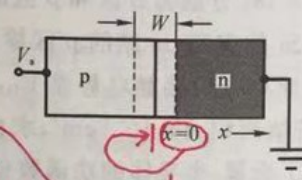


信息电子学物理基础作业答案参考 —— by hhubibi

第四章作业

Si-



题 4.6 图

4.6 (a) pn 结如题图 4P-2 所示, $N_A = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 和 $N_D = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $D_n = 25 \text{ cm}^2/\text{s}$, $D_p = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$, 结截面 $A = 10^{-4} \text{ cm}^2$, $\tau_{n0} = 0.4 \mu\text{s}$, $\tau_{p0} = 0.1 \mu\text{s}$, 求:

- ①空穴和电子的反向饱和电流;
- ②求正向偏压 $V_F = \frac{1}{2} V_D$ 时, 在 x_n 处的空穴浓度;
- ③求 $V_F = \frac{1}{2} V_D$, 在 $x = x_n + \frac{1}{2} L_p$ 处的空穴电流。

(b) Si-pn 结长型二极管, $T = 300 \text{ K}$, 已知 n 区掺杂 $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, p 区掺杂 $N_A = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 少子寿命 $\tau_{p0} = 0.01 \mu\text{s}$, $\tau_{n0} = 0.05 \mu\text{s}$, 少子扩散系数 $D_n = 23 \text{ cm}^2/\text{s}$ 和 $D_p = 8 \text{ cm}^2/\text{s}$, 正偏电压 $V_F = 0.610 \text{ V}$, 计算:

- ① $\Delta p(x)$ ($x \geq 0$); ② $x = 3 \times 10^{-4} \text{ cm}$ 处空穴扩散电流密度和电子电流密度。

$x_n +$

(a)

1、

$$J_{sp} = \frac{eD_p p_{n0}}{L_p} = \frac{en_i^2}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_{p0}}} = \frac{1.602 \times 10^{-19} \times (1.5 \times 10^{10})^2}{1 \times 10^{15}} \sqrt{\frac{10}{0.1 \times 10^{-6}}} = 3.6 \times 10^{-10} \text{ A/cm}^2$$

$$I_{sp} = J_{sp} \times A = 3.6 \times 10^{-14} \text{ A}$$

$$J_{sn} = \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} = \frac{en_i^2}{N_D} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_{n0}}} = \frac{1.602 \times 10^{-19} \times (1.5 \times 10^{10})^2}{5 \times 10^{15}} \sqrt{\frac{25}{0.4 \times 10^{-6}}} = 5.69 \times 10^{-11} \text{ A/cm}^2$$

$$I_{sp} = J_{sp} \times A = 5.69 \times 10^{-15} \text{ A}$$

2、

$$V_D = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = 0.0259 \times \ln \frac{5 \times 10^{15} \times 1 \times 10^{15}}{(1.5 \times 10^{10})^2} = 0.617 \text{ V}$$

$$\Delta p_n(x) = p_n(x) - p_{n0} = p_{n0} \left[\exp\left(\frac{eV_F}{k_B T}\right) - 1 \right] \exp\left(\frac{x_n - x}{L_p}\right)$$

$$p_n(x_n) = \Delta p_n(x_n) + p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D} \exp\left(\frac{eV_F}{k_B T}\right) = \frac{n_i^2}{N_D} \exp\left(\frac{e \frac{1}{2} V_D}{k_B T}\right) = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{1 \times 10^{15}} \exp\left(\frac{0.617 \times 0.5}{0.0259}\right) = 3.35 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

3、

$$J_p(x_n + 0.5L_p) = \frac{eD_p p_{n0}}{L_p} \left[\exp\left(\frac{eV_F}{k_B T}\right) - 1 \right] \exp\left(\frac{x_n - x}{L_p}\right) \Big|_{x_n + 0.5L_p}$$

$$J_p(x_n + 0.5L_p) = 3.6 \times 10^{-10} \left[\exp\left(\frac{0.617 \times 0.5}{0.0259}\right) - 1 \right] \exp(-0.5) = 3.25 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$$

$$I_p(x_n + 0.5L_p) = J_p(x_n + 0.5L_p) \times A = 3.25 \times 10^{-9} A$$

(b)

这题参考答案一定错了，看我做的吧

$$J_p(x) = \frac{en_i^2}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_{p0}}} \left[\exp\left(\frac{eV_F}{k_B T}\right) - 1 \right] \exp\left(\frac{x_n - x}{\sqrt{D_p \tau_{p0}}}\right)$$

$$J_p(x) = \frac{1.602 \times 10^{-19} (1.5 \times 10^{10})^2}{10^{16}} \sqrt{\frac{8}{0.01 \times 10^{-6}}} \left[\exp\left(\frac{0.61}{0.0259}\right) - 1 \right] \exp\left(\frac{x_n - x}{\sqrt{8 \times 0.01 \times 10^{-6}}}\right)$$

$$J_p(x) = 1.7256 \exp(-3.5355 \times 10^3 x)$$

$$J_{total} = \left(\frac{en_i^2}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_{p0}}} + \frac{en_i^2}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_{n0}}} \right) \left[\exp\left(\frac{eV_F}{k_B T}\right) - 1 \right]$$

$$J_{total} = \left[\frac{1.602 \times 10^{-19} (1.5 \times 10^{10})^2}{10^{16}} \sqrt{\frac{8}{0.01 \times 10^{-6}}} + \frac{1.602 \times 10^{-19} (1.5 \times 10^{10})^2}{5 \times 10^{16}} \sqrt{\frac{23}{0.05 \times 10^{-6}}} \right] \left[\exp\left(\frac{0.61}{0.0259}\right) - 1 \right] = 1.9873 A/cm^2$$

$$J_p(x_n - x = 3 \times 10^{-4} cm) = 1.7256 \exp(-3.5355 \times 10^3 \times 3 \times 10^{-4}) = 0.5975 A/cm^2$$

$$J_n(x_n - x = 3 \times 10^{-4} cm) = 1.9873 - 0.5975 = 1.3898 A/cm^2$$

补充题1: Si-p⁺n结的 $N_D = 2.80 \times 10^{15} cm^{-3}$ 、 $A = 1.00 \times 10^{-5} cm^2$ 、 $D_p = 13.0 cm^2/s$ 、 $L_p = 2.00 \times 10^{-3} cm$ ，若二极管正向电流达到0.100 mA时的电压为阈值电压，问该p⁺n结阈值电压 V_t 是多少？请注意有效数字

p⁺n结的反向饱和电流主要是n区空穴（空穴）的扩散电流，忽略p⁺区少子扩散电流，可以得到

$$J_o = eD_p \frac{n_i^2}{N_D L_p} = 1.602 \times 10^{-19} \times 13 \times \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{2.8 \times 10^{15} \times 2 \times 10^{-3}} = 8.37 \times 10^{-11} A/cm^2$$

由肖克莱方程 $I = AJ_o \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$ ，可以得到

$$V_t = \frac{k_B T}{e} \ln\left(1 + \frac{I}{AJ_o}\right) = 0.0259 \ln\left(1 + \frac{0.1 \times 10^{-3}}{10^{-5} \times 8.37 \times 10^{-11}}\right) = 0.661 V$$

补充题2: 温度为300 K, Ge掺杂主杂质 $4.60 \times 10^{15} cm^{-3}$, GaAs掺杂主杂质 $8.50 \times 10^{15} cm^{-3}$, 假定杂质完全电离。求: (a) Ge与GaAs材料分别是什么导电类型? 由此组成什么结? (b) 理想条件下的晶格失配率; (c) “冶金结”处导带能级差; (d) “冶金结”处价带能级差; (e) GaAs中性区的费米能级与最近允带之差的位置; (f) Ge中性区的费米能级与最近允带之差的位置; (g) Ge与GaAs中性区真空能级差; (h) “冶金结” 2侧2种材料的耗尽层厚度; (i) “冶金结” 2侧2种材料的内建电位。请注意有效数字

这题我错了很多，下面答案仅供参考，我怀疑正确答案有问题

解2: $T=300K$ $Ge: N_D = 4.6 \times 10^{15} cm^{-3}$
 $GaAs: N_A = 8.50 \times 10^{15} cm^{-3}$

(a). $Ge = n$ 型半导体 $\chi_2 = 4.13 eV$

$GaAs = p$ 型半导体 $\chi_1 = 4.07 eV$

由以上组成异质结 (PN结)

(b). $\frac{2|a_1 + a_2|}{|a_1 + a_2|} \times 100\% = 0.07\%$

(c). $\Delta E_C = \chi_n - \chi_p = 0.0600 eV$

(d). $\Delta E_V = \Delta E_g - \Delta E_C = 1.42 - 0.66 - 0.06 eV = 0.710 eV$

(e). 最近允带为价带 for $GaAs$

$E_f - E_V = k_B T \ln\left(\frac{N_V}{p}\right)$ for $GaAs$, $N_V = 7 \times 10^{18} cm^{-3}$
 $p = N_A = 8.50 \times 10^{15} cm^{-3}$
 $\therefore E_f - E_V = 0.170 eV$

(f). 最近允带为导带 for Ge $N_C = 1.04 \times 10^{19} cm^{-3}$ $n_0 = \frac{N_D}{N_A} N_D$
 $E_C - E_f = k_B T \ln\left(\frac{N_C}{n_0}\right) = 0.200 eV$ $n_i = 4 \times 10^{13} cm^{-3}$

(g). 真空能级差

$eV_D = eV_{D1} + eV_{D2} = E_{F2} - E_{F1} = \phi_1 - \phi_2 = 1.00 eV$

for p_{GaAs} $\phi_1 = \chi_1 + E_g - (E_f - E_V) = 4.07 + 1.43 - 0.17 eV = 5.33 V$

for n_{Ge} $\phi_2 = \chi_2 + (E_C - E_f) = 4.13 + 0.20 eV = 4.33 eV$

(h). $x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_n \epsilon_p N_A V_D}{e N_D (\epsilon_n N_D + \epsilon_p N_A)}} = \frac{4.73 \times 10^{-5} cm}{4.81 \times 10^{-5}}$
 $\epsilon_n = 16$
 $\epsilon_p = 13.1$

$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_n \epsilon_p N_A V_D}{e N_A (\epsilon_n N_D + \epsilon_p N_A)}} = \frac{2.17 \times 10^{-5} cm}{2.61 \times 10^{-5}}$

(i). $V_{PD} = \frac{e N_A x_p^2}{2\epsilon_p} = 0.418 V$ 0.4

$V_{ND} = \frac{e N_D x_n^2}{2\epsilon_n} = 0.591 V$ 0.6

老师给的答案:

2. (a) $GaAs$ 材料是 P 型导电、 Ge 材料是 n 型导电 形成 Pn 异质结

(b) 晶格失配率 = 0.07%

(c) = 0.0600 eV

(d) 0.710 eV

(e) $E_{FGaAs} - E_{iGaAs} = -0.577 eV$

$GaAs$ 中性区的费米能级与最近允带之差: $E_{FGaAs} - E_{V GaAs} = (E_{FGaAs} - E_{iGaAs}) - (E_{V GaAs} - E_{iGaAs}) = 0.138 eV$

(f) $E_{FGe} - E_{iGe} = k_B T \ln(N_D/n_i) = 0.136 eV$

Ge 中性区的费米能级与最近允带之差: $E_{FGe} - E_{C Ge} = (E_{FGe} - E_{iGe}) - (E_{C Ge} - E_{iGe}) = -0.194 eV$

(g) $\Delta E_0 = 1.04 eV$

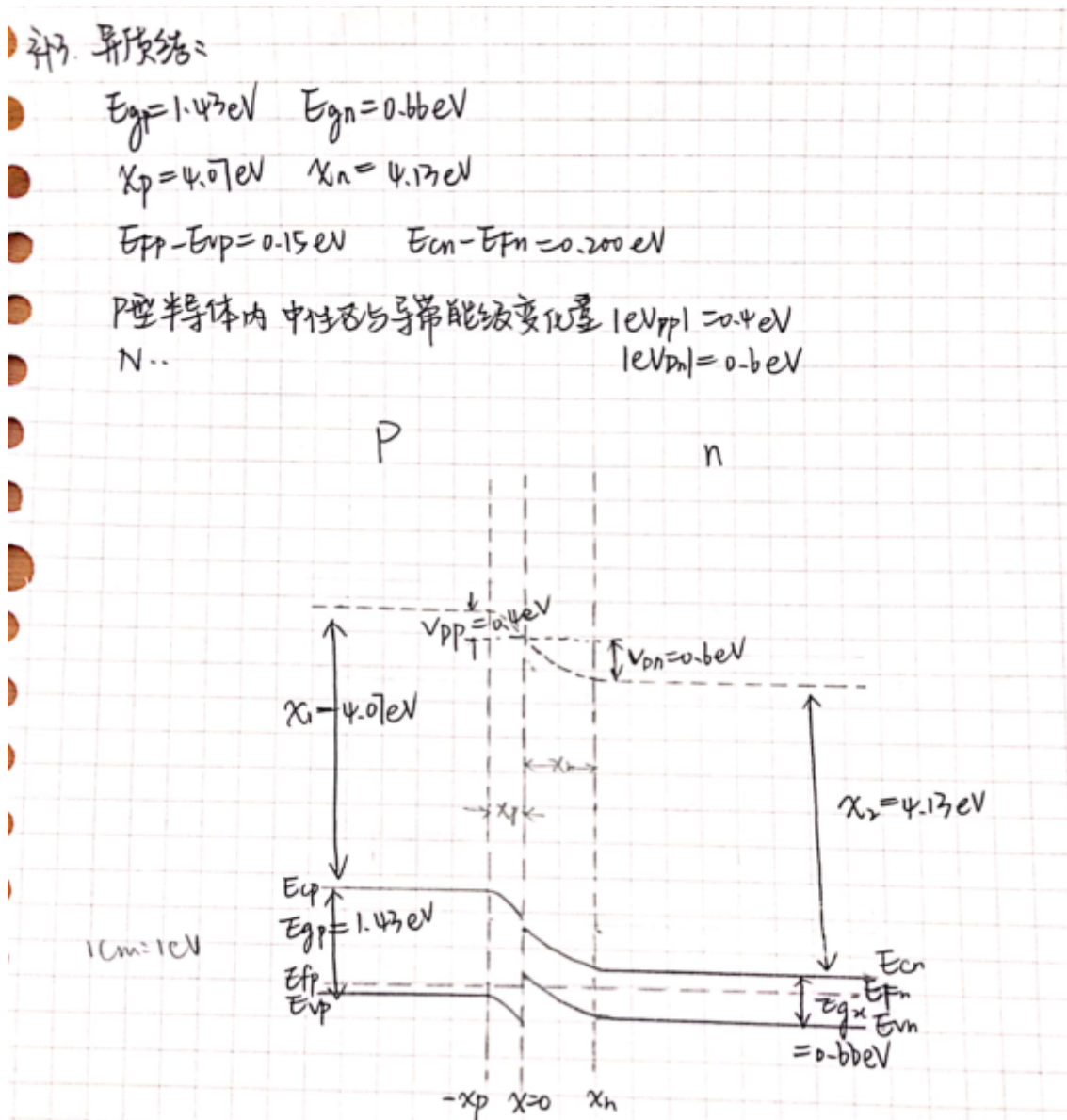
(h) $x_n = \left[\frac{2\epsilon_n \epsilon_p N_A V_D}{e N_D (\epsilon_n N_D + \epsilon_p N_A)} \right]^{1/2} = 0.491 \mu m$

$x_p = (N_D/N_A) x_n = 0.266 \mu m$

(i) $V_{Dn} = 0.627 eV$

$V_{Dp} = 0.414 eV$

补充题2：假定某异质结特性如下：禁带宽度分别为 $E_{gp} = 1.43\text{eV}$ 、 $E_{gn} = 0.66\text{eV}$ ；电子亲和势分别为 $\chi_p = 4.07\text{eV}$ 、 $\chi_n = 4.13\text{eV}$ ；半导体内部中性区的费米能级位置分别为 $E_{FP} - E_{VP} = 0.150\text{eV}$ 、 $E_{Fn} - E_{Cn} = -0.200\text{eV}$ ；P型半导体内部中性区与“冶金结”的导带能级变化量为 $|eV_{DP}| = 0.400\text{eV}$ 、n型半导体内部中性区与“冶金结”的导带能级变化量为 $|eV_{Dn}| = 0.600\text{eV}$ ；如果“冶金结”的位置 $x_0 = 0$ ，则半导体内部中性区边界的位置分别为 $x_P = -250\text{nm}$ 、 $x_n = 500\text{nm}$ 。请按能量比例1.00 cm代表1.00 eV和尺度比例1.00 cm代表500 nm画出能带图。



第五章作业

5.13

(a)

直接能隙区: $0 < x < 0.45$

$x = 0$, $E_g = 1.424\text{eV}$

$x = 0.45$, $E_g = 1.424 + 1.247x = 1.985\text{eV}$

对应波长区: $\frac{1.24}{1.985} < \lambda < \frac{1.24}{1.424}$

(b)

$0 < x < 0.45, E_g = 1.424 + 1.229x$

$x = 0.35, E_g = 1.424 + 1.229 \times 0.35 = 1.854 \text{ eV}$

$\lambda = \frac{1.24}{E_g} = \frac{1.24}{1.854} = 0.669 \mu\text{m}$

补充题1: 已知Si-PIN光电二极管, 量子效率为0.700, 波长为1.10 μm 。请问作为探测器, 该二极管需要正偏还是反偏? 并且计算响应度。 请注意有效数字

作为探测器需要反偏

响应度 $R = \frac{\eta\lambda}{1.24} = \frac{0.700 \times 1.10}{1.24} = 0.621 \text{ A/W}$

补充题2: 温度为300.0 K, GaAs-p⁺⁺n⁺⁺结掺施主杂质 $5.500 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 掺受主杂质 $7.800 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 假定杂质完全电离, 正向偏置电压为1.200 V, 构成GaAs同质结半导体激光器。求: n⁺⁺中性区费米能级相对导带底的位置, p⁺⁺中性区费米能级相对价带顶的位置; n⁺⁺中性区与p⁺⁺中性区相应的导带能级差、价带能级差、真空能级差; 冶金结位置2侧的导带能级差、价带能级差、真空能级差。

补充题3、4, 以及设计题, 见后:

n⁺⁺中性区费米能级相对导带底的位置:

$E_{Fn} - E_{Cn} = k_B T \ln \frac{n_0}{N_C} = k_B T \ln \frac{N_D}{N_C} = 0.0259 \ln \frac{5.5 \times 10^{19}}{4.7 \times 10^{17}} = 0.1231 \text{ eV}$

p⁺⁺中性区费米能级相对价带顶的位置:

$E_{Vp} - E_{Fp} = k_B T \ln \frac{p_0}{N_V} = k_B T \ln \frac{N_A}{N_V} = 0.0259 \ln \frac{7.8 \times 10^{19}}{7 \times 10^{18}} = 0.06232 \text{ eV}$

$eV_D = k_B T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.0259 \times \ln \frac{5.5 \times 10^{19} \times 7.8 \times 10^{19}}{(1.8 \times 10^6)^2} = 1.6175 \text{ eV}$

n⁺⁺和p⁺⁺中性区导带能级差 = 价带能级差 = 真空能级差 = $eV_D - eV_F = 1.6175 - 1.5500 = 0.0675 \text{ eV}$

冶金结两侧三者均为0

补充题3：接上题，假定电子的扩散系数为225.0 cm²/s，空穴的扩散系数为7.000 cm²/s，2种少子的寿命均为5.000×10⁻⁸ s。求p⁺⁺区结边缘与冶金结的距离、n⁺⁺区结边缘与冶金结的距离、2种少子（p⁺⁺区导带电子、n⁺⁺区价带空穴）的扩散长度。 请注意有效数字

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(V_D - V_F)(N_A + N_D)}{eN_A N_D}} = \sqrt{\frac{2 \times 8.854 \times 10^{-14} \times 13.1 \times 0.064 \times (5.5 + 7.8) \times 10^{19}}{1.602 \times 10^{-19} \times 5.5 \times 7.8 \times 10^{38}}} = 1.6950 \times 10^{-7} \text{ cm}$$

根据 $x_p = \frac{N_D N_A}{x_n}$ ，可以解得， $x_n = 9.941 \times 10^{-8} \text{ cm}$ ， $x_p = 7.009 \times 10^{-8} \text{ cm}$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \sqrt{225 \times 10^{-8} \times 5} = 3.354 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{7 \times 10^{-8} \times 5} = 5.916 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

补充题4：请画出以下参数的GaAs-p⁺⁺n⁺⁺同质结半导体激光器能带图，该能带图包括准费米能级，标出有源区、能级符号、位置符号：中性区n⁺费米能级在导带底上方 $E_{Fn} - E_{Cn} = 0.123 \text{ eV}$ ，中性区p⁺⁺费米能级在价带顶下方 $E_{Vp} - E_{Fp} = 0.0623 \text{ eV}$ ；GaAs-p⁺⁺n⁺⁺结接触电位差 $V_D = 1.61 \text{ V}$ ，其中冶金结n⁺⁺侧的电位差 $V_{Dn} = 0.803 \text{ V}$ ，正向偏置电压 $V_F = 1.20 \text{ V}$ ；n⁺⁺区结边缘与冶金结的距离 $x_n = 2.53 \times 10^{-7} \text{ cm}$ ，p⁺⁺区结边缘与冶金结的距离 $x_p = 1.78 \times 10^{-7} \text{ cm}$ ；p⁺⁺区少子（导带电子）的扩散长度 $L_n = 3.35 \times 10^{-3} \text{ cm}$ ，n⁺⁺区少子（价带空穴）的扩散长度 $L_p = 5.92 \times 10^{-4} \text{ cm}$ 。比例：能级5.0 cm/1.0 eV，结边缘与冶金结距离0.50 cm/1.0 nm，扩散长度0.20 cm/1.0 μm（结区尺寸远小于扩散的尺寸，采用不同比例画） 设计题， 见后：

