第二章习题

◆第1-2讲

1.硅突变结二极管的掺杂浓度为：$N_D=10^{15}cm^{-3}$，$N_A=4\times10^{20}cm^{-3}$。在室温下计算：(1)内建电势差；(2)耗尽层宽度；(3)零偏下最大内建电场

解：(1)内建电势差

$$V_D=\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_AN_D}{n_i^2}\right)=0.0259\ln\frac{10^{15}\times4\times10^{20}}{\left(1.02\times10^{10}\right)^2}=0.929\text{V}$$

(2)耗尽层宽度

$$X_D=\sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0V_D}{qN_D}}$$

$$=\sqrt{\frac{2\times11.9\times8.854\times10^{-14}\times0.929}{1.6\times10^{-19}\times10^{15}}}=1.106\times10^{-4}cm$$

(3)最大电场

$$E_{\max}=-\frac{qN_Dx_n}{\varepsilon_r\varepsilon_0}=-\frac{1.6\times10^{-19}\times10^{15}\times1.106\times10^{-4}}{11.9\times8.854\times10^{-14}}=-1.68\times10^4\,\text{V}/cm$$

第二章习题

◆第1-2讲

2.考虑掺杂浓度为$N_D=N_A=2\times10^{16}cm^{-3}$的硅突变PN结，T=300K，(1)计算相对于本征费米能级，P区与N区内费米能级位置；(2)画出PN结的平衡状态能带图，从图中确定内建电势V_D，并标注(1)中计算结果；(3)用公式计算V_D；(4)求x_n, x_p以及该结的峰值电场

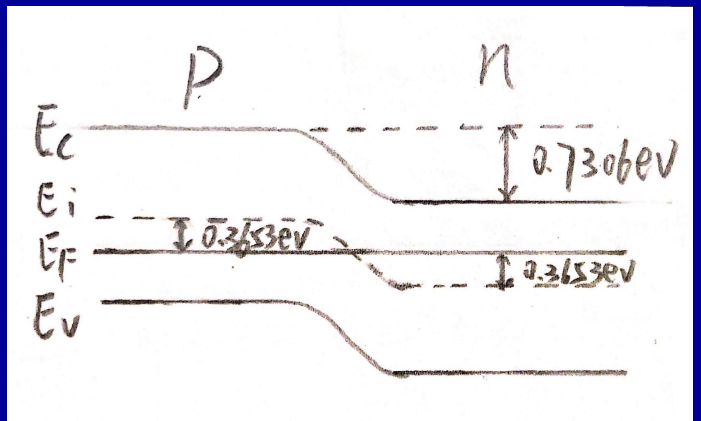
解：(1)n区

$$E_F - E_{Fi} = kT\ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) = (0.0259)\ln\left(\frac{2\times10^{16}}{1.5\times10^{10}}\right) = 0.3653\ \text{eV}$$

p区

$$E_{Fi} - E_F = kT\ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) = (0.0259)\ln\left(\frac{2\times10^{16}}{1.5\times10^{10}}\right) = 0.3653\ \text{eV}$$

(2)



$$V_{bi} = 0.3653 + 0.3653 = 0.7306\ \text{V}$$

第二章习题

解：(3)

$$V_{bi} = V_t \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right)$$

$$= (0.0259)\ln\left[\frac{(2\times10^{16})(2\times10^{16})}{(1.5\times10^{10})^2}\right]$$

$$= 0.7305\,\mathrm{V}$$

(4)

$$x_n = \left[\frac{2\in_s V_{bi}}{e}\left(\frac{N_a}{N_d}\right)\left(\frac{1}{N_a + N_d}\right)\right]^{1/2}$$

$$= \left[\frac{2(11.7)(8.85\times10^{-14})(0.7305)}{1.6\times10^{-19}} \times \left(\frac{2\times10^{16}}{2\times10^{16}}\right)\left(\frac{1}{2\times10^{16}+2\times10^{16}}\right)\right]^{1/2}$$

$$= 0.154\times10^{-4}\,\mathrm{cm} = 0.154\,\mu\,\mathrm{m}$$

$$|E_{max}| = \frac{eN_d x_n}{\in_s}$$

$$= \frac{(1.6\times10^{-19})(2\times10^{16})(0.1537\times10^{-4})}{(11.7)(8.85\times10^{-14})}$$

$$|E_{max}| = 4.75\times10^4\ \mathrm{V/cm}$$

同理

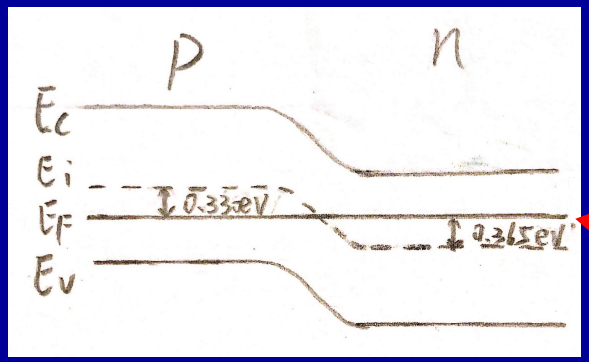
$$x_p = 0.154\times10^{-4}\,\mathrm{cm} = 0.154\,\mu\,\mathrm{m}$$

第二章习题

◆第1-2讲

3.考虑T=300K时的均匀掺杂GaAs PN结，其N区的E_F-E_{Fi}=0.365eV，P区的E_{Fi}-E_F=0.330eV，设n_i为$1.5\times10^{10}cm^{-3}$。(1)画出PN结的能带图；(2)求N区与P区的掺杂浓度N_D和N_A；(3)确定V_D

解：(1)



(3)

$$V_{bi} = (0.0259)\ln\left[\frac{(5.12\times10^{15})(1.98\times10^{16})}{(1.5\times10^{10})^2}\right]$$

$$= 0.695\ \text{V}$$

(2)

$$N_d = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right)$$

$$= (1.5\times10^{10})\exp\left(\frac{0.365}{0.0259}\right)$$

$$N_d = 1.98\times10^{16}\ \text{cm}^{-3}$$

$$N_a = n_i \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_F}{kT}\right)$$

$$= (1.5\times10^{10})\exp\left(\frac{0.330}{0.0259}\right)$$

$$N_a = 5.12\times10^{15}\ \text{cm}^{-3}$$

第二章习题

◆第1-2讲

4.考虑T=300K时的均匀掺杂硅PN结。在零偏下，总空间电荷区的1/4处在N型区内，内建电势V_D=0.710V。求(1)N_A，(2)N_D，(3)x_n，(4)x_p，(5)$E_{\max}$绝对值

解：

$$x_n = 0.25W = 0.25(x_n + x_p)$$

$$0.75x_n = 0.25x_p \Rightarrow \frac{x_p}{x_n} = 3$$

$$x_n N_d = x_p N_a \Rightarrow \frac{N_d}{N_a} = \frac{x_p}{x_n} = 3$$

$$N_d = 3N_a$$

$$V_{bi} = (0.0259)\ln\left[\frac{N_a N_d}{(1.5\times10^{10})^2}\right]$$

$$0.710 = (0.0259)\ln\left[\frac{3N_a^2}{(1.5\times10^{10})^2}\right]$$

$$3N_a^2 = (1.5\times10^{10})^2 \exp\left(\frac{0.710}{0.0259}\right)$$

$$N_a = 7.766\times10^{15}\ \text{cm}^{-3}$$

$$N_d = 2.33\times10^{16}\ \text{cm}^{-3}$$

第二章习题

◆第1-2讲

解:

$$x_n = \left\{\frac{2\in_s V_{bi}}{e}\left(\frac{N_a}{N_d}\right)\left(\frac{1}{N_a+N_d}\right)\right\}^{1/2}$$

$$= \left\{\frac{2(11.7)(8.85\times10^{-14})(0.710)}{1.6\times10^{-19}} \times\left(\frac{1}{3}\right)\left[\frac{1}{4(7.766\times10^{15})}\right]\right\}^{1/2}$$

$$\Rightarrow x_n = 9.93\times10^{-6}\ \text{cm}$$

or $x_n = 0.0993\ \mu\text{m}$

$$x_p = \left\{\frac{2(11.7)(8.85\times10^{-14})(0.710)}{1.6\times10^{-19}} \times\left(\frac{3}{1}\right)\left[\frac{1}{4(7.766\times10^{15})}\right]\right\}^{1/2}$$

$$= 2.979\times10^{-5}\ \text{cm}$$

or $x_p = 0.2979\ \mu\text{m}$

$$|E_{max}| = \frac{eN_d x_n}{\in_s}$$

$$= \frac{(1.6\times10^{-19})(2.33\times10^{16})(0.0993\times10^{-4})}{(11.7)(8.85\times10^{-14})}$$

$$= 3.58\times10^{4}\ \text{V/cm}$$

第二章习题

◆第3-4讲

1.理想的p^+n结为T=300K时均匀掺杂的冶金结。掺杂浓度的关系为$N_a=80N_d$。内建电势差为$V_{bi}=0.74\text{V}$。反偏电压$V_R=10\text{V}$。设$n_i=1.5\times10^{10}\text{cm}^{-3}$，$\varepsilon_r=11.7$。计算(1)$N_a$、$N_d$；(2)$x_p$、$x_n$；(3)$|E_{\max}|$；(4)C'(单位势垒电容)

解：(1)

$$V_{bi}=V_t\ln\left(\frac{N_aN_d}{n_i^2}\right)$$

$$=V_t\ln\left(\frac{80N_d^2}{n_i^2}\right)$$

$$80N_d^2=n_i^2\exp\left(\frac{V_{bi}}{V_t}\right)$$

$$=\left(1.5\times10^{10}\right)^2\exp\left(\frac{0.740}{0.0259}\right)$$

$$=5.762\times10^{32}$$

$$\Rightarrow N_d=2.684\times10^{15}\ \text{cm}^{-3}$$

$$N_a=2.147\times10^{17}\ \text{cm}^{-3}$$

第二章习题

◆第3-4讲

解：(2)

$$x_n = \left\{ \frac{2\epsilon_s (V_{bi} + V_R)}{e} \left(\frac{N_a}{N_d} \right) \left(\frac{1}{N_a + N_d} \right) \right\}^{1/2}$$

$$= \left\{ \frac{2(11.7)(8.85\times10^{-14})(0.740+10)}{1.6\times10^{-19}} \times \left(\frac{80}{1} \right) \left(\frac{1}{2.147\times10^{17} + 2.684\times10^{15}} \right) \right\}^{1/2}$$

$$= 2.262\times10^{-4}\ \text{cm}$$

or $x_n = 2.262\ \mu\text{m}$

$$x_p = \left\{ \frac{2\epsilon_s (V_{bi} + V_R)}{e} \left(\frac{N_d}{N_a} \right) \left(\frac{1}{N_a + N_d} \right) \right\}^{1/2}$$

$$= \left\{ \frac{2(11.7)(8.85\times10^{-14})(0.740+10)}{1.6\times10^{-19}} \times \left(\frac{1}{80} \right) \left(\frac{1}{2.147\times10^{17} + 2.684\times10^{15}} \right) \right\}^{1/2}$$

$$= 2.83\times10^{-6}\ \text{cm}$$

or $x_p = 0.0283\ \mu\text{m}$

第二章习题

◆第3-4讲

解：(3)

$$|E_{max}| = \frac{2(V_{bi}+V_R)}{W}$$

$$= \frac{2(0.740+10)}{(2.262+0.0283)\times 10^{-4}}$$

$$= 9.38\times 10^4 \text{ V/cm}$$

(4)

$$C' = \left\{\frac{e\in_s N_a N_d}{2(V_{bi}+V_R)(N_a+N_d)}\right\}^{1/2}$$

$$= \left\{\frac{(1.6\times 10^{-19})(11.7)(8.85\times 10^{-14})}{2(0.740+10)} \times \left[\frac{(2.147\times 10^{17})(2.684\times 10^{15})}{2.147\times 10^{17}+2.684\times 10^{15}}\right]\right\}^{1/2}$$

$$C' = 4.52\times 10^{-9} \text{ F/cm}^2$$

第二章习题

◆第3-4讲

2.考虑反偏电压5V时的硅n^+p结。(1)当P区掺杂浓度变为原来的三倍时，求内建电势差的变化量；(2)当P区掺杂浓度由N_a变为$3N_a$时，求势垒电容的变化比率。

解：(1)

$$V_{bi}(3N_a)-V_{bi}(N_a)$$
$$=V_t\ln\left[\frac{N_d(3N_a)}{n_i^2}\right]-V_t\ln\left[\frac{N_dN_a}{n_i^2}\right]$$
$$=V_t\left\{\ln(3)+\ln\left[\frac{N_dN_a}{n_i^2}\right]\right\}-V_t\ln\left[\frac{N_dN_a}{n_i^2}\right]$$
$$=V_t\ln(3)=(0.0259)\ln(3)$$
$$=0.02845\ \text{V}$$

(2)

$$C'\cong\left\{\frac{e\in_s N_a}{2(V_{bi}+V_R)}\right\}^{1/2}$$
$$\frac{C'(3N_a)}{C'(N_a)}=\left\{\frac{3N_a}{N_a}\right\}^{1/2}=\sqrt{3}=1.732$$

第二章习题

◆第3-4讲

3.反偏电压V_R=1V，T=300K时，GaAs PN结的总势垒电容为1.1pF。其中一侧的掺杂浓度为$8\times10^{16}cm^{-3}$，内建电势差V_{bi}=1.2V。设$n_i=1.8\times10^6cm^{-3}$，ε_r=13.1。(1)计算另一侧的掺杂浓度；(2)结的横截面积；(3)当结电容变为0.8pF时的反偏电压V_R。

解：(1)

$$V_{bi}=(0.0259)\ln\left[\frac{(8\times10^{16})N_d}{(1.8\times10^6)^2}\right]=1.20$$

$$(8\times10^{16})N_d=(1.8\times10^6)^2\exp\left(\frac{1.20}{0.0259}\right)$$

$$\Rightarrow N_d=5.36\times10^{15}\,cm^{-3}$$

第二章习题

◆第3-4讲

解：(2)

$$C = AC' = A\left\{\frac{e\in_s N_a N_d}{2(V_{bi}+V_R)(N_a+N_d)}\right\}^{1/2}$$

$$1.10\times10^{-12} = A\left\{\frac{(1.6\times10^{-19})}{2(1.20+1.0)}\right.$$

$$\left.\times\frac{(13.1)(8.85\times10^{-14})(8\times10^{16})(5.36\times10^{15})}{(8\times10^{16}+5.36\times10^{15})}\right\}^{1/2}$$

$$\Rightarrow A = 7.56\times10^{-5}\ \text{cm}^2$$

(3)

$$0.80\times10^{-12} = (7.56\times10^{-5})\left\{\frac{(1.6\times10^{-19})}{2(V_{bi}+V_R)}\right.$$

$$\left.\times\frac{(13.1)(8.85\times10^{-14})(8\times10^{16})(5.36\times10^{15})}{(8\times10^{16}+5.36\times10^{15})}\right\}^{1/2}$$

$$1.0582\times10^{-8} = \frac{2.1585\times10^{-8}}{\sqrt{V_{bi}+V_R}}$$

$$\Rightarrow V_{bi}+V_R = 4.161 = 1.20+V_R$$

$$V_R = 2.96\ \text{V}$$

第二章习题

◆第3-4讲

4.硅PN结二极管的掺杂浓度为$N_d=2\times10^{15}\text{cm}^{-3}$，$N_a=8\times10^{15}\text{cm}^{-3}$。设$n_i=1.5\times10^{10}\text{cm}^{-3}$。计算下列条件下空间电荷区边缘的少子浓度：外加电压(1)V=0.55V；(2)V=-0.55V。

解：

$$n_{po}=\frac{n_i^2}{N_a}=\frac{(1.5\times10^{10})^2}{8\times10^{15}}=2.8125\times10^4\ \text{cm}^{-3}$$

$$p_{no}=\frac{n_i^2}{N_d}=\frac{(1.5\times10^{10})^2}{2\times10^{15}}=1.125\times10^5\ \text{cm}^{-3}$$

$$p_n(x_n)=p_{no}\exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right)$$

$$n_p(-x_p)=n_{po}\exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right)$$

$V_a=0.55\ \text{V}$,

$$p_n(x_n)=(1.125\times10^5)\exp\left(\frac{0.55}{0.0259}\right)$$

$$=1.88\times10^{14}\ \text{cm}^{-3}$$

$$n_p(-x_p)=(2.8125\times10^4)\exp\left(\frac{0.55}{0.0259}\right)$$

$$=4.69\times10^{13}\ \text{cm}^{-3}$$

$V_a=-0.55\ \text{V}$

$$p_n(x_n)=(1.125\times10^5)\exp\left(\frac{-0.55}{0.0259}\right)$$

$$\cong0$$

$$n_p(-x_p)=(2.8125\times10^4)\exp\left(\frac{-0.55}{0.0259}\right)$$

$$\cong0$$

第二章习题

◆第3-4讲

5.GaAs PN结的掺杂浓度为N_a=5×10^{16}cm^{-3}，N_d=10^{16}cm^{-3}，结面积为A=10^{-3}cm^2，外加正偏电压V=1.1V。设n_i=1.8×10^{6}cm^{-3}，D_n=205cm^2/s，D_p=9.8cm^2/s，τ_{n0}=5×10^{-8}s，τ_{p0}=10^{-8}s。计算(1)空间电荷区边缘的少子电子扩散电流；(2)空间电荷区边缘的少子空穴扩散电流；(3)PN结二极管的总电流。

解：

$$J_n(-x_p)=\frac{eD_n n_{po}}{L_n}\exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right)$$

$$=\frac{en_i^2}{N_a}\sqrt{\frac{D_n}{\tau_{no}}}\cdot\exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right)$$

$$=\frac{(1.6\times10^{-19})(1.8\times10^6)^2}{5\times10^{16}}\sqrt{\frac{205}{5\times10^{-8}}}\times\exp\left(\frac{1.10}{0.0259}\right)$$

$$=1.849\ \text{A/cm}^2$$

$$I_n=AJ_n(-x_p)=(10^{-3})(1.849)\ \text{A}$$

$$\text{or}\quad I_n=1.85\ \text{mA}$$

$$J_p(x_n)=\frac{eD_p p_{no}}{L_p}\exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right)$$

$$=\frac{en_i^2}{N_d}\sqrt{\frac{D_p}{\tau_{p0}}}\cdot\exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right)$$

$$=\frac{(1.6\times10^{-19})(1.8\times10^6)^2}{10^{16}}\sqrt{\frac{9.80}{10^{-8}}}\times\exp\left(\frac{1.10}{0.0259}\right)$$

$$=4.521\ \text{A/cm}^2$$

$$I_p=AJ_p(x_n)=(10^{-3})(4.521)\ \text{A}$$

$$\text{or}\quad I_p=4.52\ \text{mA}$$

$$I=I_n+I_p=1.85+4.52=6.37\ \text{mA}$$

第二章习题

◆第3-4讲

6.考虑T=300K时的硅n^+p二极管，其参数如下：$N_d=10^{18}cm^{-3}$，$N_a=10^{16}cm^{-3}$，$D_n=25cm^2/s$，$D_p=10cm^2/s$，$\tau_{n0}=\tau_{p0}=1\mu s$，$A=10^{-4}cm^2$。设$n_i=1.5\times10^{10}cm^{-3}$。确定下列偏压下的二极管电流：(1)正偏电压0.5V；(2)反偏电压0.5V。

解：对于n^+p二极管 (1)

$$I_S = Aen_i^2 \cdot \frac{1}{N_a}\sqrt{\frac{D_n}{\tau_{nO}}}$$

$$= \frac{(10^{-4})(1.6\times10^{-19})(1.5\times10^{10})^2}{10^{16}}\sqrt{\frac{25}{10^{-6}}}$$

$$I_S = 1.8\times10^{-15}\ \text{A}$$

$$I_D \cong I_S \exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right)$$

$$= (1.8\times10^{-15})\exp\left(\frac{0.5}{0.0259}\right)$$

$$I_D = 4.36\times10^{-7}\ \text{A}$$

(2)

$$I_D = (1.8\times10^{-15})\left[\exp\left(\frac{-0.5}{0.0259}\right)-1\right]$$

$$I_D \cong -I_S = -1.8\times10^{-15}\ \text{A}$$

第二章习题

◆第3-4讲

7.理想硅PN结的掺杂浓度为N_d=1.5×10^{16}cm^{-3}，N_a=5×10^{16}cm^{-3}，结的横截面积为A=5×10^{-4}cm^2。D_n=25cm^2/s，D_p=10cm^2/s，τ_{n0}=2×10^{-7}s，τ_{p0}=8×10^{-8}s。设n_i=1.5×10^{10}cm^{-3}。计算(1)空穴形成的理想反向饱和电流；(2)电子形成的理想反向饱和电流；(3)外加正偏压V_a=0.8V_{bi}时，x_n处的空穴浓度；(4)外加正偏压V_a=0.8V_{bi}时，-x_p处的电子浓度。

解：(1)

$$I_{sp} = A\left(\frac{eD_p p_{no}}{L_p}\right) = eA\sqrt{\frac{D_p}{\tau_{po}}}\cdot\frac{n_i^2}{N_d}$$

$$= (1.6\times10^{-19})(5\times10^{-4})\sqrt{\frac{10}{8\times10^{-8}}}\cdot\frac{(1.5\times10^{10})^2}{1.5\times10^{16}}$$

$$I_{sp} = 1.342\times10^{-14}\ \text{A}$$

(2)

$$I_{sn} = A\left(\frac{eD_n n_{po}}{L_n}\right) = eA\sqrt{\frac{D_n}{\tau_{no}}}\cdot\frac{n_i^2}{N_a}$$

$$= (1.6\times10^{-19})(5\times10^{-4})\sqrt{\frac{25}{2\times10^{-7}}}\cdot\frac{(1.5\times10^{10})^2}{5\times10^{16}}$$

$$I_{sn} = 4.025\times10^{-15}\ \text{A}$$

第二章习题

◆第3-4讲

解：(3)

$$V_{bi} = (0.0259)\ln\left[\frac{(5\times10^{16})(1.5\times10^{16})}{(1.5\times10^{10})^2}\right]$$

$$= 0.746826\ \text{V}$$

$$V_a = (0.8)V_{bi} = (0.8)(0.746826) = 0.59746\ \text{V}$$

$$p_n(x_n) = p_{no}\exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right) = \frac{n_i^2}{N_d}\exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right)$$

$$= \frac{(1.5\times10^{10})^2}{1.5\times10^{16}}\exp\left(\frac{0.59746}{0.0259}\right)$$

$$= 1.56\times10^{14}\ \text{cm}^{-3}$$

(4)

$$n_p(-x_p) = n_{p0}\exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right) = \frac{n_i^2}{N_a}\exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right) = 4.69\times10^{13}\,cm^{-3}$$

第二章习题

◆第3-4讲

8.T=300K时的两个理想PN结，除了禁带宽度不同，其他的电学与物理学参数相同。第一个PN结的禁带宽度为E_g=0.525eV。加正偏压V_a=0.255V时I=10mA。计算当第二个PN结的禁带宽度为多少时，给它外加V_a=0.32V的正偏电压会产生10μA的电流。

解：

$$I \propto n_i^2 \exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right) \propto \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right)\cdot\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$$

$$I \propto \exp\left(\frac{eV_a - E_g}{kT}\right)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\exp\left(\frac{eV_{a1} - E_{g1}}{kT}\right)}{\exp\left(\frac{eV_{a2} - E_{g2}}{kT}\right)}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \exp\left(\frac{eV_{a1} - eV_{a2} - E_{g1} + E_{g2}}{kT}\right)$$

$$\frac{10\times10^{-3}}{10\times10^{-6}} = \exp\left(\frac{0.255 - 0.32 - 0.525 + E_{g2}}{0.0259}\right)$$

$$E_{g2} = 0.59 + (0.0259)\ln(10^3)$$

$$E_{g2} = 0.769\ \text{eV}$$

第二章习题

◆第3-4讲

9.考虑反偏的硅PN结二极管，其反偏电压为V_R=5V。其他参数如下：N_d=N_a=4×10^{16}cm^{-3}，结的横截面积为A=10^{-4}cm^2。假定少子寿命τ_{n0}=τ_{p0}=10^{-7}s，D_n=25cm^2/s，D_p=10cm^2/s，n_i=1.5×10^{10}cm^{-3}。计算(1)理想反向饱和电流；(2)反偏产生电流；(3)产生电流与理想反向饱和电流的比值。

解：(1)

$$I_s = Aen_i^2\left[\frac{1}{N_a}\sqrt{\frac{D_n}{\tau_{n0}}}+\frac{1}{N_d}\sqrt{\frac{D_p}{\tau_{p0}}}\right]$$

$$=\left(10^{-4}\right)\left(1.6\times10^{-19}\right)\left(1.5\times10^{10}\right)^2$$

$$\times\left[\frac{1}{4\times10^{16}}\sqrt{\frac{25}{10^{-7}}}+\frac{1}{4\times10^{16}}\sqrt{\frac{10}{10^{-7}}}\right]$$

$$I_s = 2.323\times10^{-15}\ \text{A}$$

第二章习题

◆第3-4讲

解：(2)

$$I_{gen} = \frac{Aen_i W}{2\tau_0}$$

$$V_{bi} = (0.0259)\ln\left[\frac{(4\times10^{16})(4\times10^{16})}{(1.5\times10^{10})^2}\right] = 0.7665\ \text{V}$$

$$W = \left\{\frac{2\in_s (V_{bi}+V_R)}{e}\left(\frac{N_a+N_d}{N_aN_d}\right)\right\}^{1/2}$$

$$= \left\{\frac{2(11.7)(8.85\times10^{-14})(0.7665+5)}{1.6\times10^{-19}} \times\left[\frac{4\times10^{16}+4\times10^{16}}{(4\times10^{16})(4\times10^{16})}\right]\right\}^{1/2}$$

$$W = 6.109\times10^{-5}\ \text{cm}$$

$$I_{gen} = \frac{(10^{-4})(1.6\times10^{-19})(1.5\times10^{10})(6.109\times10^{-5})}{2(10^{-7})} = 7.331\times10^{-11}\ \text{A}$$

(3)

$$\frac{I_{gen}}{I_s} = \frac{7.331\times10^{-11}}{2.323\times10^{-15}} = 3.16\times10^4$$

第二章习题

◆第3-4讲

10.(1)考虑在T=300K有一理想的硅PN结二极管，N_a=10^{19}cm^{-3} N_d=10^{17}cm^{-3}，请画出此PN结二极管的(-1V到1.2V)J-V曲线，并求出此二极管的饱和电流密度J_s，阈值电压(取电流超过1mA的电压为阈值电压)，0.6V、0.8V和1V时的电流密度J@0.6V、J@0.8V和J@1V，1V时正向导通电阻R_{on}@1V(R_{on}=ΔV/ΔI)（τ_p=τ_n=10^{-7}s；D_p=12.4 cm^2/s，D_n=35cm^2/s，n_i=1.5×10^{10}cm^{-3}，器件面积A=100μm^2)

解：(1) 对于p^+n结

$$J_s = \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_d} = 4\times10^{-12}\ A/cm^2$$

$$J@0.6V = J_s \exp\left(\frac{0.6V}{V_t}\right)$$

$$= 4\times10^{-12}\exp\left(\frac{0.6}{0.026}\right) = 0.042A/cm^2$$

$$J@0.8V = 92.3A/cm^2$$

$$J@1V = 2\times10^5 A/cm^2$$

$$I_D = AJ_s \exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right) = 1mA$$

$$4\times10^{-12}\times10^{-6}\exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right) = 0.001$$

$$V_a = 0.86V$$

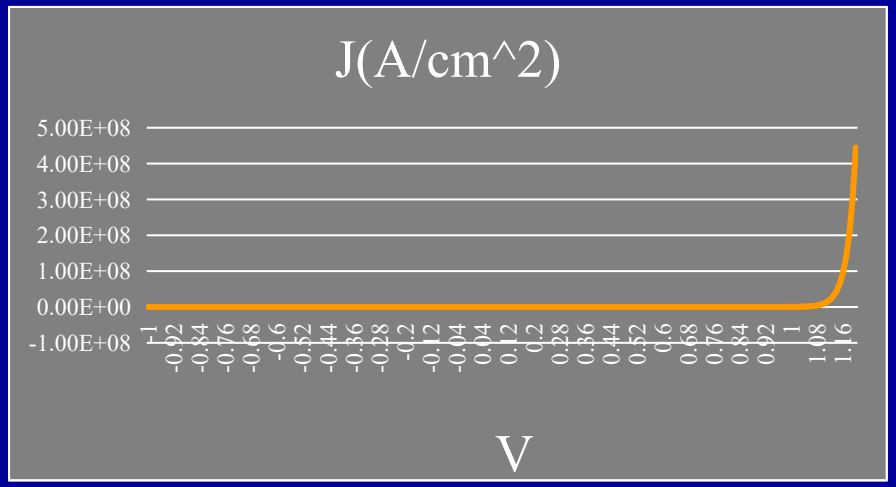
$$R_{on} = 1/(\mathrm{d}I/\mathrm{d}V)$$

$$R_{on} = 0.13\,\Omega$$

第二章习题

◆第3-4讲

解：(1)



(2)考虑有一p^+n结二极管，D_p和D_n均正比于T^3，$\tau_p=\tau_n$且正比于T，画出E_g分别为0.7、1.1、3.4eV时PN结-1V的电流密度J@-1V随温度T的变化趋势图(270K-370K)。并回答，硅器件为什么不适合在高温环境中工作？什么样的器件适合在高温环境下工作？

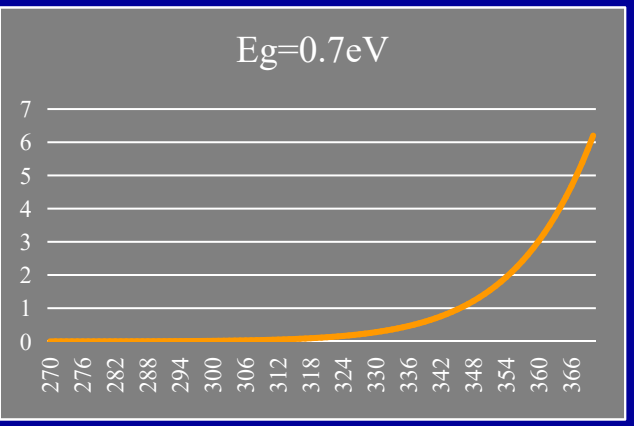
$$J@-1V \propto J_s \propto \sqrt{\frac{D_p}{\tau_{p0}}} n_i^2 \propto T^4 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

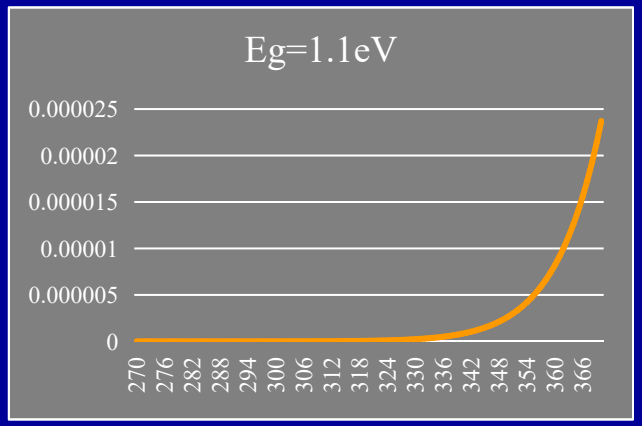
随着温度的增加，器件的饱和电流密度将随温度指数式增加，导致二极管无法实现反向截止，器件失效。

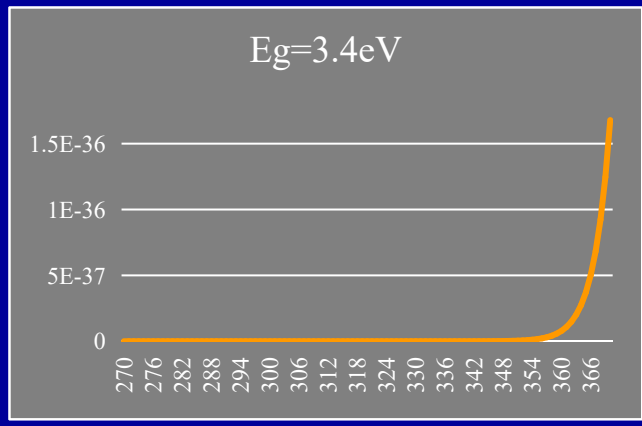
第二章习题

◆第3-4讲

解：(2)







宽禁带半导体器件由于本征载流子浓度低导致饱和电流密度低，所以在高温下仍然可以保持良好的对反向电流的截止能力。所以宽禁带半导体器件适合在高温下工作。

(3)简述串联电阻R_S对器件性能的影响？

如：降低实际导通电流，导致器件产生额外的工作损耗，导致器件产生额外的导通压降，且额外导通压降随电流大小变化...

第二章习题

◆第5-6讲

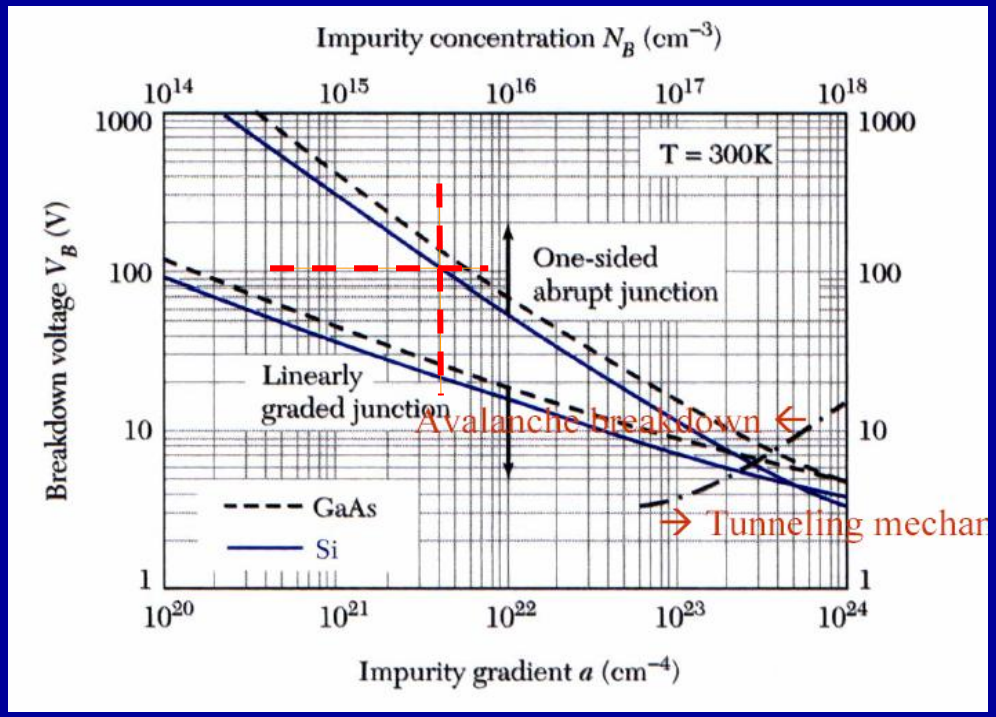
1.突变硅p^+n结中n区的掺杂浓度为$N_d=4\times10^{15}cm^{-3}$。当雪崩击穿发生时，不让耗尽区到达欧姆接触(穿通)的最小n区长度是多少(课件最终版pdf P28图)?

解：读图得$V_B\approx100V$

$$x_n \approx \left(\frac{2\varepsilon_s V_B}{qN_d}\right)^{1/2}$$

$$=\left(\frac{2\times11.7\times8.85\times10^{-14}\times100}{1.6\times10^{-19}\times4\times10^{15}}\right)^{1/2}$$

$$=5.69\times10^{-4}cm=5.69\mu m$$



第二章习题

◆第5-6讲

2.硅pn结的掺杂浓度为$N_d=N_a=10^{18}\text{cm}^{-3}$。发生齐纳击穿时的临界电场为$10^6\text{V/cm}$。设$n_i=1.5\times10^{10}\text{cm}^{-3}$，$\varepsilon_r=11.7$。求击穿电压的值(不忽略内建电势)。

解：

$$V_{bi}=(0.0259)\ln\left[\frac{(10^{18})(10^{18})}{(1.5\times10^{10})^2}\right]=0.933\text{ V}$$

$$E_{max}=\frac{eN_d x_n}{\epsilon_s}$$

$$10^6=\frac{(1.6\times10^{-19})(10^{18})x_n}{(11.7)(8.85\times10^{-14})}$$

$$x_n=6.47\times10^{-6}\text{ cm}$$

$$x_n=\left[\frac{2\epsilon_s(V_{bi}+V_R)}{e}\left(\frac{N_a}{N_d}\right)\left(\frac{1}{N_a+N_d}\right)\right]^{1/2}$$

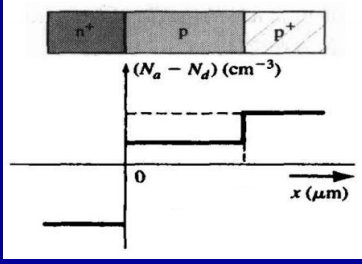
$$(6.47\times10^{-6})^2=\left[\frac{2(11.7)(8.85\times10^{-14})}{1.6\times10^{-19}}\times(V_{bi}+V_R)\left(\frac{10^{18}}{10^{18}}\right)\left(\frac{1}{10^{18}+10^{18}}\right)\right]$$

$$V_{bi}+V_R=6.468\text{ V}$$

$$V_R=5.54\text{ V}$$

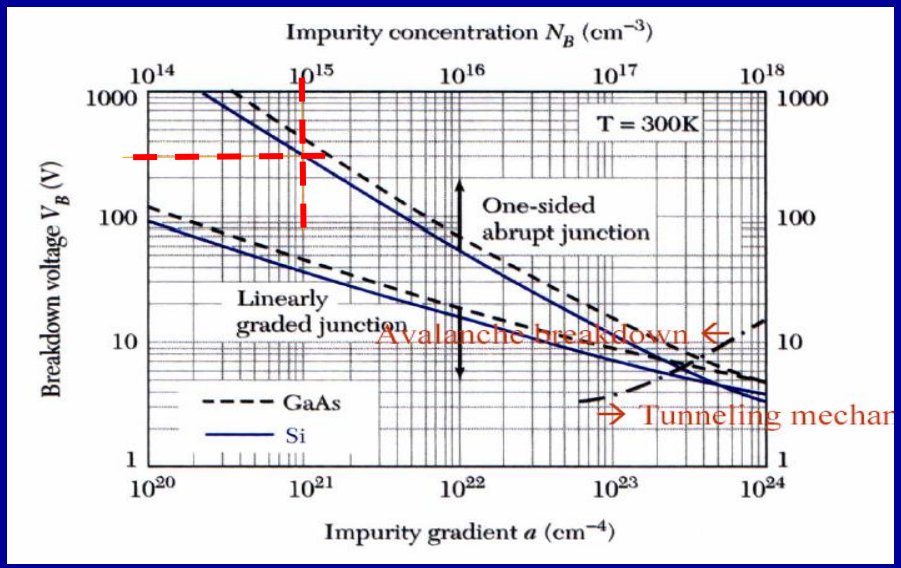
第二章习题

◆第5-6讲



3.二极管的掺杂曲线经常如图所示，即所谓的n^+pp^+二极管。反偏时，耗尽区必须处于p区内，以防止过早的击穿。p区的掺杂浓度为$10^{15}cm^{-3}$。ε_r=11.7。计算使耗尽区处于p区内并且不发生击穿的反偏电压，假设p区长度为(a)75μm、(b)150μm。确定每种情况下，是耗尽区最大宽度先产生还是击穿先产生(忽略内建电势)？(可以当成n^+p结构考虑)(课件最终版pdf P28图)

解：



对n^+p结

$$x_p = \left[\frac{2\epsilon_s (V_{bi} + V_R)}{eN_a}\right]^{1/2}$$

(1)
$$(75\times10^{-4})^2 = \frac{2(11.7)(8.85\times10^{-14})V_R}{(1.6\times10^{-19})(10^{15})}$$

$$V_R = 4.35\times10^3\ \text{V}$$

(2)
$$(150\times10^{-4})^2 = \frac{2(11.7)(8.85\times10^{-14})V_R}{(1.6\times10^{-19})(10^{15})}$$

$$V_R = 1.74\times10^4\ \text{V}$$

读图可知击穿电压在300V，因此(1)(2)问均先击穿

第二章习题

◆第5-6讲

4.硅PIN结的掺杂曲线如图“I”对应着理想本征区。本征区内没有杂质掺杂。给PIN结外加一个反偏电场，以使空间电荷区占据从-2μm到2μm的所有区域。(a)采用泊松方程计算出x=0处的电场，(b)画出PIN结电场随距离变化的曲线，(c)计算出外加反偏电压的大小。

解：(a)

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2}=-\frac{\rho(x)}{\epsilon_s}=-\frac{d\mathrm{E}(x)}{dx}$$

$$-2<x<-1\,\mu\,\mathrm{m},\ \rho(x)=+eN_d$$

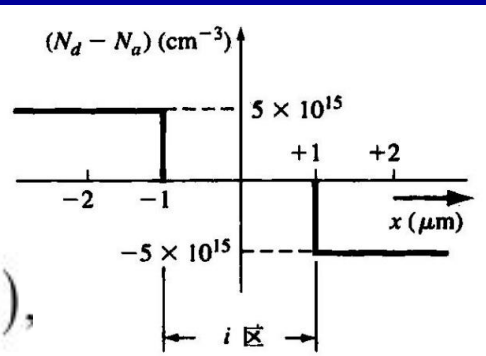
$$\frac{d\mathrm{E}}{dx}=\frac{eN_d}{\epsilon_s}\Rightarrow \mathrm{E}=\frac{eN_d x}{\epsilon_s}+C_1$$

$$x=-2\,\mu\,\mathrm{m}\equiv -x_O,\ \mathrm{E}=0$$

$$C_1=\frac{eN_d x_O}{\epsilon_s}$$

$$\mathrm{E}=\frac{eN_d}{\epsilon_s}(x+x_O)$$

$$x=0,\ \mathrm{E}(0)=\mathrm{E}(x=-1),$$



$$\mathrm{E}(0)=\frac{eN_d}{\epsilon_s}(-1+2)\times10^{-4}$$

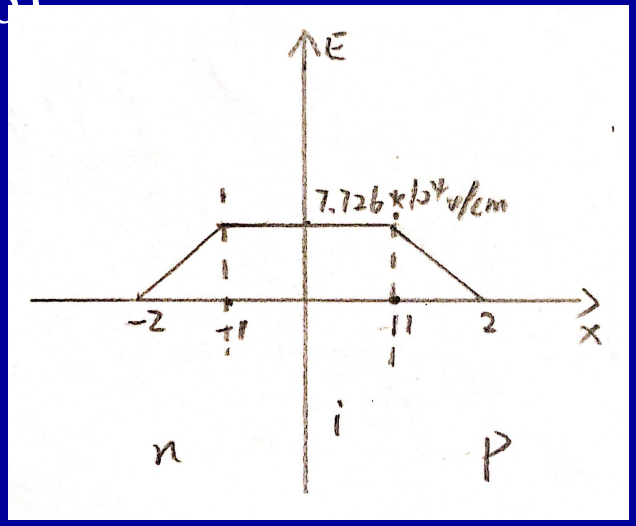
$$=\frac{(1.6\times10^{-19})(5\times10^{15})}{(11.7)(8.85\times10^{-14})}(1\times10^{-4})$$

$$\mathrm{E}(0)=7.726\times10^4\ \mathrm{V/cm}$$

第二章习题

◆第5-6讲

解：(b)



(c)在不考虑平衡时内建电势时，

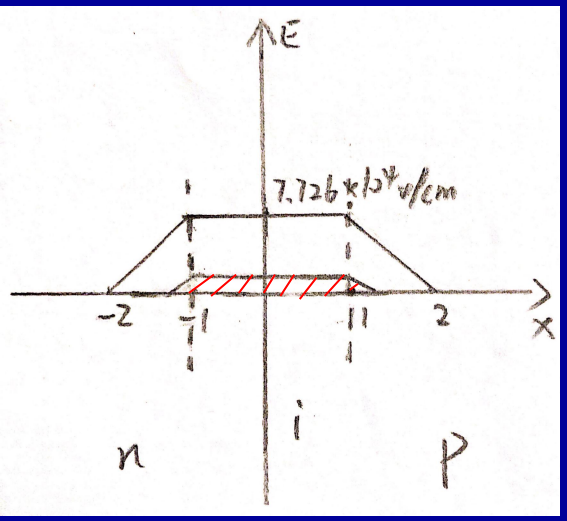
左图梯形面积即为外加反偏电压

$$V_R = (2+4)\times 7.726\times 10^4 \div 2 = 23.2V$$

在考虑热平衡内建电势时，原PN结V_D

$$V_{bi} = V_t \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right)$$

$$V_{bi} = 0.66V$$



$$x_p = \left\{\frac{2\varepsilon_s V_D}{q(N_a+N_d)}\right\}^{1/2}$$

$$= \left(\frac{2\times 11.7\times 8.854\times 10^{-14}\times 0.66}{1.6\times 10^{-19}\times 10^{16}}\right)^{1/2}$$

$$= 2.92\times 10^{-5} cm$$

$$E_{\max} = \frac{qN_a x_p}{\varepsilon_s} = 2.255\times 10^4 V/cm$$

$$V_D = E_{\max}\times x_i + V_D$$

$$= 4.51\text{V} + 0.66\text{V} = 5.17\text{V}$$

$$V_R = 23.2 - 5.17 = 18.03\text{V}$$

第二章习题

◆第5-6讲

5.考虑T=300K时的硅p^+n结。其扩散电容-正偏电流曲线的斜率为2.5×10^{-6}F/A。确定空穴的寿命以及正偏电流为1mA时的扩散电容值。(交流小信号下扩散电容)

解：对于p^+n结，$I_{P0}>>I_{n0}$，

$$C_d=\left(\frac{1}{2V_t}\right)\left(I_{pO}\tau_{pO}\right) \rightarrow \frac{\tau_{pO}}{2V_t}=2.5\times10^{-6}\ \text{F/A}$$

$$\tau_{pO}=2(0.0259)\left(2.5\times10^{-6}\right) \qquad \tau_{pO}=1.3\times10^{-7}\ \text{s}$$

$$C_d=\left(2.5\times10^{-6}\right)\left(10^{-3}\right) \qquad C_d=2.5\times10^{-9}\ \text{F}$$

第二章习题

◆第5-6讲

6.单边p^+n硅二极管掺杂浓度为$N_a=4\times10^{17}cm^{-3}$，$N_d=8\times10^{15}cm^{-3}$。二极管结面积为$A=5\times10^{-4}cm^2$。扩散电容最大值为1nF。设$n_i=1.5\times10^{10}cm^{-3}$，$D_p=10cm^2/s$，$\tau_{p0}=10^{-7}s$。确定二极管最大电流，最大正偏电压，扩散电阻。(交流小信号下扩散电容)

解：对于p^+n结，$I_{P0}>>I_{n0}$

$$C_d=\frac{I_{po}\tau_{p0}}{2V_t}$$

$$I_{po}=\frac{2V_t(C_d)}{\tau_{p0}}=\frac{2(0.0259)(10^{-9})}{10^{-7}}$$

$$=5.18\times10^{-4}\,A$$

$$I_{po}=0.518\,mA$$

$$r_d=\frac{V_t}{I_D}=\frac{0.0259}{0.518\times10^{-3}}=50\,\Omega$$

$$I_{po}=Ae\sqrt{\frac{D_p}{\tau_{p0}}}\cdot\frac{n_i^2}{N_d}\exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right)$$

$$0.518\times10^{-3}=(5\times10^{-4})(1.6\times10^{-19})\sqrt{\frac{10}{10^{-7}}}\times\frac{(1.5\times10^{10})^2}{8\times10^{15}}\exp\left(\frac{V_a}{V_t}\right)$$

$$V_a=(0.0259)\ln\left(\frac{0.518\times10^{-3}}{2.25\times10^{-14}}\right)$$

$$=0.618\,V$$

第二章习题

◆第5-6讲

7.T=300K时，正偏硅pn结二极管的最大小信号扩散电阻为r_d=32Ω。反向饱和电流为I_s=5×10^{-12}A。计算满足上述要求的最小正偏电压。

解：

$$r_d = \frac{V_t}{I_D} \Rightarrow I_D = \frac{V_t}{r_d} = \frac{0.0259}{32}$$

$$I_D = 8.09375\times10^{-4}\ \text{A}$$

$$V_a = V_t \ln\left(\frac{I_D}{I_s}\right)$$

$$= (0.0259)\ln\left(\frac{8.09375\times10^{-4}}{5\times10^{-12}}\right)$$

$$V_a = 0.4896\ \text{V}$$

第二章习题

◆第5-6讲

8.推导n^+n结内建电势。

解：设n+区浓度为N_{d1}，n区为N_{d2}

$$E_{F(n^+)} = E_i + kT\ln(N_{d1}/n_i)$$

$$E_{F(n)} = E_i + kT\ln(N_{d2}/n_i)$$

$$qV_D = E_{F(n^+)} - E_{F(n)}$$

$$V_D = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_{d1}}{N_{d2}}$$