

模拟题（二）参考答案

一、填空题

1. PN 结的开关延迟是由存储在（ 中性区 ）的（ 非平衡少子 ）引起的，为了减小关断时间，可以（ 减小 ）正向电流、（ 增大 ）反向电流，（ 降低 ）少子寿命，（ 减薄 ）轻掺杂区厚度。
2. 已知某 PN 结反向饱和电流为 $I_0 = 10^{-11} A$ ，室温下，若以 10mA 作为正向导通的开始，则该 PN 结的导通电压 V_F 为（ 0.54 ）V。如果温度升高， V_F 将会（ 降低 ）。
3. 晶体管的注入效率是指（ 从发射区注入基区的少子形成的 ）电流与（ 总的发射极 ）电流之比。为了提高注入效率，应使发射区的掺杂浓度（ 远大于 ）基区掺杂浓度。
4. 为了提高晶体管的注入效率，常将发射区掺杂浓度做得比较高。但发射区重掺杂会导致（ 发射区禁带宽度变窄 ）和（ 俄歇复合增强 ），从而使得注入效率降低。受此启发，发明了异质结晶体管，若某晶体管发射区用 Si，基区用 SiGe，与纯 Si 制作的晶体管相比，该晶体管的电流放大系数更（ 大 ）。
5. 晶体管发射极开路，集电结反偏时，发射极电流（ 为零 ），发射结（ 反 ）偏。（第一空选填“为零”、“不为零”，第二空选填“正”、“零”、“反”）
6. 高频下，晶体管的基区渡越时间 τ_b 对基区输运系数 β_{ω}^* 有三个影响，分别是：（ 复合损失使 β_{ω}^* 小于 1 ））、（ 时间延迟使相位滞后 ））、（ 基区渡越时间的分散使 $|\beta_{\omega}^*|$ 减小 ）。
7. 当 $f \gg f_{\beta}$ 时，频率加倍， $|\beta_{\omega}|$ 变为原来的（ 1/2 ），最大功率增益 K_{pmax} 变为原来的（ 1/4 ）。
8. I_{ES} 是发射结（ 反 ）偏、集电结（ 零 ）偏时的（ 发射 ）极电流， I_{CS} 是发射结（ 零 ）偏、集电结（ 反 ）偏时的（ 集电 ）极电流，通常情况下， I_{ES} （ < ） I_{CS} 。
9. 长沟道 MOSFET 漏极电流饱和是由于（ 沟道夹断 ），短沟道 MOSFET 漏极电流饱和是由于（ 载流子速度饱和 ）。
10. 亚阈电压摆幅 S 反映了（ V_{GS} ）对（ I_{Dsub} ）的控制能力，衬底杂质浓度越高，控制能力越（ 弱 ），栅氧化层越薄，控制能力越（ 强 ）。

11. 对于实际的增强型 NMOS，当 $V_{GS} = 0$ 、 $V_{DS} > 0$ 时，由于存在（ 亚阈漏极电流 ）和（ PN 结反向饱和电流 ），漏源之间有微弱的电流。
12. 根据恒场等比例缩小法则，当沟道长度缩小到 $1/K$ 后，衬底掺杂浓度应变为原来的（ K 倍 ），单位面积电容变为原来的（ K 倍 ），功耗变为原来的（ $1/K^2$ ）。
13. 当 N 沟道 MOSFET 的 V_{GS} 在 $V_i < V_{GS} < V_T$ 范围内时，表面处于（ 弱反型 ）状态，表面电子浓度介于（ 本征载流子 ）浓度和（ 衬底平衡多子 ）浓度之间。当外加 V_{DS} 后，MOSFET 能够微弱导电，这种电流称为（ 亚阈 ）漏极电流。
14. 工艺上常用离子注入的方法来调整阈值电压，若要减小某 N 沟道 MOSFET 的阈电压，应向衬底注入（ 硼 ）离子。（选填“硼”、“磷”）

二、简答与作图

1、简述 PN 结势垒电容和扩散电容的形成机理及特点。

答：势垒电容：当 PN 结上的外加电压发生变化时，空间电荷区宽度将发生变化，使冶金结两侧的空间电荷也发生相应的变化。这种势垒区电荷随外加电压的变化，可以用一个电容来描述，即势垒电容。势垒电容的正负电荷在空间上是分离的，正反偏情况下势垒电容均存在，反偏下可作电容器使用。

扩散电容：当 PN 结外加电压发生变化时，存储在中性区的少数电荷量将发生变化。中性区少数电荷量随外加电压的变化，就用扩散电容来描述。扩散电容的正负电荷在空间上是重合的，扩散电容只存在于正偏条件下。

2、什么是双极结型晶体管的 Early 效应和 Kirk 效应？针对这两种效应，分别提出一些缓解的措施。

答：Early 效应是指基区宽度随着 V_{CE} 的增大而缩小，从而导致集电极电流 I_C 随 V_{CE} 的增加而增加。可以增大基区宽度、增大基区掺杂浓度来减弱 Early 效应。

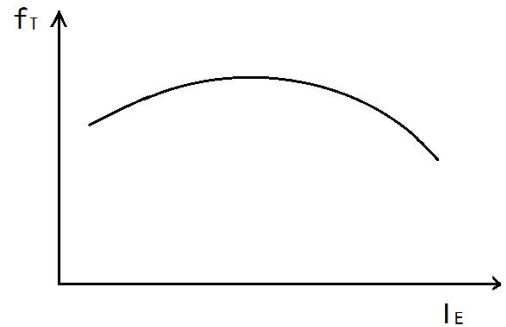
Kirk 效应是指集电结电压不变、集电极电流增加时，基区宽度会展宽。可以适当提高集电区掺杂浓度来缓解该效应。（言之有理即可）

3、画出双极晶体管的特征频率 f_T 随发射结电流 I_E 变化曲线，并作简要解释。

答： f_T 随 I_E 变化的曲线如图所示。

由于 $\frac{1}{2\pi f_T} = \tau_{eb} + \tau_b + \tau_d + \tau_c$ ，其中 $\tau_{eb} = \frac{kT}{qI_E} C_{TE}$ ，

$\tau_b \propto W_B^2$ 。当电流比较小的时候， τ_{eb} 随着 I_E 的增大而减小， f_T 随 I_E 的增大而增大；当 I_E 较大的时候，由于发生了基区扩展效应， τ_b 将增大，从而导致 f_T 减小。



4、什么是 MOSFET 的跨导？提出几种提高跨导的措施。

答：MOSFET 的跨导反映了栅源电压 V_{GS} 对漏极电流 I_D 的控制能力，其定义是

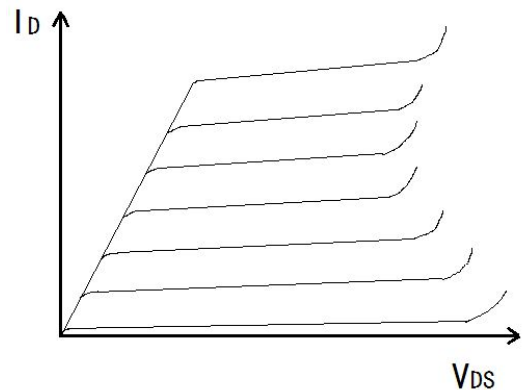
$g_m \equiv \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}=\text{常数}}$ ，在非饱和区， $g_m = \beta V_{DS}$ ，在饱和区， $g_m = \beta(V_{GS} - V_T)$ 。

在制作过程中，可以通过增大宽长比，增大迁移率，减薄栅氧化层厚度来提高跨导；在使用过程中，MOSFET 一般工作在饱和区，可以通过提高栅源电压 V_{GS} 来提高跨导。

5、画出一个短沟道 NMOS 包含击穿在内的输出特性曲线，并对曲线作简要说明。

答：输出特性如图所示。

由于发生了有效沟道长度调制效应，漏极电流不饱和；载流子速度饱和，所以饱和区的电流和栅源电压不再满足平方关系；由于发生了横向双极击穿，击穿曲线为 C 形包络线。



三、计算题

1、一个硅 P+N 结，当反向偏置为 30V 时，耗尽层电容为 1.75nF/cm^2 。如果雪崩击穿时的最大电场为 $3.1 \times 10^5 \text{V/cm}$ ，求击穿电压。

解：由于反偏电压 30V 远大于内建电势 V_{bi} ，且 N 型区掺杂浓度对 V_{bi} 影响不是特别明显，所以可取 $V_{bi} = 0.8\text{V}$ 。

由于 $N_A \gg N_D$ ，所以约化浓度 $N_0 \approx N_D$ ，单位面积势垒电容 $C_T = \left[\frac{\epsilon_s q N_D}{2(V_{bi} - V)} \right]^{\frac{1}{2}}$ ，

计算得 $N_D = \frac{2C_T^2(V_{bi} - V)}{\epsilon_s q} \approx 1.18 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 。（求出掺杂浓度之后可以返回去验证

一下内建电势是否相差太大）

由泊松方程 $\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\epsilon_s} N_D$ ，易知发生雪崩击穿时的耗尽区宽度 $x_{dB} = 1.64 \times 10^{-3} \text{cm}$ 。

雪崩击穿电压 $V_B = \frac{1}{2} E_C \cdot x_{dB} = 254\text{V}$ 。

2、一个 PNP 硅晶体管发射区、基区和集电区的杂质浓度分别为 $N_E = 5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、 $N_B = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 、 $N_C = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 。基区宽度均为 $1\mu\text{m}$ ，器件的横截面积 A 为 3mm^2 ， $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ 。如果 $V_{EB} = 0.5\text{V}$ ， $V_{BC} = 5\text{V}$ （即发射结正偏、集电结反偏），计算：

- (1) 中性基区宽度；
- (2) 基区中位于发射结边界处的少数载流子浓度；
- (3) 中性基区中的少数载流子电荷量。

解：(1) 发射结内建电势 $V_{bi1} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_E N_B}{n_i^2} \right) = 0.86\text{V}$

集电结内建电势 $V_{bi2} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_B N_C}{n_i^2} \right) = 0.64\text{V}$

发射结位于基区内的势垒区宽度 $x_{d1} \approx \left[\frac{2\varepsilon_s}{qN_B} (V_{bi1} - V_{EB}) \right]^{\frac{1}{2}} = 0.22\mu\text{m}$

集电结位于基区内的势垒区宽度

$$x_{d2} = \left[\frac{2\varepsilon_s}{q} \left(\frac{N_B + N_C}{N_B N_C} \right) (V_{bi2} + V_{BC}) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{N_C}{N_B + N_C} = 0.25\mu\text{m} \quad (\text{用教材上的公式 2-14 或 2-15 也可以, 我习惯了这个})$$

中性基区宽度 $W = W_B - x_{d1} - x_{d2} = 0.53\mu\text{m}$

(2) 由结定律可知, 发射结边界处的少子浓度为

$$p = p_{B0} \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right) = \frac{n_i^2}{N_B} \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right) \approx 5.1 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$$

(3) 中性基区内少子为线性分布, 所以总电荷量为

$$Q = \frac{1}{2} qApW = 6.5 \times 10^{-13} \text{C}$$

3、用扩散工艺制作一个纵向 NPN 晶体管, 已知衬底的掺杂浓度为 $N_C = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 。测得发射结结深 $j_e = 0.5\mu\text{m}$, 集电结结深 $j_c = 1.5\mu\text{m}$, 假设发射区均匀掺杂, 基区杂质浓度服从指数分布, $N_E = 10^{19} \text{cm}^{-3}$, $N_B(j_e) = 10^{17} \text{cm}^{-3}$, $N_B(j_c) = 10^{15} \text{cm}^{-3}$, 电子和空穴的寿命均为 $1\mu\text{s}$, 扩散系数分别为 $D_n = 25 \text{cm}^2/\text{s}$, $D_p = 10 \text{cm}^2/\text{s}$ 。试计算:

- (1) 基区渡越时间 τ_b ;
- (2) 注入效率 γ ;
- (3) 电流放大系数 β 。

解: (1) 基区自建场因子 $\eta = \ln \left[\frac{N_B(j_e)}{N_B(j_c)} \right] = 4.6$, 基区宽度 $W_B = j_c - j_e = 1\mu\text{m}$,

$$\text{基区渡越时间 } \tau_b = \frac{W_B^2}{2D_B} \cdot \frac{2}{\eta} \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) = \frac{(1 \times 10^{-4})^2}{2 \cdot 25} \cdot \frac{2}{4.6} \left(1 - \frac{1}{4.6} \right) = 6.8 \times 10^{-11} \text{s}。$$

(2) 基区少子分布 $N_B(x) = N_B(j_e) \exp\left(-\frac{\eta x}{W_B}\right) = 10^{17} \exp(-4.6 \times 10^4 x)$, (这个地方

把 W_B 和 x 的单位都取成 cm ，不然积分容易出错)

由爱因斯坦关系得 $\mu_n = \frac{qD_n}{kT} = 961\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ ， $\mu_p = \frac{qD_p}{kT} = 385\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$

$$R_{\Delta E} = \frac{1}{q\mu_n N_E W_E} = 13\Omega, \quad R_{\Delta B1} = \frac{1}{q\mu_p \int_0^{W_B} N_B(x) dx} = 9.2\text{k}\Omega$$

$$\text{注入效率 } \gamma = 1 - \frac{R_{\Delta E}}{R_{\Delta B1}} = 0.9986。$$

$$(3) \text{ 基区输运系数 } \beta^* = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_B} \approx 0.9999$$

$$\alpha = \beta^* \cdot \gamma = 0.9985, \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = 666$$

4、某铝栅 N 沟道 MOSFET，衬底杂质浓度 $N_A = 10^{15}\text{cm}^{-3}$ ，栅氧化层厚度为 100nm ，金半功函数差为 -0.6eV ，栅氧化层有效电荷面密度为 $1.8 \times 10^{-8}\text{C}/\text{cm}^2$ ，沟道的宽长比为 100。已知电子迁移率为 $500\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ ，硅的相对介电常数为 12， SiO_2 相对介电常数为 3.9， $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14}\text{F}/\text{cm}$ 。若在使用该器件时，源和衬底接地，器件工作在饱和区，为了得到 $g_{ms} = 2\text{mS}$ 的跨导，栅源电压 V_{GS} 应为多少？

$$\text{解：N 型 MOSFET 的阈值电压 } V_T = \phi_{MS} - \frac{Q_{OX}}{C_{OX}} + \frac{(2q\epsilon_s N_A)^{1/2}}{C_{OX}} (2\phi_{Fp})^{1/2} + 2\phi_{Fp},$$

$$\text{其中 } \phi_{MS} = -0.6\text{V}, \quad C_{OX} = \frac{\epsilon_{OX}}{T_{OX}} = \frac{3.9 \times 8.854 \times 10^{-14}}{100 \times 10^{-7}} = 3.45 \times 10^{-8}\text{F}/\text{cm}^2,$$

$$\phi_{Fp} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.29\text{V}。 \text{ 带入计算得 } V_T = -0.15\text{V}。$$

$$\text{增益因子 } \beta = \frac{Z\mu_n C_{OX}}{L} = 1.73\text{mA}/\text{V}^2,$$

$$\text{饱和区跨导 } g_{ms} = \beta(V_{GS} - V_T), \text{ 当 } g_{ms} = 2\text{mS} \text{ 时, } V_{GS} = \frac{g_{ms}}{\beta} + V_T = 1\text{V}。$$