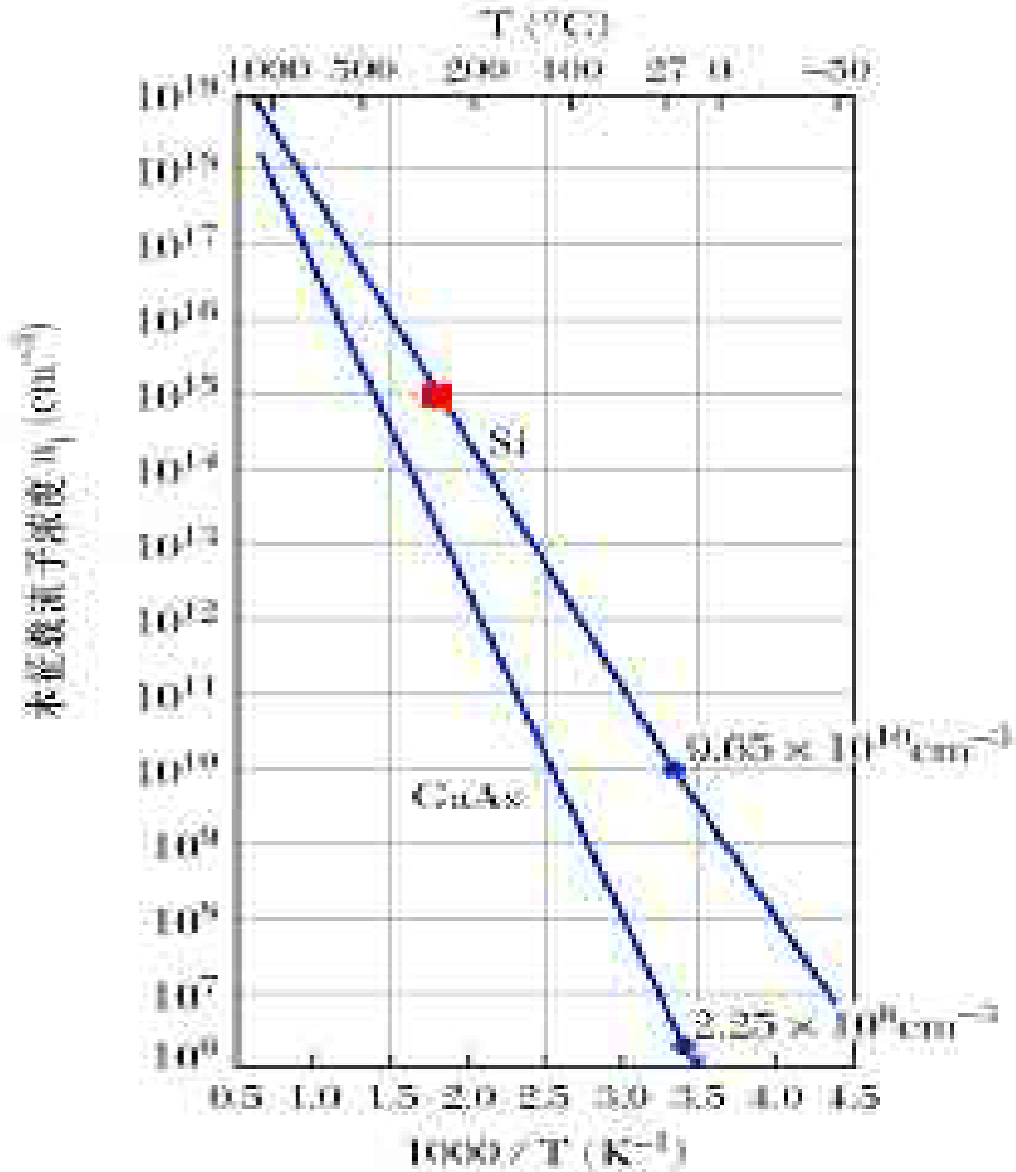
的点在1.8左右，即

$$\frac{1000}{T} \approx 1.8$$

$$\therefore T \approx 556\,K$$

将T=556K代入原式验证得，

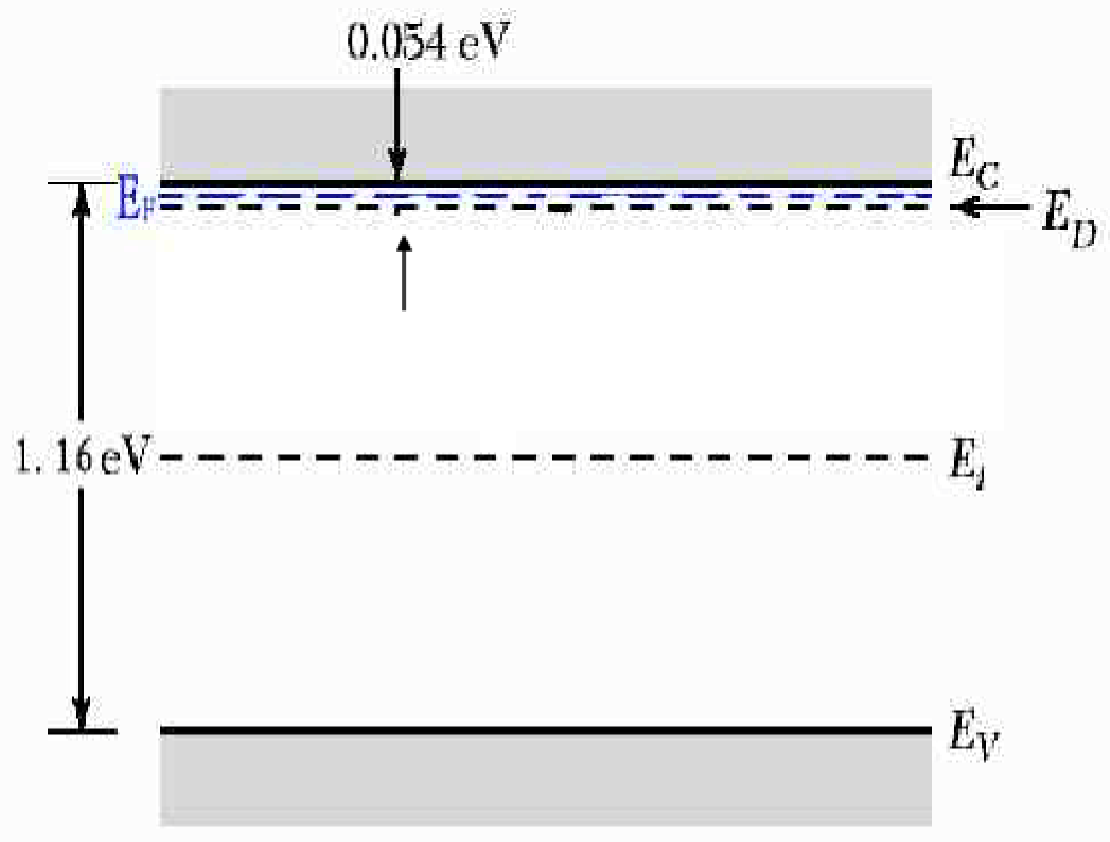
N_i=1.1X10^{15}，基本符合



16. 画出在77K，300K，及600K时掺杂10^{16} 砷原子/立方厘米的硅的简化能带图。标示出费米能级且使用本征费米能级作为参考能量。

- (1) 低温情况（77K）

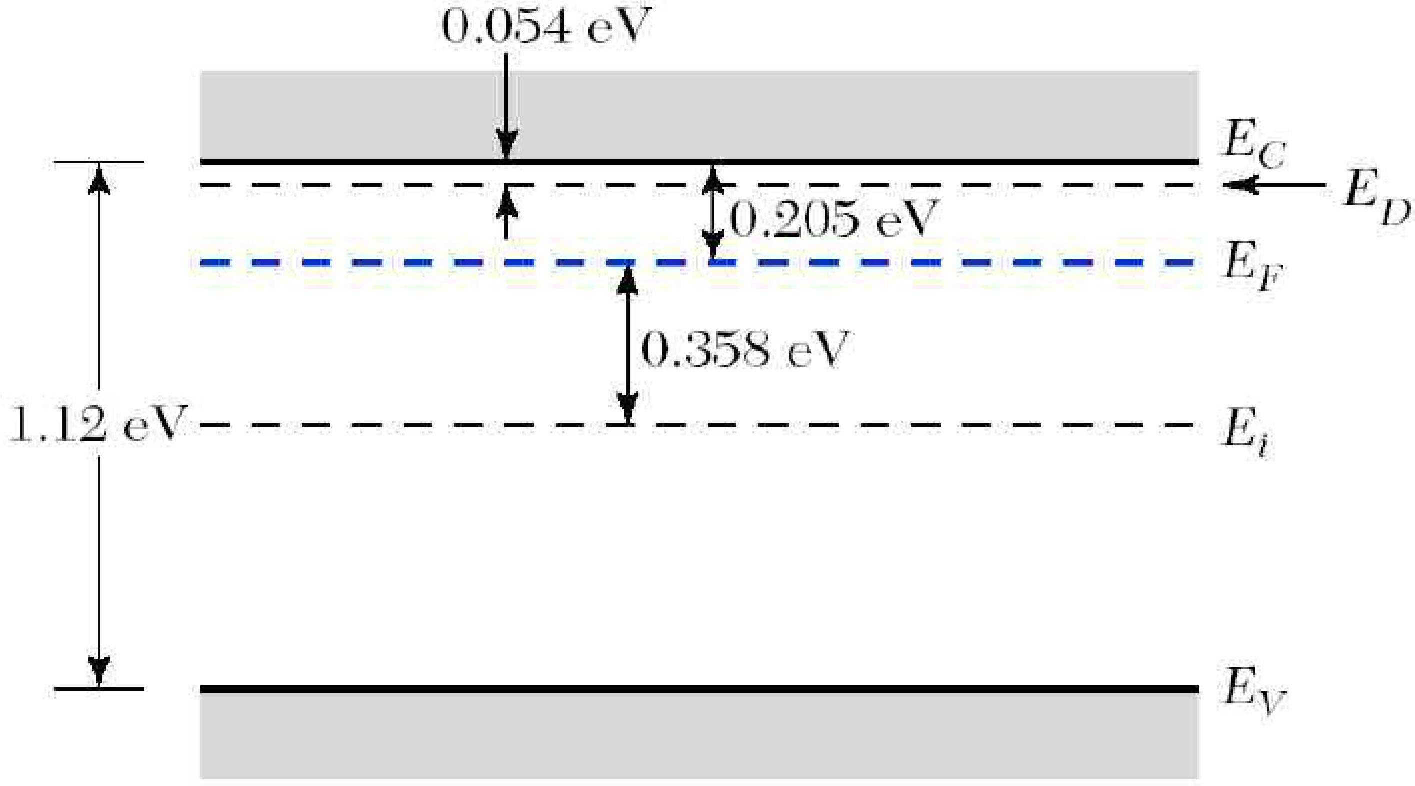
由于低温时，热能不足以电离施主杂质，大部分电子仍留在施主能级，从而使费米能级很接近施主能级，并且在施主能级之上。（此时，本征载流子浓度远小于施主浓度）



$$E_F = \frac{E_C + E_D}{2} + \frac{kT}{2}\ln\frac{N_D}{2N_C} = 0.027 - 0.022 = 0.005\,eV$$

- (2) 常温情况（T=300K）

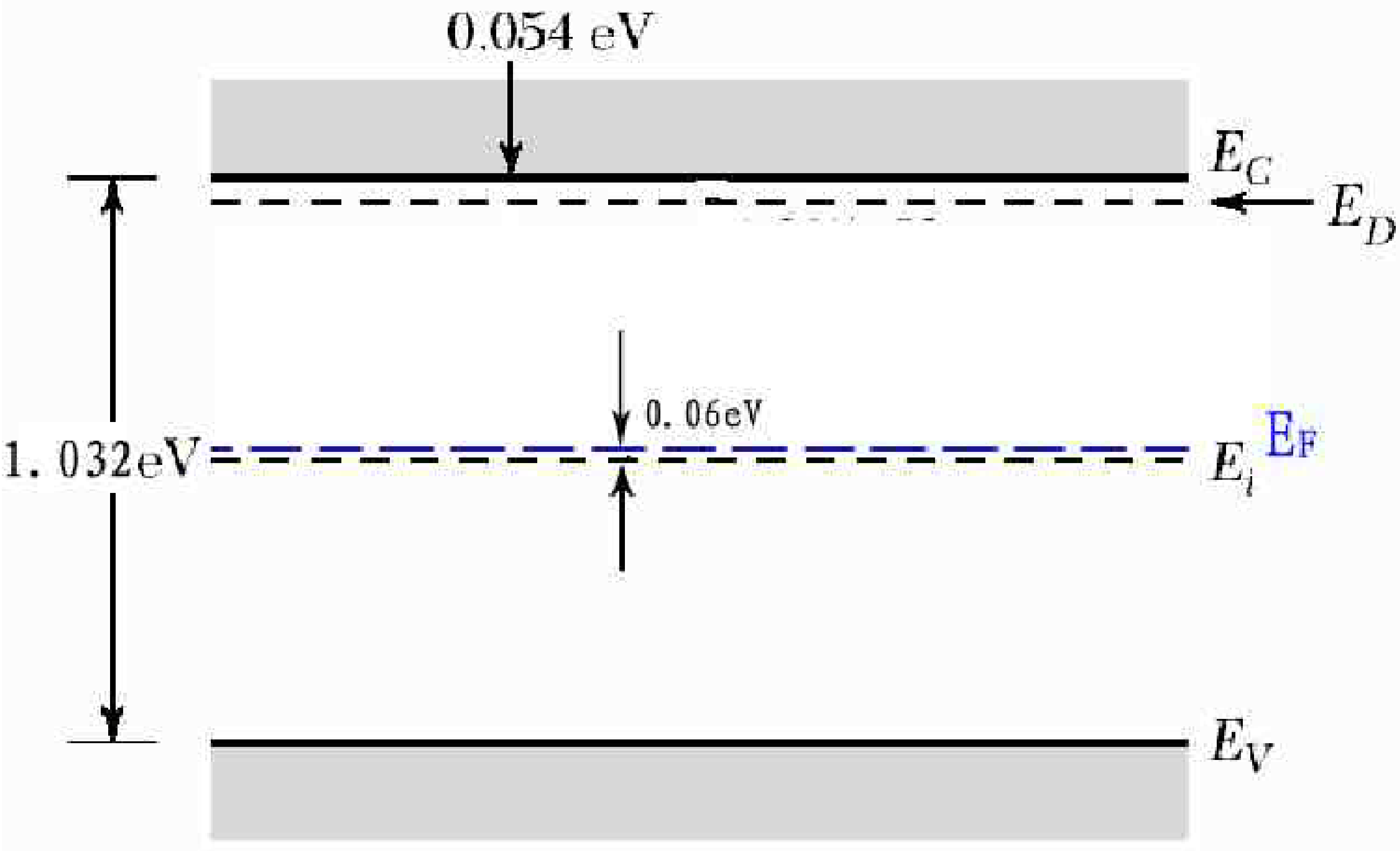
$$E_C - E_F = kT\ln(n/n_i) = 0.0259\ln(N_D/n_i) = 0.205\ \text{eV}$$



- (3) 高温情况（T=600K）

根据图2.22可看出n_i=3X10^{15} cm^{-3}，已接近施主浓度

$$E_F - E_i = kT\ln(n/n_i) = 0.0518\ln(N_D/n_i)$$
$$= 0.0518\ln 3.3 = 0.06\text{eV}$$



20. 对一掺杂**10^{16} cm^{-3}**磷施主原子，且施主能级$\boldsymbol{E_D}$**= 0.045 eV**的$\boldsymbol{n}$型硅样品而言，找出在**77K**时中性施主浓度对电离施主浓度的比例；此时费米能级低于导带底部**0.0459eV**（电离施主的表示式可见问题**19**）。

题19公式： $n = N_D[1 - F(E_D)] = \dfrac{N_D}{1 + e^{(E_F - E_D)/kT}}$

$$n_{电离} = \frac{N_D}{1+\exp(\frac{E_F - E_D}{kT})} = \frac{10^{16}}{1+\exp\frac{[(E_C - 0.0459)-(E_C - 0.045)]\times 1.6\times 10^{-19}}{1.38\times 10^{-23}\times 77}} \approx 5.34\times 10^{5}\,cm^{-3}$$

$$\frac{n_{中性}}{n_{电离}} = \frac{(1-0.534)\times 10^{16}}{0.534\times 10^{16}} \approx 0.873$$

第三章

载流子输运现象

2. 假定在T = 300 K，硅晶中的电子迁移率为μ_n = 1300 $cm^2/V\cdot s$，再假定迁移率主要受限于晶格散射，求在(a) T = 200 K，及(b) T = 400 K时的电子迁移率。

- 有同学根据T = 300 K， μ_n = 1300 cm2/V·s，查表3-2，得$N_D=10^{16}cm^{-3}$，再进行查图2.2得μ_n ----*不好*

- 其实可以利用μ_L与$T^{-3/2}$ 的比例关系（书49页）。理论分析显示晶格散射所造成的迁移率μ_L 将随 $T^{-3/2}$ 的方式减少。由杂质散射所造成的迁移率μ_I 理论上可视为随着 $T^{3/2}/N_T$ 而变化，其中N_T为总杂质浓度[2]。

- 解：

$$(\mu_n : T^{-3/2}) = (\mu_a : T_a^{-3/2})$$

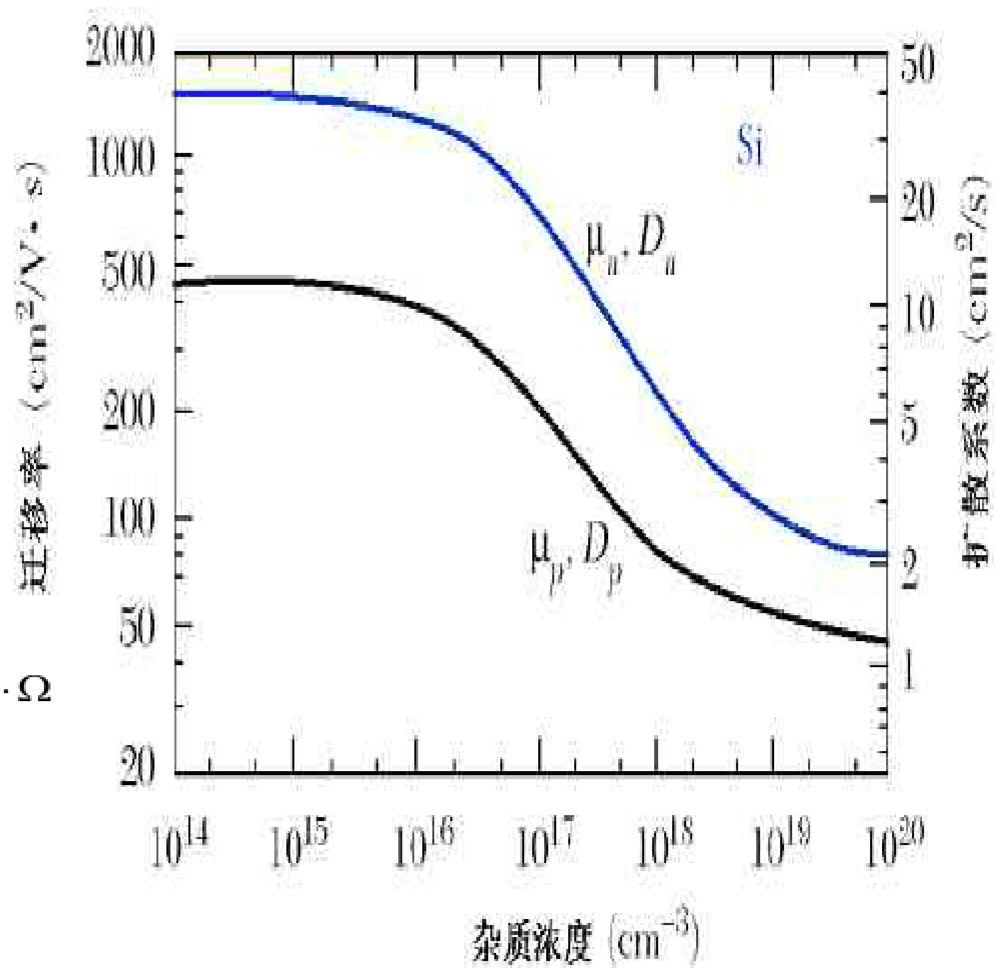
4. 对于以下每一个杂质浓度，求在300 K时硅晶样品的电子及空穴浓度、迁移率及电阻率：(a) 5×10^{15}硼原子/cm^3

- (a)300K时，杂质几乎完全电离:

$$p \approx N_A = 5\times10^{15}cm^{-3}$$

$$\therefore n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{(9.65\times10^9)^2}{5\times10^{15}} \approx 1.86\times10^4 cm^{-3}$$

$$\rho \approx \frac{1}{qp\mu_p} = \frac{1}{1.6\times10^{-19}\times5\times10^{15}\times450} \approx 2.78 cm\cdot\Omega$$



- 注意：双对数坐标！
- 注意：如何查图？N_T？

(b) 2×10¹⁶硼原子/cm³及1.5×10¹⁶砷原子/cm³

$$p \approx N_A - N_D = 2\times10^{16} - 1.5\times10^{16} = 5\times10^{15}\,cm^{-3}$$

$$\therefore n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{(9.65\times10^{9})^2}{5\times10^{15}} \approx 1.86\times10^{4}\,cm^{-3}$$

$$\rho \approx \frac{1}{qp\mu_p} = \frac{1}{1.6\times10^{-19}\times5\times10^{15}\times\underline{350}} \approx 3.57\,cm\cdot\Omega$$

(c) 5×10^{15}硼原子/cm^3、10^{17}砷原子/cm3及10^{17}镓原子/cm^3

$$p \approx N_A - N_D = 5\times10^{15} + 10^{17} - 10^{17} = 5\times10^{15}\,cm^{-3}$$

$$\therefore n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{(9.65\times10^{9})^2}{5\times10^{15}} \approx 1.86\times10^{4}\,cm^{-3}$$

$$\rho \approx \frac{1}{qp\mu_p} = \frac{1}{1.6\times10^{-19}\times5\times10^{15}\times\underline{150}} \approx 8.33\,cm\cdot\Omega$$

8. 给定一个未知掺杂的硅晶样品，霍耳测量提供了以下的信息：**W = 0.05 cm**，**A = 1.6×10^{-3} cm^2**（参考图**8**），**I = 2.5 mA**，且磁场为**30T**（**1**特斯拉（**T**）= **10^{-4} Wb/cm^2**）。若测量出的霍耳电压为 **+10 mV**，求半导体样品的霍耳系数、导体型态、多数载流子浓度、电阻率及迁移率。

- 因为霍耳电压为正的，所以该样品为p型半导体(空穴导电)
- 多子浓度：

$$p=\frac{IB_ZW}{qV_HA}=\frac{2.5\times10^{-3}\times30\times10^{-4}\times0.05}{1.6\times10^{-19}\times10\times10^{-3}\times1.6\times10^{-3}}\approx1.46\times10^{17}cm^{-3}$$

- 霍耳系数：

$$R_H=\frac{1}{qp}=\frac{1}{1.6\times10^{-19}\times1.46\times10^{17}}\approx42.8cm^3/C$$

- 电阻率：（假设只有一种掺杂）

$$\rho\approx\frac{1}{qp\mu_p}=\frac{1}{1.6\times10^{-19}\times1.46\times10^{17}\times\underline{200}}\approx0.212\,cm\cdot\Omega$$

9. 一个半导体掺杂了浓度为N_D（$N_D >> n_i$）的杂质，且具有一电阻R1。同一个半导体之后又掺杂了一个未知量的受主N_A（$N_A>>N_D$），而产生了一个0.5 R1的电阻。若Dn/Dp = 50，求N_A并以N_D表示之。

第一次为n型，$\rho_n \approx \dfrac{1}{qp\mu_n} \approx \dfrac{1}{qN_D\mu_n}$ 第二次为p型， $\rho_p \approx \dfrac{1}{qp\mu_p} \approx \dfrac{1}{qN_A\mu_p}$

根据题意，有 $\dfrac{\rho_n}{\rho_p} = \dfrac{R_1}{0.5R_1} = 2$

又根据爱因斯坦关系 $D_p = \dfrac{kT}{q}\mu_p$ 和 $D_n = \dfrac{kT}{q}\mu_n$ 得

$$\frac{\mu_n}{\mu_p} = \frac{D_n}{D_p} = 50$$

用ρ_n和ρ_p相除，最后得 $N_A=100N_D$

11. 一个本征硅晶样品从一端掺杂了施主，而使得$N_D = N_o\exp(-ax)$。(a)在$N_D >> n_i$的范围中，求在平衡状态下内建电场E(x)的表示法。(b)计算出当$a = 1\mu m^{-1}$时的E(x)

(a) $$J_{n扩散}(x) = qD_n \frac{dn}{dx} = (-a)\cdot qD_n N_0 \exp(-ax)$$

因为热平衡时，样品内部没有载流子的净流动，所以有

$$J_{n漂移} + J_{n扩散} = J_n = 0$$

根据欧姆定律的微分形式 $J_{n漂移} = \sigma \cdot E(x)$

$$E = -\frac{J_{n扩散}(x)}{\sigma} = -\frac{(-a)\cdot q}{\sigma} D_n N_0 \exp(-ax)$$

$$= \frac{a \cdot q}{\sigma} \frac{kT}{q} \mu_n N_0 \exp(-ax)$$

$$= \frac{a \cdot kT \mu_n N_0 \exp(-ax)}{\sigma}$$

$$= \frac{a \cdot kT \mu_n N_D}{q \mu_n N_D}$$

$$= \frac{a \cdot kT}{q}$$

注，可用题十中的公式：

E$(x) = -\left(\frac{kT}{q}\right) \frac{1}{N_D(x)} \frac{dN_D(x)}{dx}$

(b) $$E(x) = \frac{a \cdot kT}{q} \approx 1 \times 10^6 \times 0.026 = 260 V / cm$$

12. 一个厚度为**L**的**n**型硅晶薄片被不均匀地掺杂了施主磷，其中浓度分布给定为$\mathbf{N_D(x) = N_o + (N_L - N_o)(x/L)}$。当样品在热平衡状态下且不计迁移率及扩散系数随位置的变化，前后表面间电势能差异的公式为何？对一个固定的扩散系数及迁移率，在距前表面**x**的平面上的平衡电场为何？

$$J_{n扩散} = qD_n \frac{dn}{dx} = qD_n \frac{(N_L - N_D)}{L}$$

$$E(x) = -\frac{J_{n扩散}}{\sigma} = -\frac{q}{qN_D\mu_n}\frac{kT}{q}\mu_n\frac{(N_L - N_D)}{L}$$

$$= -\frac{kT(N_L - N_D)}{qL}\cdot\frac{1}{N_0 + (N_L - N_D)(x/L)}$$

（注：这里也可直接利用题十的公式）

电势差：

$$\Delta U = -\int_0^L E(x)dx$$

$$= \frac{kT(N_L - N_D)}{qL} \cdot \int_0^L \frac{1}{N_0 + (N_L - N_D)(x/L)} dx$$

$$= \frac{kT}{q} \ln \frac{N_L}{N_0}$$

电势能差：

$$\Delta\Phi = -q \cdot \Delta U = -kT \ln \frac{N_L}{N_0} = kT \ln \frac{N_0}{N_L}$$

14. 一n型硅晶样品具有2×10^{16}砷原子/cm^3，2×10^{15}/cm^3的本体复合中心，及10^{10}/cm^2的表面复合中心。(a)求在小注入情况下的本体少数载流子寿命、扩散长度及表面复合速度。σ_p及σ_s的值分别为5×10^{-15}及2×10^{-16} cm^2。(b)若样品照光，且均匀地吸收光线，而产生10^{17}电子-空穴对/$cm^2\cdot s$，则表面的空穴浓度为多少？

- (a) 热平衡时 $n_o \approx N_D = 2\times10^{16}cm^{-3}, p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{(9.65\times10^9)^2}{2\times10^{16}} \approx 4.7\times10^3 cm^{-3}$

从书上公式（50），推导

$$U \approx v_{th}\sigma_o N_t \frac{p_n - p_{no}}{1+\left(\frac{2n_i}{n_{no}}\right)\cosh\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right)} = \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p}$$

$$\tau_p = \frac{1+\left(\frac{2n_i}{n_{no}}\right)\cosh\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right)}{v_{th}\sigma_o N_t} \quad (n_{no}>>n_i)$$

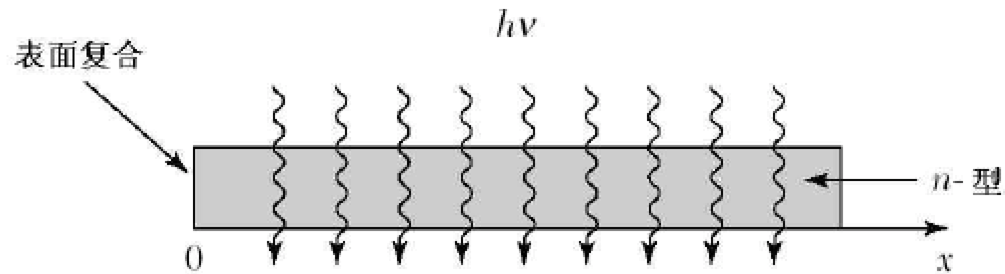
$$\approx \frac{1}{v_{th}\sigma_p N_t}$$

$$= \frac{1}{10^7\times5\times10^{-15}\times2\times10^{15}}$$

$$= 10\,ns$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{\frac{kT}{q}\mu_p \cdot \tau_p} = \sqrt{0.026 \times 400 \times 10^{-8}} \approx 3.22 \times 10^{-4}\, cm$$

$$S_{lr} \equiv v_{th}\sigma_p N_{st} = 10^7 \times 2 \times 10^{-16} \times 10^{10} = 20\, cm/s$$

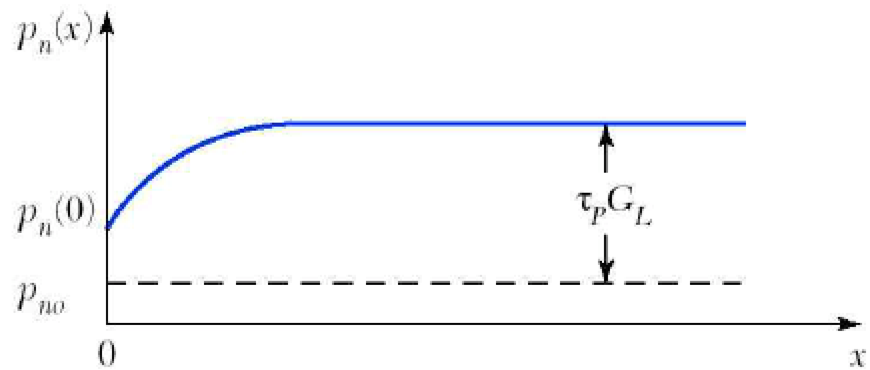


(b)

$$p_n(x) = p_{no} + \tau_p G_L \left(1 - \frac{\tau_p S_{lr} e^{-x/L_p}}{L_p + \tau_p S_{lr}}\right)$$

在表面，令x=0，则有

$$p_n(x) = p_{no} + \tau_p G_L \left(1 - \frac{\tau_p S_{lr}}{L_p + \tau_p S_{lr}}\right)$$



$$= 4.7 \times 10^3 + 10 \times 10^{-9} \times 10^{17} \times \left(1 - \frac{10 \times 10^{-9} \times 20}{3.22 \times 10^{-4} + 10 \times 10^{-9} \times 20}\right)$$

$$\approx 4.7 \times 10^3 + 10^9$$

$$\approx 10^9$$

16.一半导体中的总电流不变，且为电子漂移电流及空穴扩散电流所组成。电子浓度不变，且等于**10^{16} cm-3**。空穴浓度为：$p(x) = 10^{15} \exp\left(-x/L\right)\ \mathrm{cm}^{-3}$ **$(x \geq 0)$**
其中**$L = 12\ \mu m$**。空穴扩散系数**$D_p = 12\ cm^2/s$**，电子迁移率**$\mu_n = 1000\ cm^2/V\cdot s$**。总电流密度**$J=4.8 A/cm^2$.**

计算：**(a)**空穴扩散电流密度对**x**的变化情形，

(b)电子电流密度对**x**的变化情形，及

(c)电场对**x**的变化情形。

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$J_p = 1.6e^{-\frac{x}{12\times10^{-4}}} A / cm^2$$

$$J_{total} = J_{n\_drift} + J_{p\_diffusion}$$

$$J_{n\_drift} = 4.8 - 1.6e^{-\frac{x}{12\times10^{-4}}} A / cm^2$$

$$J_{n\_diffusion} = q\mu_n nE$$

$$E = 3\text{-}e^{-\frac{x}{12\times10^{-4}}} (V / cm)$$

P59

18. 在习题**17**中，若载流子寿命为**50 μs**，且**W = 0.1 mm**，计算扩散到达另一表面的注入电流的比例（**D = 50 cm²/s**）。

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = 0 = D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} \qquad E = 0; G = 0$$

$$p_n(x) - p_{n0} = C_1 e^{x/L_p} + C_2 e^{-x/L_p}$$

$$p_n(x = 0) = p_n(0);\ p_n(x = W) = p_{n0}$$

$$p_n(x) = p_{no} + [p_n(0) - p_{no}] \left[\frac{\sinh\left(\dfrac{W - x}{L_p}\right)}{\sinh(W / L_p)} \right]$$

$$J_p(0) = -qD_p \frac{dp}{dx}\Big|_{x=0} = q[p_n(0) - p_{n0}]\frac{D_p}{L_p}\frac{\cosh(\dfrac{W}{L_p})}{\sinh(W/L_p)}$$

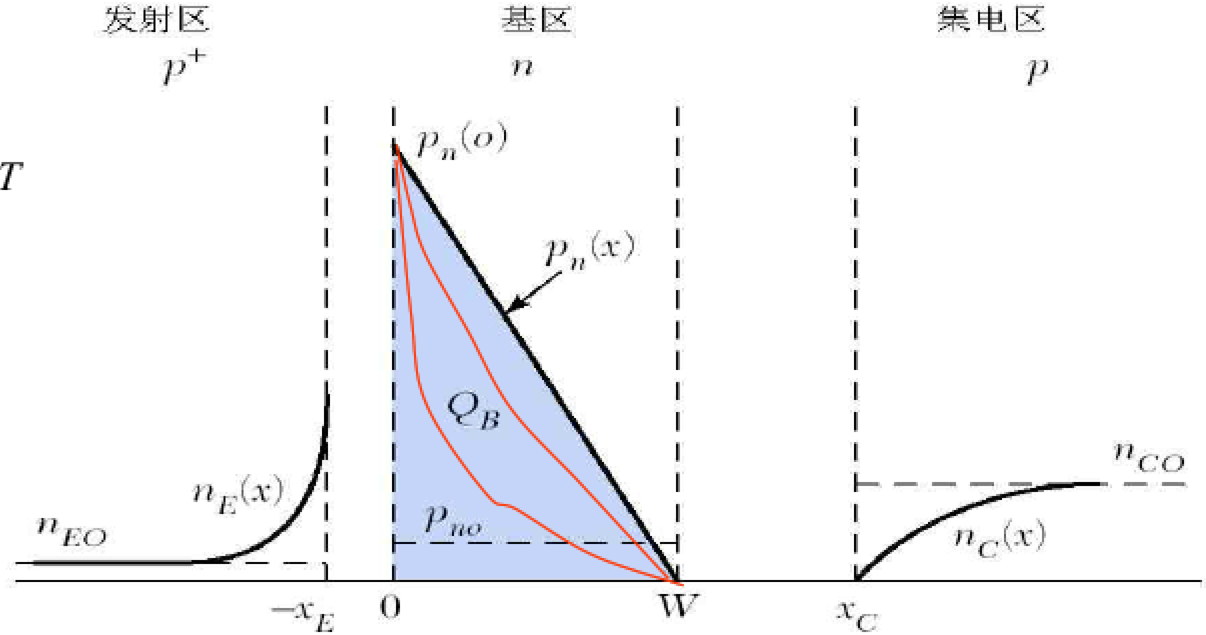
$$J_p(W) = -qD_p \frac{dp}{dx}\Big|_{x=W} = q[p_n(0) - p_{n0}]\frac{D_p}{L_p}\frac{1}{\sinh(W/L_p)}$$

$$\alpha = \frac{J_p(W)}{J_p(0)} = \frac{1}{\cosh(\dfrac{W}{L_p})} = \frac{2}{e^{\frac{W}{L}} + e^{-\frac{W}{L}}} = \frac{2}{4160} = 0.048\,\%$$

W>>L$_p$，电流几乎为零

$$p_n(0) = p_{no}\, e^{qV_{EB}/kT}$$

$$p_n(W) = 0$$



$$p_n(x) = p_{no}\,(e^{qV_{EB}/kT} - 1)\left[\frac{\sinh\left(\dfrac{W-x}{L_p}\right)}{\sinh\left(\dfrac{W}{L_p}\right)}\right] + p_{no}\left[1 - \frac{\sinh\left(\dfrac{x}{L_p}\right)}{\sinh\left(\dfrac{W}{L_p}\right)}\right]$$

$$p_n(x) = p_{no}\, e^{qV_{EB}/kT}\left(1 - \frac{x}{W}\right) = p_n(0)\left(1 - \frac{x}{W}\right) \quad W << L_p$$

$$p_n(x=0) = p_{no} e^{qV/kT}$$

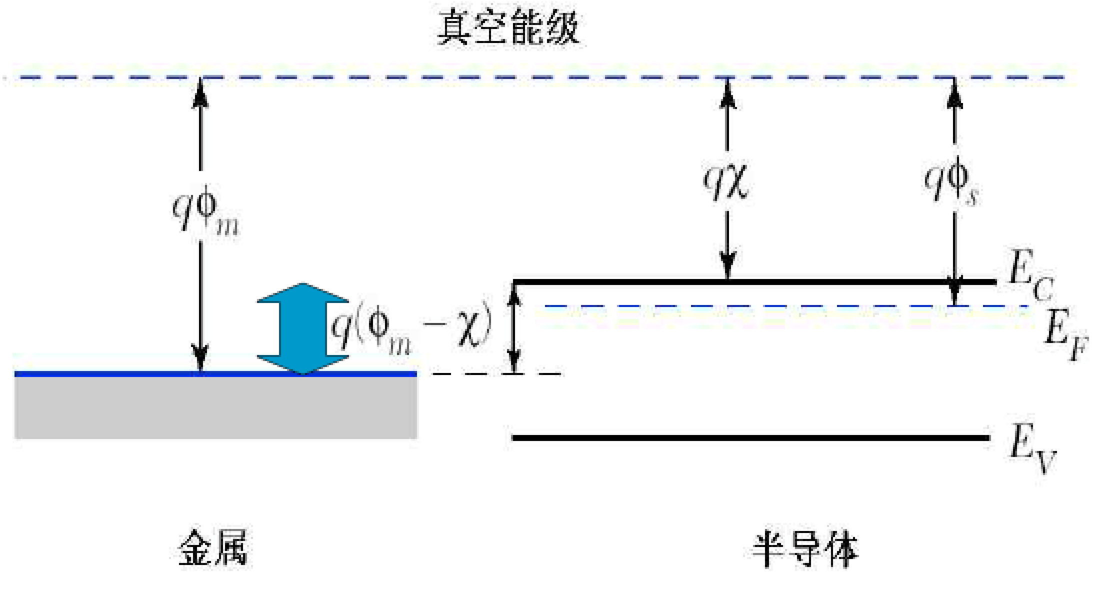
p104

$$p_n(x=\infty) = p_{n0}$$

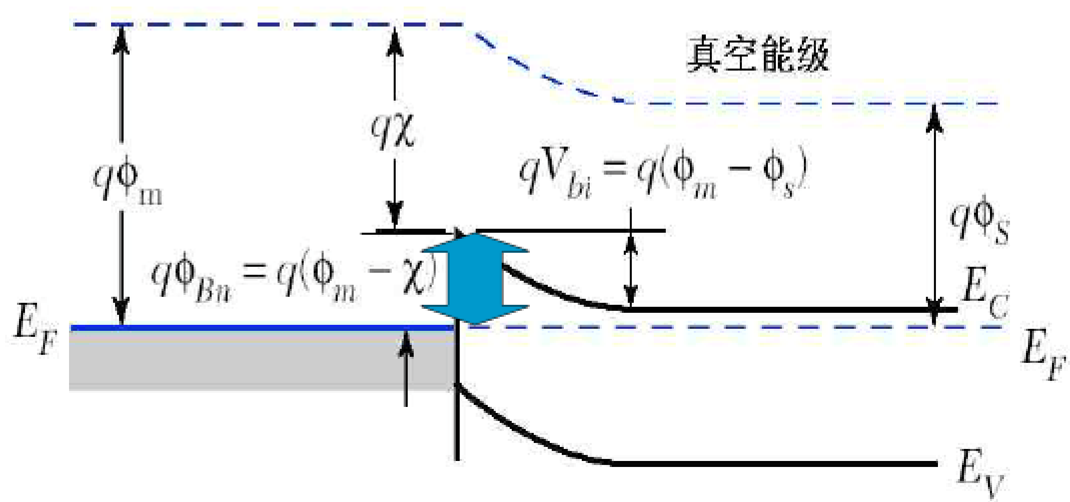
$$p_n - p_{no} = p_{no}\left(e^{qV/kT} - 1\right) e^{-(x-x_n)/L_p}$$

$$J_p(x_n) = -qD_p \left.\frac{dp_n}{dx}\right|_{x_n} = \frac{qD_p p_{no}}{L_p}\left(e^{qV/kT} - 1\right)$$

- **20.** 一个金属功函数ϕ_m = **4.2 V**，淀积在一个电子亲和力χ**= 4.0 V**，且**Eg = 1.12 eV**的**n**型硅晶上。当金属中的电子移入半导体时，所看到的势垒高为多少？



(a)



(b)

25. 假定硅中的一个传导电子($\mu_n = 1350\ cm^2/V\cdot s$)具有热能kT，并与其平均热速度相关，其中$E_{th} = m_0 v_{th}^2/2$。这个电子被置于100 V/cm的电场中。证明在此情况下，相对于其热速度，电子的漂移速度是很小的。若电场改为10^4 V/cm，使用相同的μ_n值，试再重做一次。最后请解说在此较高的电场下真实的迁移率效应。

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

$$v_n = \mu E = 1350 \times 100 = 1.35 \times 10^5 cm / s$$

$$v'_n = \mu E = 1350 \times 10^4 = 1.35 \times 10^7 cm / s$$

$$\mu = \frac{q \tau_c}{m_n}$$

P79 强电场下自由时间不是常数

$$v = v_{th} + v_{drift}$$

$$= v_{th} + \frac{q \tau_c}{m_n} E$$

电场小时，漂移速度线性增大；
强电场下，载流子漂移速度与热运动速度相当，趋于饱和

第四章

PN 结

1. 一扩散的***pn*** 硅结在 ***p-***为线性缓变结，其***a*** **=** $\mathbf{10^{19}\ cm^{-4}}$，而 ***n***侧为均匀掺杂，浓度为 $\mathbf{3\times10^{14}\ cm^{-3}}$ 。如果在零偏压时， ***p***侧耗尽层宽度为**0.8**μ**m** ，找出在零偏压时的总耗尽层宽度，内建电势和最大电场

总耗尽区宽度：

利用耗尽区总电荷电中性条件，求得Xp与Xn

则 W = Xp + Xn

求V_{bi} 与E_{max}，一般采用泊松方程求解电场和电势差

或者特别的,求Vbi时，

Vbi=Vn-Vp=(kT/q)ln(ND/ni)+(kT/q)ln(aw/ni)

即利用热平衡时，费米能级统一和

$$p = n_i \exp[(E_i - E_F)/kT]$$

$$n = n_i \exp[(E_F - E_i)/kT]$$

但在缓变结的中性区掺杂浓度并非恒量，结果稍有近似.

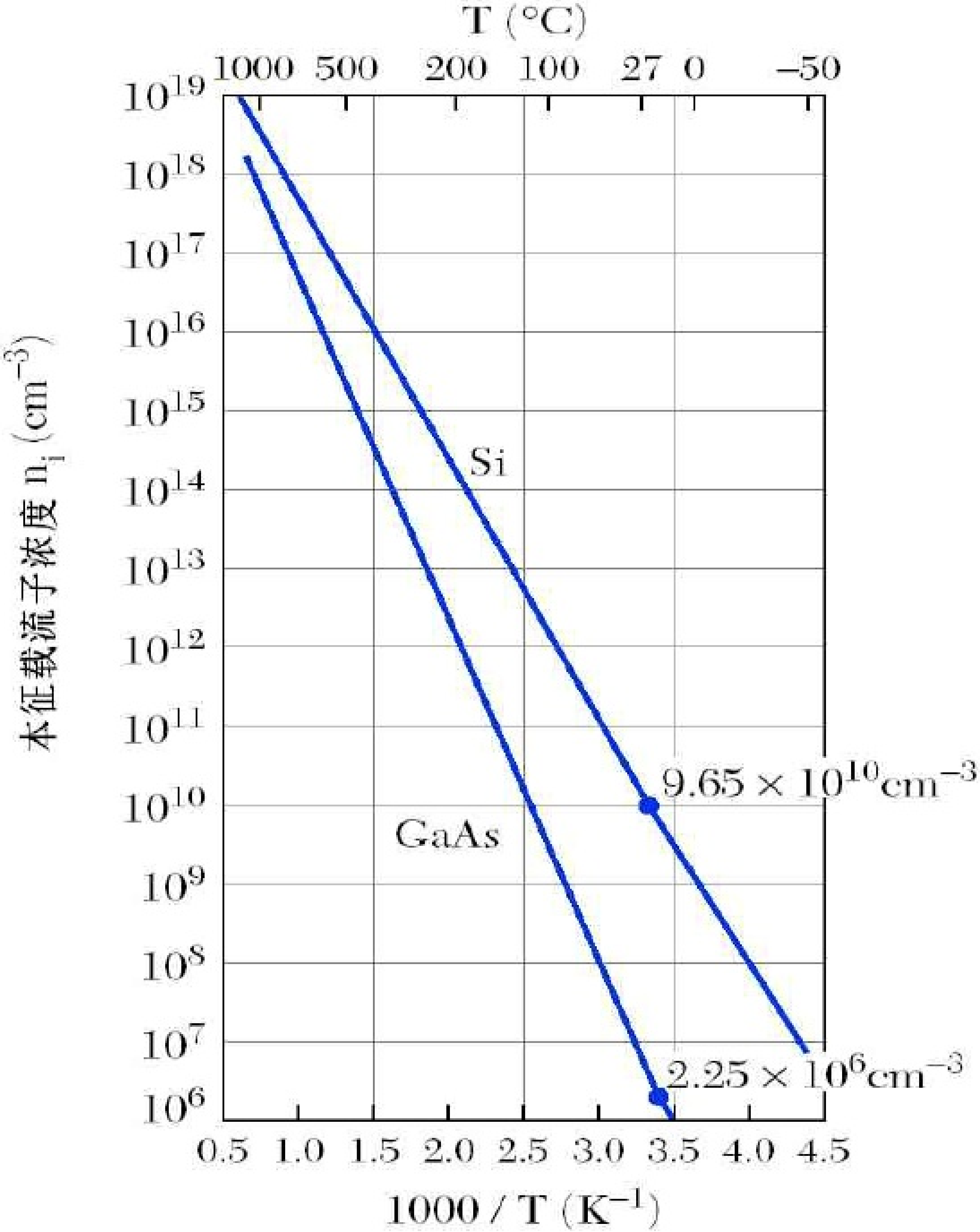
3. 对于一理想 **p-n** 突变结，其 $N_A = 10^{17}\ cm^{-3}$，$N_D = 10^{15}\ cm^{-3}$， **(a)** 计算在**250**， **300**，**350**，**400**，**450** 和 **500K** 时的 V_{bi}；并画出 V_{bi} 和 **T** 的关系。 **(b)**用能带图来评论所求得的结果。**(c)** 找出**T = 300 K**耗尽区宽度和在零偏压时最大电场。

$$V_{bi} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

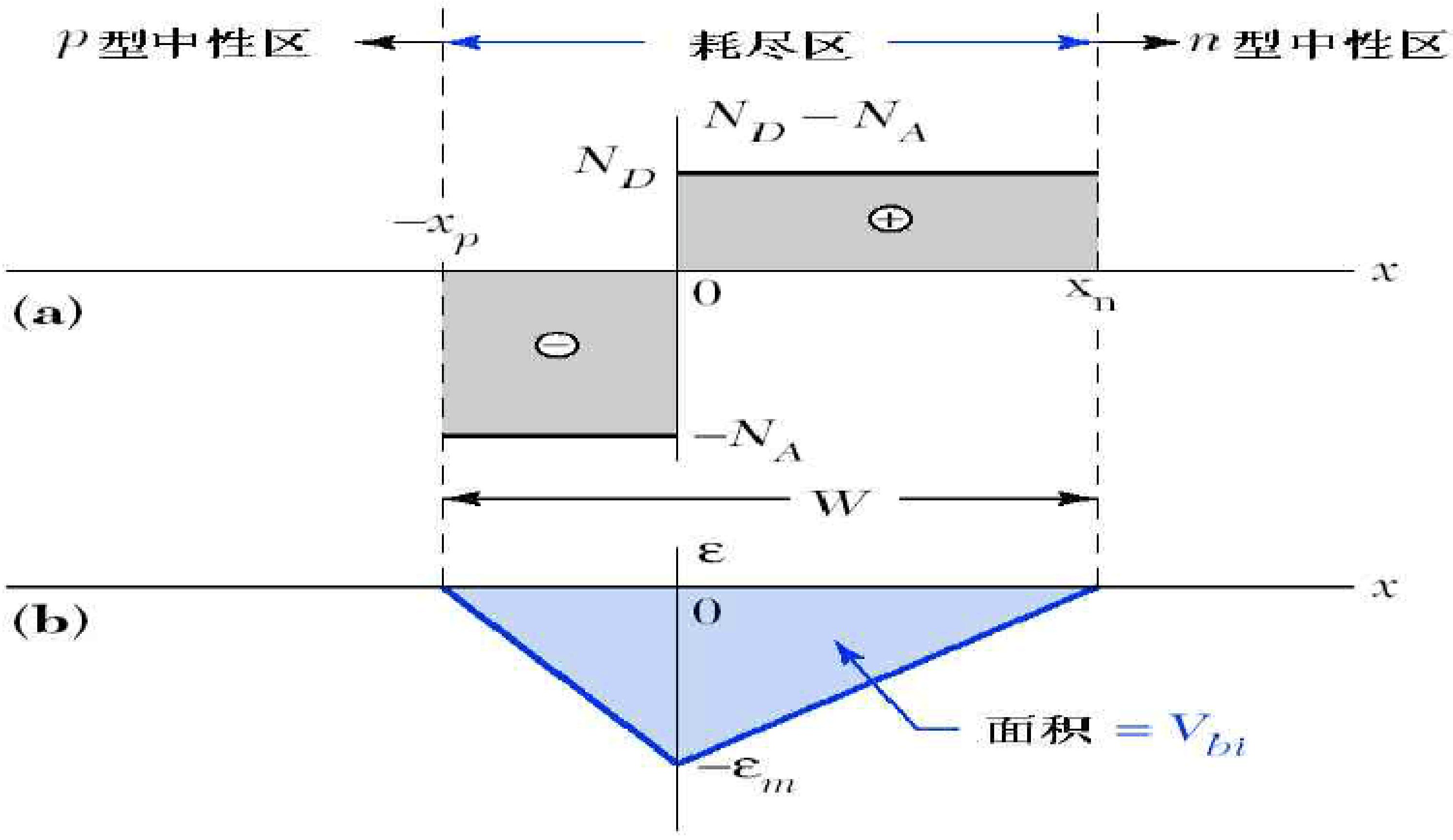
温度升高，两侧费米能级更接近禁带中央，则$\mathbf{V_{bi}}$变小

$$E_m = \frac{qN_B W}{\varepsilon_s}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\left(V_{bi} - V\right)}{qN_B}}$$



4. 决定符合下列**p-n** 硅结规格的 **n-**型掺杂浓度：
$Na=10^{18}$ cm^{-3}，且在 **$V_R=30$ V**，**T=300 K**，**$E_{max}=4\times10^5$ V/cm**



$$V = \frac{1}{2}\mathrm{E}_m W$$

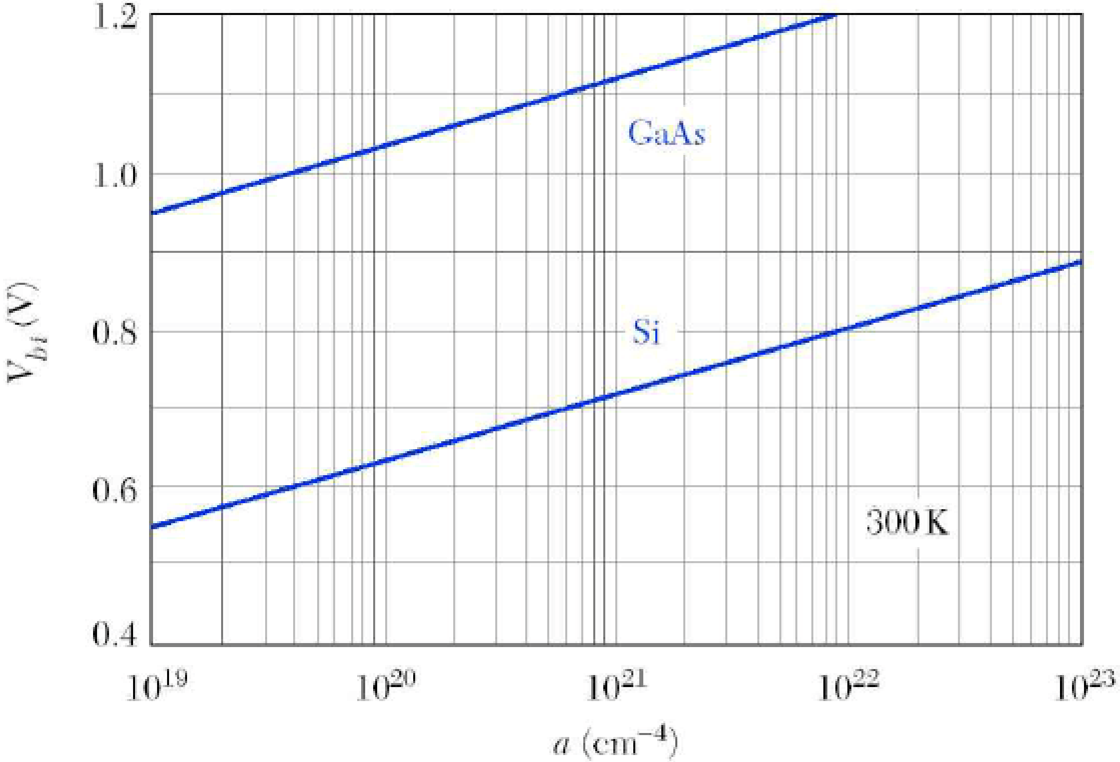
p93

$$V = \frac{1}{2}E_m\sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}\right)V}$$

$$0.057\times 10^{-15} = \frac{10^{18} + N_D}{10^{18} N_D}$$

$$N_D = 1.76\times 10^{16}\,cm^{-3}$$

6. 线性缓变硅结，其掺杂梯度为10^{20} cm^{-4} 。计算内建电势及 **4V** 反向偏压的结电容（**T= 300 K**）。



p96

$$W = \left(\frac{12\varepsilon_s (V_{bi} - V)}{qa} \right)^{1/3}$$

$$C_j \equiv \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ}{W \dfrac{dQ}{\varepsilon_s}} = \frac{\varepsilon_s}{W}$$

$$= 6.84 \times 10^{-9} F / cm^2$$

$$a = 10^{20} cm^{-4}$$

$$V_{bi} = \frac{2}{3}\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{a^2 \varepsilon_s kT / q}{8qn_i^3} \right) = 0.64V$$