Ch01

5 5. 证明：对于一个体心立方结构，其晶格常数 a 满足关系式 $a=\left(\frac{4r}{3}\right)^{\frac{1}{2}}$. 其中，$r$ 为原子半径.

此题有误

证 对BCC 有 $(4r)^2=(3a^2)$ 故 $a=\frac{2\sqrt{3}}{3}r$

8 8. 如果导带能级满足关系式：$E(1+\alpha E)=p^2/(2m_0)$，其中，α 为常数，m_0 为电子静质量，p 为动量，求其有效质量的表达式.

解: $\frac{d}{dp}(E(1+\alpha E))=\frac{d}{dp}\left(\frac{p^2}{2m_0}\right)=\frac{p}{m_0}$

即 $\frac{dE}{dp}+2\alpha E\frac{dE}{dp}=\frac{p}{m_0}$ $\therefore \frac{d^2E}{dp^2}+2\alpha\left(\frac{dE}{dp}\right)^2+2\alpha E\frac{d^2E}{dp^2}=\frac{1}{m_0}$

$\therefore (1+2\alpha E)\frac{d^2E}{dp^2}=\frac{1}{m_0}-\frac{2\alpha}{(1+2\alpha E)^2}\left(\frac{p}{m_0}\right)^2=\frac{(1+2\alpha E)^2m_0-2\alpha p^2}{(1+2\alpha E)^2m_0^2}$

$=\frac{(1+2\alpha E)^2m_0-4\alpha m_0E(1+\alpha E)}{(1+2\alpha E)^2m_0^2}=\frac{m_0}{(1+2\alpha E)^2m_0^2}=\frac{1}{(1+2\alpha E)^2}\frac{1}{m_0}$

$\therefore m_n^*=\left(\frac{d^2E}{dp^2}\right)^{-1}=(1+2\alpha E)^3m_0$

13. 13. (a) 求出一个速度为 10^7cm/s 的自由电子的德布罗意(de Broglie)波长；

(b) 在砷化镓中，导电电子的有效质量为 $0.063m_0$. 假如它们有相同的速度，求其德布罗意波长.

解: (a) $p=m_0v=\frac{h}{\lambda}$ $\therefore \lambda_0=\frac{h}{m_0v}$ 其中 $v=10^5$m/s

$\therefore \lambda_0=7.27\times10^{-9}$ m $=7.27$ nm

(b) $p=m_nv=0.063m_0v$ $\therefore \lambda_1=\frac{h}{0.063m_0v}=1.15\times10^{-7}$m

17 17. 已知一个硅样品的费米能级均匀地位于导带下方 0.2eV 处，计算：

(a) 电子和空穴密度；

(b) 掺杂浓度.

假设硅带隙宽度为 1.12eV，$T=300$K，导带有效态密度为 2.86×10^{19}cm^{-3}.

解 (a) $n=N_C\exp\left(-\frac{E_C-E_F}{kT}\right)=2.86\times10^{19}\exp\left(\frac{-0.2}{0.026}\right)=1.25\times10^{16}$ cm^{-3}

$\because n_i=1\times10^{10}$cm^{-3} $\therefore p=\frac{n_i^2}{n}=8\times10^3$ cm^{-3}

(b) $N_D-N_A\approx n_n=n-p=1.25\times10^{16}$ cm^{-3}

Ch02

5、 5. 对一未掺杂的半导体，$n_i=10^{10}/\mathrm{cc}$，$T=300\mathrm{K}$，$N_C=3\times10^{19}/\mathrm{cc}$，$N_V=2.5\times10^{19}/\mathrm{cc}$，$m_e=9.1\times10^{-32}\mathrm{kg}$，求：

(a) 价带中空穴的有效质量；

(b) 半导体的禁带宽度；

(c) 费米能级相对导带的 eV 值；

(d) 空穴的热速度.

解 (a) $\because N_V=2\left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$ $\therefore m_p=\left(\frac{N_V}{2}\right)^{\frac{2}{3}}\cdot\frac{h^2}{2\pi kT}=9.09\times10^{-31}\mathrm{kg}$

(b) $\because n_i^2=N_VN_C\exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$ $\therefore E_g=kT\ln\frac{N_VN_C}{n_i^2}=1.12\mathrm{eV}$

(c) $n=n_i=N_C\exp\left(-\frac{E_C-E_F}{kT}\right)$ $\therefore E_F-E_C=kT\ln\frac{n_i}{N_C}=-0.564\mathrm{eV}$

(d) $\frac{1}{2}m_pv_p^2=\frac{3}{2}kT$ $v_p=1.17\times10^5\ \mathrm{m/s}$

11、 11. 一个本征硅样品从一端掺杂了施主，而使得 $N_D=N_0\exp(-ax)$.

(a) 在 $N_D\gg n_i$ 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 $a=1\mu\mathrm{m}^{-1}$ 时的 $E(x)$.

解 (a) $J_n=J_{n扩}+J_{n漂}=0$ 即 $q\mu_nnE+qD_n\frac{dn}{dx}=0$

$\therefore \mu_nN_0\exp(-ax)\cdot E+D_n(-a)N_0\exp(-ax)=0$ 而 $D=\frac{kT}{q}\mu$

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

(b) $a=1\mu m^{-1}$ 则 $E=10^6\cdot0.0259\ \mathrm{V/m}=2.59\times10^4\ \mathrm{V/m}$

16、 16. 假定一 n 型半导体均匀地照光，而造成一均匀的过剩产生速率 G. 证明在稳态下，半导体电导率的改变为

$$\Delta\sigma=q(\mu_n+\mu_p)\tau_pG$$

解 对于n型半导体 $\Delta n=\Delta p=\tau_pG$

$\therefore \Delta\sigma=\Delta nq\mu_n+\Delta pnq\mu_p=q(\mu_p+\mu_n)\tau_pG$

Ch 03

6. 一突变硅 p-n 结($n_i=10^{10}\,\mathrm{cm}^{-3}$),p 区的受主掺杂浓度为 $N_A=10^{16}\,\mathrm{cm}^{-3}$,n 区的施主掺杂浓度为 $N_D=5\times10^{16}\,\mathrm{cm}^{-3}$.

(a) 计算此 p-n 结的内建电势;

(b) 当 V_a 为 0、0.5 以及 −2.5V 时,分别计算整个耗尽区的宽度;

(c) 当 V_a 为 0、0.5 以及 −2.5V 时,分别计算耗尽区内的最大电场;

(d) 当 V_a 为 0、0.5 以及 −2.5V 时,分别计算降落在 n 区一侧的电势.

6. 解: $n_i=10^{10}\ \mathrm{cm}^{-3}$ $\varepsilon_s=11.9$

(1) $V_{bi}=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_AN_D}{n_i^2}\approx0.756\,V$

(2) (3) (4)

$V_a=0$ 时 $W=\sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{N_A+N_D}{N_AN_D}\right)V_{bi}}=3.45\times10^{-7}\,m$

$E_m=\frac{2V_{bi}}{W}=4.38\times10^{6}\ V/m$

$\psi_n=\frac{N_A}{N_A+N_D}(V_a+V_{bi})\approx0.126\,V$

$V_a=0.5\,V$ $W=\sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{N_A+N_D}{N_AN_D}\right)(V_{bi}-V_a)}=2.01\times10^{-7}\,m$

$E_m=\frac{2(V_{bi}-V_a)}{W}=2.55\times10^{6}\,V/m$

$\psi_n=\frac{N_A}{N_A+N_D}(V_{bi}-V_a)\approx0.0427\,V$

$V_a=-2.5\,V$ $W=\sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{N_A+N_D}{N_AN_D}\right)(V_{bi}-V_a)}=7.17\times10^{-7}\,m$

$E_m=\frac{2(V_{bi}-V_a)}{W}=9.08\times10^{6}\,V/m$

$\psi_n=\frac{N_A}{N_A+N_D}(V_{bi}-V_a)\approx0.543\,V$

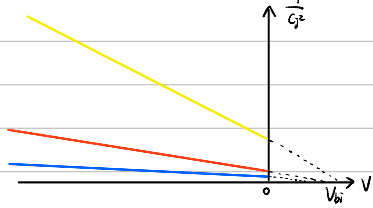
*7. 一突变 p-n 结在轻掺杂质 n 侧的掺杂浓度为 $10^{15}\,cm^{-3}$、$10^{16}\,cm^{-3}$ 或 $10^{17}\,cm^{-3}$ 而重掺杂质 p 侧为 $10^{19}\,cm^{-3}$. 求出一系列的 $1/C^2$ 对 V 的曲线，其中 V 的范围从 −4V 到 0，以 0.5V 为间距. 对于这些曲线的斜率及电压轴的交点提出注释.

7. 解: $V_{bi} = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2}$ $\quad N_A = 10^{19}\ cm^{-3}$ $\quad \frac{1}{C_j^2} = \frac{2(V_{bi}-V)}{q\varepsilon_s N_D}$

$N_D = 10^{15}\,cm^{-3}$ $\quad V_{bi} = 0.834\ V$ $\quad \frac{1}{C_j^2} = 1.19\times10^{8}(0.843-V)$ $\quad (m^4/C^2)$

$N_D = 10^{16}\,cm^{-3}$ $\quad V_{bi} = 0.893\ V$ $\quad \frac{1}{C_j^2} = 1.19\times10^{7}(0.893-V)$ $\quad (m^4/C^2)$

$N_D = 10^{17}\,cm^{-3}$ $\quad V_{bi} = 0.952\ V$ $\quad \frac{1}{C_j^2} = 1.19\times10^{6}(0.952-V)$ $\quad (m^4/C^2)$



- 曲线斜率的绝对值与轻掺杂的掺杂浓度成反比
- 曲线与电压轴的交点的值是内建电势 V_{bi}

13. 一理想硅 p-n 二极管，$N_D = 10^{18}\,cm^{-3}$，$N_A = 10^{16}\,cm^{-3}$，$\tau_p = \tau_n = 10^{-6}\,s$，且器件面积为 $1.2\times10^{-5}\,cm^2$.

(a) 计算在 300K 时饱和电流理论值；

(b) 计算在±0.7V 时的正向和反向电流.

13. $D = \frac{kT}{q}\mu$ $\quad L = \sqrt{D\tau}$ $\quad \mu_n = 1450\ cm^2/(V\cdot s)$ $\quad \mu_p = 505\ cm^2/(V\cdot s)$

解 (1) $J_s = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} = q n_i^2\left(\frac{1}{N_D}\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} + \frac{1}{N_A}\sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}}\right) \approx 9.2\times10^{-12}\,A/cm^{-2}$

$\therefore I_s = AJ_s \approx 1.10\times10^{-16}\,A$

(2) $I = I_s(e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$

$I|_{V=0.7V} \approx I_s \cdot e^{\frac{qV}{kT}} = 6.34\times10^{-5}\,A$

$I|_{V=-0.7V} \approx -I_s = 1.10\times10^{-16}\,A$

17. 对一理想突变 p^+-n 硅结，其 $N_D=10^{16}\,cm^{-3}$，当外加正向电压为 1V 时，找出中性 n 区每单位面积储存的少数载流子. 中性区的长度为 1μm，且空穴扩散长度为 5μm.

17 解：$Q=q\int_{x_n}^{x_0} P_{n0}\left(e^{\frac{qV}{kT}}-1\right)e^{-\frac{x-x_n}{L_p}}dx$

$=qP_{n0}\left(e^{\frac{qV}{kT}}-1\right)\int_0^L e^{-\frac{x}{L_p}}dx$ （$L=1\mu m$ 为中性区厚度）

$=q\frac{n_i^2}{N_D}\left(e^{\frac{qV}{kT}}-1\right)L_p\left(1-e^{-\frac{L}{L_p}}\right)$ （是否需线性近似

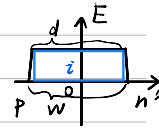
$=8.5\times10^{-3}\ C/cm^2$ $4.7\times10^{-3}\ C/cm^2$ ）

21. 假如砷化镓 $\alpha_n=\alpha_p=10^4\left(\frac{E}{4}\times10^5\right)^6 cm^{-1}$，其中 E 的单位为 V/cm，求下列情况下的击穿电压.

(a) p-i-n 二极管，其本征层宽度为 10μm；

(b) p^+-n 结，其轻掺杂端杂质浓度为 $2\times10^{16}\,cm^{-3}$.

21 解：(1) 若认为本征层宽度 $d\approx W$ 则 $W=10\mu m$

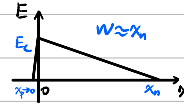


令 $\int_0^W \alpha\,dx=1$ 有 $\int_0^W 10^4\left(\frac{E}{4}\times10^5\right)^6 dx=1$

则 $E=\frac{4}{\sqrt[6]{10}}\times10^5\ cm/V=2.73\times10^5\ cm/V$

$V_B\approx E\cdot W=273\ V$

(2) 对 p^+-n 结 可近似 $W=x_n$



即认为E仅存在于 x_n 侧

$V_B=\frac{E_cW}{2}=\frac{\varepsilon_s E_c^2}{2q}N_B^{-1}$ $E=E(x)=E_c\left(1-\frac{x}{W}\right)$

令 $\int_0^W \alpha\,dx=\int_0^W 10^4\left(\frac{E(x)}{4}\times10^5\right)^6 dx=1$

有 $\int_0^W 10^4\left(E_c\frac{1-\frac{x}{W}}{4}\times10^5\right)^6 dx=1$ 故 $\frac{10^{-26}}{7\times4^6}\times E_c^6W=1$

而 $\frac{dE}{dx}=\frac{qN_B}{\varepsilon_s}$ 即 $\frac{E_c}{W}=\frac{qN_B}{\varepsilon_s}$ $W=E_c\frac{\varepsilon_s}{qN_B}$

$\therefore\ \frac{10^{-26}}{7\times4^6}\times E_c^7\frac{\varepsilon_s}{qN_B}=1$ 代入数据 $E_c=5.0\times10^5\ V/cm$

$\therefore\ V_B=\frac{E_cW}{2}=\frac{E_c^2\varepsilon_s}{2qN_B}$ 取 $\varepsilon_s=13$ 有 $V_B=45V$

Ch 04

4. 一个硅 p-n-p 晶体管的发射区、基区、集电区掺杂浓度分别为 $5\times10^{18}\,cm^{-3}$，$2\times10^{17}\,cm^{-3}$ 和 $10^{16}\,cm^{-3}$，基区宽度为 1.0μm，器件截面积为 0.2mm². 当射基结正向偏置在 0.5V 且集基结反向偏置在 5V 时，计算：

(a) 中性基区宽度；

(b) 射基结处的少数载流子浓度.

解 (1) 射基结 $V_{bi,1} = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.952\ V$

$$x_{n_1} = \frac{N_A}{N_A+N_D}\sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\frac{N_A+N_D}{N_A N_D}(V_{bi,1}-V_{EB})} = 53.5\ nm \quad (V_{EB}=0.5V)$$

集基结 $V_{bi,2} = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.794\ V$

$$x_{n_2} = \frac{N_A}{N_A+N_D}\sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\frac{N_A+N_D}{N_A N_D}(V_{bi,2}-V_{CB})} = 42.6\ nm \quad (V_{CB}=-5V)$$

$\therefore W = W_B - x_{n_1} - x_{n_2} = 904\ nm$

(2) 发射区 $n_{E0} = \frac{n_i^2}{N_A}$

$$n_E(-x_E) = n_{E0}\exp\left(\frac{V_{EB}}{kT}\right) = 4.67\times10^{9}\ cm^{-3}$$

基区 $p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}$

$$p_n(0) = p_{n0}\exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right) = 1.17\times10^{11}\ cm^{-3}$$

5. 对习题 4 中的晶体管，其发射区、基区、集电区中少数载流子的扩散系数分别为 $52cm^2/s$、$40cm^2/s$ 和 $115cm^2/s$，对应各区寿命分别为 $10^{-8}s$、$10^{-7}s$ 和 $10^{-6}s$. 求出图 4.5 中的各电流分量（I_{Ep}、I_{Cp}、I_{En}、I_{Cn} 和 I_{BB}）.

5 解 $A = 0.2mm^2$ $V_{EB} = 0.5V$ $L = \sqrt{D\tau}$

$$I_{Ep} = \frac{qAD_p p_{n0}}{W}\exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right) = \frac{qAD_p p_n(0)}{W} = 1.66\times10^{-5}A$$

$$I_{Cp} \approx I_{Ep} = 1.66\times10^{-5}A$$

$$I_{En} = \frac{qAD_E n_{E0}}{L_E}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}-1\right) \approx qAn(-x_E)\sqrt{\frac{D_E}{\tau_E}} = 1.08\times10^{-7}A$$

$$I_{Cn} = \frac{qAD_C n_{C0}}{L_C} = \frac{qAD_C n_i^2}{L_C N_{AC}} = 3.20\times10^{-14}A$$

$$I_{BB} = I_{Ep} - I_{Cp} \approx 0$$

（或由 T_{11} $I_{BB} = \frac{W_B^2}{2L_p^2}I_{Ep} = \frac{W_B^2}{2D_p\tau}I_{Ep} = 2.08\times10^{-8}A$）

6. 利用习题 4 和习题 5 所得到的结果，（括号内为题 5 中 I_{EB} 结果作答）

(a) 求出晶体管的端电流 I_E、I_C 和 I_B；

(b) 计算发射极效率、基区输运系数、共基电流增益和共射电流增益；

(c) 讨论如何改善发射极效率以及基区输运系数.

6.解 (a) $I_E = I_{Ep} + I_{En} \approx 1.67\times10^{-5}A$

$I_C = I_{Cp} + I_{Cn} \approx 1.66\times10^{-5}A$

$I_B = I_C - I_E = I_{En} - I_{Cn} + I_{EB} = 1.08\times10^{-7}A$ $\quad (1.29\times10^{-7}A)$

(b) $\gamma = \frac{I_{Ep}}{I_E} \approx 0.994$

$\alpha_T = \frac{I_{Cp}}{I_{Ep}} \approx 1.000$ $\quad$ (0.999，由 T11 $\alpha_T = 1 - \frac{W_B^2}{2L_p^2}$ 得到)

$\alpha_0 = \gamma\alpha_T \approx 0.994$ $\quad$ (0.993)

$\beta_0 = \frac{\alpha_0}{1-\alpha_0} = 166$ $\quad$ (142)

(c) 改善发射极效率 γ：相对基区，进一步提高发射区的掺杂浓度

改善基区输运系数 α_0：进一步减小基区宽度

9. 假设晶体管工作在放大模式且 $p_n(0) \gg p_{n0}$，推导总的过剩少数载流子电荷 Q_B 的表达式. 请解释为何电荷量可以近似于图 4.6 中所示基极中的三角形面积，此外请利用习题 4 的参数求出 Q_B.

解 $Q_B = qA\int_0^W (p_n(x) - p_{n0})\,dx = qA\int_0^W [p_n(0)(1-\frac{x}{W}) - p_{n0}]\,dx$

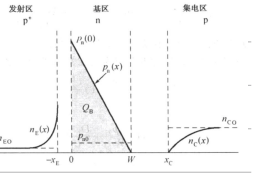
$= \frac{qAW[p_n(0) - 2p_{n0}]}{2}$ 而 $p_n(0) \gg p_{n0}$

$\therefore Q_B = \frac{1}{2}qAWp_n(0)$

可以在图中这么认为：$p_n(0) \gg p_{n0}$

因而 p_{n0} 虚线实际很低，Q_B 便近似为三角形面积

由 T4 有 $Q_B \approx 1.69\times10^{-15}$ C



10. 利用习题 9 所推导出的 Q_B 的表达式，证明式(27)的集电极电流可以近似为 $I_C \approx \left(\frac{2D_p}{W^2}\right)Q_B$.

10、证明 将式(27)重写如下

$$I_C = a_{21}\exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right) + a_{22} - a_{21}$$

即 $I_C = \frac{qAD_p}{W} p_{n0}\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right) + I_{Cn}$ 而 $I_{Cn} \ll I_{Cp} \approx I_C$

$$\therefore I_C \approx \frac{qAD_p}{W} p_{n0}\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right) = \frac{2D_p}{W^2}\cdot\frac{1}{2}qAWq_n(0) = \frac{2D_p}{W^2}Q_B$$

即 $I_C \approx \left(\frac{2D_p}{W^2}\right)Q_B$

11. 证明基区输运系数 α_T 可以简化为 $1-\left(\frac{W^2}{2L_p^2}\right)$.

11、证明 $\alpha_T = \frac{I_{Cp}}{I_{Ep}}$ 而

$$\begin{cases} I_{Cp} = A\left(-qD_p\frac{dp_n}{dx}\Big|_{x=0}\right) \\ I_{Ep} = A\left(-qD_p\frac{dp_n}{dx}\Big|_{x=W}\right) \\ p_n(x) = p_{n0}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}-1\right)\frac{\sinh\left(\frac{W-x}{L_p}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_p}\right)} + p_{n0}\left(1-\frac{\sinh\left(\frac{x}{L_p}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_p}\right)}\right) \end{cases}$$

$$\frac{dp_n}{dx} = p_{n0}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}-1\right)\frac{\cosh\left(\frac{W-x}{L_p}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_p}\right)}\cdot\left(-\frac{1}{L_p}\right) + p_{n0}\frac{\cosh\left(\frac{x}{L_p}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_p}\right)}\left(-\frac{1}{L_p}\right) \approx -p_{n0}e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}\frac{\cosh\left(\frac{W-x}{L_p}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_p}\right)}\frac{1}{L_p}$$

$$\therefore \alpha_T = \frac{\frac{dp_n}{dx}\Big|_{x=W}}{\frac{dp_n}{dx}\Big|_{x=0}} = \frac{\cosh(0)}{\cosh\left(\frac{W}{L_p}\right)} = \frac{2}{e^{\frac{W}{L_p}}+e^{-\frac{W}{L_p}}} = \frac{2}{e^{x}+e^{-x}}\Bigg|_{x=\frac{W}{L_p}\ll 1} \approx f(0)+f'(0)x+\frac{f''(0)}{2}x^2 = 1-\frac{W^2}{2L_p^2}$$

即 $\alpha_T \approx 1-\frac{W^2}{2L_p^2}$

12. 一 p-n-p 晶体管有如下特性. 掺杂：$N_E=10N_B$，$N_B=10N_C$，$N_C=10^{16}\,cm^{-3}$；中性区宽度：$W_E=W_B=0.1L_B=5\times10^{-5}$ cm，$W_C=500W_B$；少子扩散系数：$D_E=D_B=0.25D_C=50cm^2/s$；少子扩散长度：$L_E=0.5L_B=10L_C$. 基于以上数据，计算：

(a) 发射效率；

(b) 基区输运系数；

(c) 截止频率 f_T.

12. 解：(1) 由于 $W_E=0.2L_E<L_E$ 故发射区少数载流子近似线性分布

$$\therefore I_{En}=Aq\left(-D_E\frac{dn_E}{dx}\right|_{x=-x_E})=\frac{qAD_E n_{E0}}{W_E}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}-1\right)\approx\frac{qAD_E n_{E0}}{W_E}e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}$$

$$\therefore \gamma=\frac{I_{Ep}}{I_{En}+I_{Ep}}=\frac{\frac{qAD_B p_{n0}}{W_B}\exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right)}{\left(\frac{qAD_E n_{E0}}{W_E}+\frac{qAD_B p_{n0}}{W_B}\right)\exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right)}=\frac{\frac{D_B p_{n0}}{W_B}}{\frac{D_E n_{E0}}{W_E}+\frac{D_B p_{n0}}{W_B}}=\frac{1}{1+\frac{D_E}{D_B}\frac{N_E}{N_B}\frac{W_B}{W_E}}$$

$$\therefore \gamma=\frac{1}{1+1\times\frac{1}{10}\times1}=0.909$$

(2) $\alpha_T\approx1-\frac{W_B^2}{2L_B^2}=0.995$

(3) $f_T=\frac{1}{2\pi\tau_T}\approx\frac{1}{2\pi\tau_B}=\frac{D_B}{\pi W_B^2}=\frac{50}{\pi\times5\times10^{-10}}=6.37$ GHz

13. 若发射极效率非常接近 1，请证明共射电流增益 β_0 可表示为 $\frac{2L_p^2}{W^2}$.

13. 证：由 11 有 $\alpha_T=1-\frac{W^2}{2L_p^2}$ 而 $\beta_0=\frac{\alpha_0}{1-\alpha_0}$，$\gamma\simeq1$

$\therefore \alpha_0=\gamma\alpha_T\simeq\alpha_T$ $\therefore \beta_0=\frac{\alpha_0}{1-\alpha_0}=\frac{\alpha_T}{1-\alpha_T}=\frac{2L_p^2}{W^2}-1$

而一般 $\frac{2L_p^2}{W^2}>>1$ $\therefore \beta_0\simeq\frac{2L_p^2}{W^2}$

16. 一利用离子注入形成的 n-p-n 晶体管，其中性基区的净掺杂浓度为 $N(x)=N_{A0}e^{-\frac{x}{l}}$，其中 $N_{A0}=2\times10^{18}cm^{-3}$，$l=0.3\mu m$.

(a) 求出中性基区单位面积上的杂质；

(b) 若中性基区宽度为 $0.8\mu m$，求出中性基区的平均掺杂浓度.

16 解：认为 $W_B=0.8\,\mu m$

(a) 单位面积上的杂质 对 $N(x)$ 作积分 $N(x)=N_{A0}e^{-\frac{x}{l}}$

$$\int_0^W N(x)\,dx=\int_0^W N_{A0}e^{-\frac{x}{l}}dx=N_{A0}\cdot l\left(1-e^{-\frac{W}{l}}\right)$$

$$=2\times10^{18}\times3\times10^{-7}\times\left(1-e^{-\frac{8}{3}}\right)=5.583\times10^{11}\ cm^{-2}$$

(b) $\bar{N}_B=\frac{\int_0^W N(x)\,dx}{W}=6.979\times10^{17}\ cm^{-3}$

17. 参考习题 16，若 $L_E=1\mu m$，$N_E=10^{19}\ cm^{-3}$，$D_E=1cm^2/s$，基区中的平均寿命为 $10^{-6}s$，基区中的平均扩散系数由习题 16 中的掺杂浓度决定，求出共射电流增益.

17. 解：由 T15 基区 $\mu_n=88+\frac{1252}{1+0.374\times10^{-17}N}$ 有 $\mu_p=301.2\ cm^2/(V\cdot s)$

而 $\frac{D_n}{\mu_n}=\frac{kT}{q}$ ∴ $D_n=\frac{kT}{q}\cdot\mu_n=7.79\ cm^2/s$

∴ $\gamma=\frac{1}{1+\frac{D_B}{D_p}\cdot\frac{\overline{N_B}}{N_E}\cdot\frac{W_B}{L_E}}=\frac{1}{1+\frac{1}{7.77}\times\frac{6.97\times10^{-2}}{10^{-2}}\times\frac{0.8}{1}}=0.9929$

$\alpha_T=1-\frac{W_B^2}{2L_B^2}=1-\frac{W_B^2}{2D_p\tau}=1-\frac{0.8^2\times10^{-8}}{2\times7.77\times10^{-6}}=0.9996$

∴ $\beta_0=\frac{\alpha_0}{1-\alpha_0}=\frac{\gamma\alpha_T}{1-\gamma\alpha_T}=131.9$

20. 根据基本的埃伯斯-摩尔模型(Ebers-Moll model)[J. J. Ebers and J. L. Moll, "Large-Single Behavior of Junction Transistors," *Proc. IRE.*, 42, 1761, 1954]，发射极和集电极电流的一般性方程为

$$(26)\begin{cases}I_E=I_{FO}(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}-1)-\alpha_R I_{RO}(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}}-1),\\ I_C=\alpha_F I_{FO}(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}-1)-I_{RO}(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}}-1).\end{cases}$$

其中 α_F 和 α_R 分别为正向共基电流增益(forward common-base current gain)和反向共基电流增益(reverse common-base current gain)，I_{FO} 和 I_{RO} 分别为正常正向和反向偏压二极管饱和电流. 请以式(25)、式(26)、式(28)、式(29)中的常数来表示 α_F 和 α_R.

20. 解：将式25,26,28,29,32 重写于下

$$I_E=a_{11}(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}-1)-a_{12}(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}}-1)\begin{cases}a_{11}=qA\left(\frac{D_pP_{n0}}{W}+\frac{D_En_{E0}}{L_E}\right)\\ a_{12}=qA\frac{D_pP_{n0}}{W}\end{cases}$$

$$I_C=a_{21}(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}-1)-a_{22}(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}}-1)\begin{cases}a_{21}=\frac{qAD_pP_{n0}}{W}\\ a_{22}=qA\left(\frac{D_pP_{n0}}{W}+\frac{D_cn_{C0}}{L_C}\right)\end{cases}$$

与题中式(26)对比，有 $\begin{cases}I_{FO}=a_{11}\\ \alpha_F I_{FO}=a_{21}\end{cases}$ $\begin{cases}I_{RO}=a_{22}\\ \alpha_R I_{RO}=a_{12}\end{cases}$

$$\therefore\begin{cases}\alpha_F=\frac{a_{21}}{a_{11}}=\gamma=\frac{1}{1+\frac{D_E}{D_p}\cdot\frac{n_{E0}}{P_{n0}}\cdot\frac{W}{L_E}}\\ \alpha_R=\frac{a_{12}}{a_{11}}=\frac{1}{1+\frac{D_C}{D_p}\cdot\frac{n_{C0}}{P_{n0}}\cdot\frac{W}{L_C}}\end{cases}$$

24. 一硅晶体管，其 $D_p=10cm^2/s$，$W=0.5\mu m$，共基电流增益 α_0 为 0.998，试求出其截止频率. 可忽略发射极和集电极延迟.

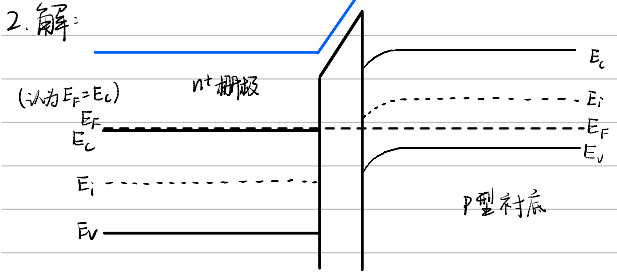
24. 解：$\tau_B=\frac{W^2}{2D_p}=\frac{(0.5\times10^{-4})^2}{2\times10}=1.25\times10^{-10}s$

则 $f_T=\frac{1}{2\pi\tau_B}=1.273\ GHz$

Ch 05

2. 试画出 $V_G=0$ 时，由 p 型衬底和 n^+ 多晶硅栅极构成的 MOS 电容器的能带图.

2. 解：



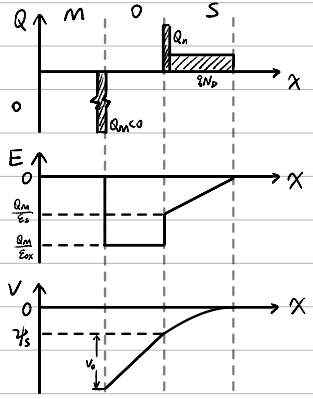
4. 考虑一 n 型衬底理想 MOS 电容器在反型状态下，请画出：

(a) 电荷分布；

(b) 电场分布；

(c) 电势分布.

4. 解：



$$\frac{dE}{dx}=\frac{\rho}{\varepsilon_{rs}}$$

6. 一理想 Si-SiO_2 MOS 电容器参数如下：$d=30\text{nm}$，$n_i=1.45\times10^{10}\text{cm}^{-3}$，$\varepsilon_{si}=11.9\,\varepsilon_0$，$\varepsilon_{ox}=3.9\,\varepsilon_0$，$N_A=5\times10^{15}\text{cm}^{-3}$，求在 $T=300\text{K}$ 时，发生强反型时界面处所需要的电场.

6. 解：

$$W_m=2\sqrt{\frac{\varepsilon_{si}kT\ln(\frac{N_A}{n_i})}{q^2N_A}}$$

$$2\psi_s=\frac{1}{2}E_{si}W_m=2\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

$$\Rightarrow E_{si}=2\sqrt{\frac{N_A kT}{\varepsilon_{si}}\ln\frac{N_A}{n_i}}=3.17\times10^6\,V/m$$

$\because D=\varepsilon_{ox}E_{ox}=\varepsilon_{si}E_{si}$ $\quad\therefore E_{ox}=\frac{\varepsilon_{si}}{\varepsilon_{ox}}E_{si}=9.66\times10^6\,V/m$

9. 考虑两个 MOS 器件，除了氧化层厚度以外，其余均相同. 高频 C-V 测量产生的 C_{max}/C_{min} 比分别为 3 和 2. 基于这个数据，若 $\varepsilon_{si}=11.9\varepsilon_0$，$\varepsilon_{ox}=3.9\varepsilon_0$，求这两种器件的氧化层厚度的比值.

9 解：

$$C_{max}=C_0 \qquad C_{min}=\frac{C_0}{1+\frac{\varepsilon_{ox}}{\varepsilon_{si}}\frac{W_m}{d}} \qquad \therefore \frac{C_{max}}{C_{min}}=1+\frac{\varepsilon_{ox}}{\varepsilon_{si}}\frac{W_m}{d}$$

W_m 也是相同的

$$\therefore\begin{cases}1+\frac{\varepsilon_{ox}}{\varepsilon_{si}}\frac{W_m}{d_1}=3\\1+\frac{\varepsilon_{ox}}{\varepsilon_{si}}\frac{W_m}{d_2}=2\end{cases} \qquad \therefore \frac{d_1}{d_2}=\frac{1}{2}$$

13. 假设氧化层中的陷阱电荷呈三角形分布，$\rho_{ot}(y)=q\times(5\times10^{23}\times y)\text{cm}^{-3}$，氧化层的厚度为 10nm. 试计算因 Q_{ot} 所导致的平带电压变化.

13. 解：

$$\Delta V_{FB}=-\int_0^d\frac{y\rho(y)dy}{\varepsilon_{ox}}=-\int_0^d\frac{q\times5\times10^{23}y^2\,dy}{3.9\,\varepsilon_0}$$

$$=-\frac{1}{3}\times\frac{qd^3}{3.9\varepsilon_0}\times5\times10^{23} \qquad d=10\times10^{-7}\text{cm}$$

$$=-7.73\times10^{-2}\,V$$

14. 假设 $V_D\ll V_G-V_T$，试根据课本中公式(35)推导公式(36).

14. 将式(35)重写如下

$$I_D\approx\frac{Z}{L}\mu_nC_0\left\{(V_G-2\psi_B-\frac{V_D}{2})V_D-\frac{2}{3}\frac{\sqrt{2\varepsilon_{si}qN_A(2\psi_B)}}{C_0}\cdot2\psi_B\left[(1+\frac{V_D}{2\psi_B})^{\frac{3}{2}}-1\right]\right\}$$

由于 $V_D\ll V_G-V_T$ 则也有 $V_D\ll2\psi_B$ 即 $\frac{V_D}{2\psi_B}\ll1$

$$\therefore I_D\approx\frac{Z}{L}\mu_nC_0\left[(V_G-2\psi_B-\frac{V_D}{2})V_D-\frac{2}{3}\frac{\sqrt{2\varepsilon_{si}qN_A(2\psi_B)}}{C_0}2\psi_B\cdot\frac{3}{2}\frac{V_D}{2\psi_B}\right]$$

$$=\frac{Z}{L}\mu_nC_0\left[V_G-(\frac{\sqrt{2\varepsilon_{si}qN_A(2\psi_B)}}{C_0}+2\psi_B)-\frac{V_D}{2}\right]V_D \qquad 而\ V_T=2\psi_B+\frac{\sqrt{2\varepsilon_{si}qN_A(2\psi_B)}}{C_0}$$

$$\therefore I_D\approx\frac{Z}{L}\mu_nC_0(V_G-V_T-\frac{V_D}{2})V_D \qquad (V_D\ll V_G-V_T) \qquad 即式(36)$$

由于 $V_D\ll V_G-V_T$ $\therefore V_G-V_T-\frac{V_D}{2}\approx V_G-V_T$ $\quad\therefore I_D\approx\frac{Z}{L}\mu_nC_0(V_G-V_T)V_D$ 即式(36a)

17. 对于一亚微米 MOSFET，$L=0.25\mu m$，$Z=5\mu m$，$N_A=10^{17}cm^{-3}$，$\mu_n=500cm^2/(V\cdot s)$，$C_o=3.45\times10^{-7}F/cm^2$ 且 $V_T=0.5V$，计算 $V_G=1V$ 与 $V_D=0.1V$ 时的沟道电导.

18. 对习题 17 中的器件，计算其跨导.

解：17 $V_D=0.1<V_G-V_T=0.5V$

$\therefore g_D=\frac{\partial I_D}{\partial V_D}\approx\frac{Z}{L}\mu_n C_o(V_G-V_T-V_D)=1.38\times10^{-3}S$

18 $g_m=\frac{\partial I_D}{\partial V_G}\approx\frac{Z}{L}\mu_o C_o V_D=3.45\times10^{-4}S$

22. 一 p 沟道的 n^+ 多晶硅-SiO_2-Si MOSFET，其中 $N_D=10^{17}cm^{-3}$，$Q_f/q=5\times10^{10}cm^{-2}$ 且 $d=10nm$，计算其阈值电压.

23. 对习题 22 中的器件，注入硼离子使阈值电压减少至 $-0.7V$，假设注入的离子在 Si-SiO_2 的界面处形成一薄层负电荷，计算注入的硼离子剂量.

解：22. n^+区 $E_F\approx E_c$ $\therefore \psi_{ms}=-(\frac{E_g}{2}-\psi_B)$

而 $\psi_B=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_D}{n_i}=0.418V$ $E_g=1.12eV$ $\therefore \psi_{ms}=-0.142V$

又 $C_o=\frac{\varepsilon_{ox}}{d}$ $\therefore V_{FB}=\psi_{ms}-\frac{Q_f}{C_o}=\psi_{ms}-\frac{Q_f d}{\varepsilon_{ox}}=-0.165V$

$\therefore V_T=V_{FB}-2\psi_B-\frac{\sqrt{2\varepsilon_s qN_D(2\psi_B)}}{C_o}$

$=-0.165-2\times0.418-0.487=-1.489V$

23. 注入硼离子量为 n_B 并且注入在 $x=d$ 处

$\Delta V_T=-1.489-(-0.7)=-0.789V$

而 $\Delta V_T=\Delta V_{FB}=-\frac{qn_B}{C_o}$

$\therefore n_B=-\frac{C_o}{q}\cdot\Delta V_T=-\frac{\varepsilon_{ox}}{qd}\Delta V_T=1.70\times10^{12}cm^{-3}$

26. 一 MOSFET 的阈值电压 $V_T=0.5V$，亚阈值摆幅为 100mV/decade，且在栅极偏压为 V_T 时漏极电流为 $0.1\mu A$. 请问在 $V_G=0$ 时的亚阈值漏电流为多少？

26 解：$S=0.1V/decade$

$\frac{V_T-V_G}{S}=5=\lg\frac{i_D|_{V_G=V_T}}{i_D|_{V_G=0}}=\lg\frac{0.1\mu A}{i_D|_{V_G=0}}$

$\therefore i_D=10^{-12}A=1pA$

Ch06

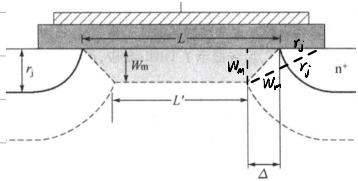
2. 在一 n 沟道 MOSFET 中，$N_A=3\times10^{16}\,\mathrm{cm}^{-3}$，$L=1\mu\mathrm{m}$，$r_j=0.3\mu\mathrm{m}$，栅氧厚度 $t_{ox}=2\mathrm{nm}$，$\varepsilon_{ox}=3.9\varepsilon_0$，$T=300\mathrm{K}$. 假设 $W_m=0.18\mu\mathrm{m}$，计算由于短沟道效应引起的阈值电压漂移.

解：

$$\Delta V_T = -\frac{qN_AW_m}{C_0}\cdot\frac{\Delta}{L}$$

$$= -\frac{qN_AW_m}{C_0}\cdot\frac{\sqrt{(W_m+r_j)^2-W_m^2}-r_j}{L}$$

$$= -\frac{qN_AW_m}{C_0}\cdot\frac{r_j}{L}\cdot\left(\sqrt{1+\frac{2W_m}{r_j}}-1\right)$$



即书式(1)

$$C_0=\frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}}=\frac{3.9\varepsilon_0}{t_{ox}}$$ 并代入数据有 $\Delta=0.145\mu\mathrm{m}$

$$\Delta V_T=-7.26\times10^{-3}\ \mathrm{V}$$

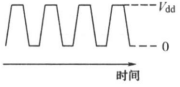
8. 如图 6.14 所示的 CMOS 反相器. 如果一个电压波形(V_{in})被施加到 CMOS 反相器的输入端上：

(a) 画出相应输出电压(V_{out})的示意图；

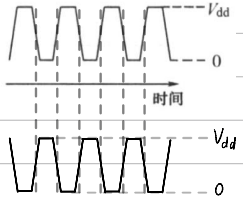
(b) NMOS 和 PMOS 在相应的标记点 A、B、C、D 以及 C 和 D 之间各是什么状态？

(c) 如果 n 沟道 MOSFET 和 p 沟道 MOSFET 的阈值电压分别是 V_{tn} 和 V_{tp}，指出在下面参数下 NMOS 从线性区到达饱和区的临界点：对于 n 沟道 MOSFET：$\mu_{ns}C_0(Z/L)=20\mathrm{mA/V^{-2}}$ 且 $V_{tn}=2\mathrm{V}$；对于 p 沟道 MOSFET：$\mu_{ps}C_0(Z/L)=20\mathrm{mA/V^{-2}}$ 且 $V_{tp}=1\mathrm{V}$.

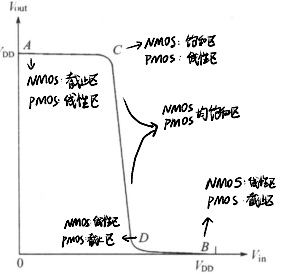
($|V_{tp}|=1V$, $V_{tp}=-1V$)



解：(a)



(b)



(c) PMOS 处在饱和区(临界) $\therefore i_{ds}=\frac{\mu_{ps}C_0Z}{2L}(V_{in}-V_{DD}-V_{tp})^2$ 令 $V_{in}=4V$?

NMOS 处在线性区(临界) $\therefore i_{ds}=\frac{\mu_{ns}C_0Z}{2L}(V_{in}-V_{tn})^2$

$(V_{in}-V_{in}-\frac{V_{out}}{2})V_{out}\approx0$

$\therefore (V_{in}-4)^2=(V_{in}-2)^2 \Rightarrow V_{in}=3V$ 为临界点

T18.

	单元尺寸	单字节写入速率	重写次数	掉电下的数据保持	应用
SRAM	大	高速(最快)	无上限	不保持	封装在芯片上内存
DRAM	中	高速	无上限	不保持	外置内存
Flash	小(最小)	低速	有限次	保持	U盘等存储

Ch07

1. 假设金属的功函数为 4.55eV，半导体的电子亲和能为 4.01eV，$N_D=2\times10^{16}\,cm^{-3}$，温度为 300K. 计算零偏压时金属-半导体二极管的势垒高度和内建电势的理论值.

1. 解：$q\varphi_{Bn}=q\varphi_m-q\chi \Rightarrow \varphi_{Bn}=0.54\,V$ 为势垒高度

由 $n=N_c\exp\left(\frac{-qV_n}{kT}\right)$ 而 $n\approx N_D$

$\therefore V_n=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_c}{N_D}=0.19\,V$

$\therefore V_{bi}=\varphi_{Bn}-V_n=0.35\,V$ 为内建电势

4. 将铜淀积于精心准备的 n 型硅衬底上，形成理想的肖特基二极管. $\varphi_m=4.65eV$，电子亲和能为 4.05eV，$N_D=3\times10^{16}\,cm^{-3}$，$T=300K$. 计算零偏压时的势垒高度、内建电势、耗尽层宽度以及最大电场.

4. 解：$\varphi_{Bn}=\varphi_m-\chi=0.60\,V$ 为势垒高度

$V_n=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_c}{N_D}=0.18\,V$

$\therefore V_{bi}=\varphi_{Bn}-V_n=0.42V$ 为内建电势

$\frac{qN_DW^2}{2\varepsilon_s}=V_{bi} \Rightarrow W=\sqrt{\frac{2\varepsilon_sV_{bi}}{qN_D}}=136\,nm$

$E_m=\frac{2V_{bi}}{W}=6.2\times10^6\,V/m$

*5. 已知一个由金(Au)和 n-型砷化镓构成的肖特基势垒二极管的电容满足关系式 $1/C^2=1.57\times10^5-2.12\times10^5V_a$. 其中，C 的单位为 μF，$V_a$ 的单位为 V. 若二极管面积为 $10^{-1}\,cm^2$，计算内建电势、势垒高度、砷化镓的掺杂浓度及其功函数.

5. 解：$\frac{S^2}{C^2}=\frac{2(V_{bi}-V)}{q\varepsilon_sN_D}=1.57\times10^5-2.12\times10^5V\quad(\mu F^{-2})$

则 $V_{bi}=\frac{1.57}{2.12}=0.74\,V$ 为内建电势

$\frac{-2}{q\varepsilon_sN_DS}=-2.12\times10^5\times10^{12}\quad(S=10^{-5}\,m^2)$

$\therefore N_D=5.59\times10^{21}\,m^{-3}=5.59\times10^{16}\,cm^{-3}$ 为掺杂浓度

$V_n=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_c}{N_D}=0.06\,V$

$\therefore \varphi_{Bn}=V_{bi}+V_n=0.80\,V$ 为势垒高度

$q\varphi_s=q\chi+qV_n=4.13eV$ 为功函数

11. 已知一 n 沟道砷化镓 MESFET：$\varphi_{Bn}=0.9\text{V}$，$N_D=10^{17}\text{cm}^{-3}$，$N_C=4\times10^{17}\text{cm}^{-3}$，$a=0.2\mu\text{m}$，$\varepsilon_s=12.4\varepsilon_0$，$\mu_0=5000\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$，$L=1.0\mu\text{m}$，$Z=10\mu\text{m}$，$T=300\text{K}$.

(a) 这个器件是增强型还是耗尽型？

(b) 计算其在 $V_G=0\text{V}$ 时的饱和电流；

(c) 计算其截止频率.

11.解：(a) $V_n=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_c}{N_D}=0.036\ \text{V}$

$\therefore V_{bi}=\varphi_{Bn}-V_n=0.864\ \text{V}$

$\Rightarrow W=\sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{qN_D}}=0.109\ \mu\text{m}<a$

故为耗尽型

(b) $V_P=\frac{qN_Da^2}{2\varepsilon_s}=2.919\ \text{V}$

$I_P=\frac{Z\mu_n q^2N_D^2a^3}{2\varepsilon_sL}=46.8\ \text{mA}$

$\therefore I_{Dsat}=I_P\left[\frac{1}{3}-\left(\frac{V_G+V_{bi}}{V_P}\right)+\frac{2}{3}\left(\frac{V_G+V_{bi}}{V_P}\right)^{\frac{3}{2}}\right]=6.77\ \text{mA}$

(c) $f_T=\frac{g_m}{2\pi C_G}$ 其中 $\begin{cases} g_m=\frac{\partial I_{Dsat}}{\partial V_G}=\frac{I_P}{V_P}\left(1-\sqrt{\frac{V_G+V_{bi}}{V_P}}\right) \\ C_G\approx\frac{ZL\varepsilon_s}{a}\end{cases}$

$\therefore f_T\approx2.12\times10^2\ \text{GHz}$

然而饱和速度下 $(f_T)_m=\frac{(v)_m}{2\pi L}\approx3.18\ \text{GHz}$

故实际上已有速度饱和 $(f_T)_m\approx3.18\ \text{GHz}$

12. 已知一个 n 沟道砷化镓 MESFET 的沟道掺杂为 $N_D=2\times10^{15}\text{cm}^{-3}$，$\varphi_{Bn}=0.8\text{V}$，$a=0.5\mu\text{m}$，$L=1\mu\text{m}$，$Z=50\mu\text{m}$，$\mu_n=4500\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. 求出其夹断电压、阈值电压以及当 $V_G=0$ 时的饱和电流.

12 解：$V_P=\frac{qN_Da^2}{2\varepsilon_s}=0.365\ \text{V}$ 为夹断电压

$V_n=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_c}{N_D}=0.141\ \text{V}$

$\therefore V_{bi}=\varphi_{Bn}-V_n=0.659\ \text{V}$

$\therefore V_T=V_P-V_{bi}=0.294\ \text{V}$ 为阈值电压

$\because I_{Dsat}\Big|_{V_G=0}=I_P\left[\frac{1}{3}-\left(\frac{V_G+V_{bi}}{V_P}\right)+\frac{2}{3}\left(\frac{V_G+V_{bi}}{V_P}\right)^{\frac{3}{2}}\right]$ $I_P=\frac{Z\mu_n q^2N_D^2a^3}{2\varepsilon_sL}$

$\therefore I_{Dsat}=\frac{Z\mu_n q^2N_D^2a^3}{2\varepsilon_sL}\left[\frac{1}{3}-\frac{V_{bi}}{V_P}+\frac{2}{3}\left(\frac{V_{bi}}{V_P}\right)^{\frac{3}{2}}\right]=1.91\times10^{-4}\text{A}$

13. 已知两个砷化镓 n 沟道 MESFET 的势垒高度 φ_{Bn} 都是 0.85V，器件 1 的沟道掺杂浓度为 $N_D=4.7\times10^{16}\,cm^{-3}$，而器件 2 为 $N_D=4.7\times10^{17}\,cm^{-3}$. 若每个器件阈值电压均为 0V，计算两个器件的沟道厚度分别需要为多少.

13 解：对砷化镓 $N_c=4.7\times10^{17}\,cm^{-3}$

器件1 $V_{n1}=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_c}{N_{D1}}=0.060\ V$

$V_{bi1}=\varphi_{Bn}-V_{n1}=0.79\ V$

$\because V_G=0$ $\therefore a_1=W_1=\sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_{bi1}}{qN_{D1}}}=152\ nm$

器件2 $V_{n1}=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_c}{N_{D2}}=0$

$\therefore V_{bi1}=\varphi_{Bn}=0.85\ V$

$\because V_G=0$ $\therefore a_2=\sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_{bi2}}{qN_{D2}}}=50\ nm$