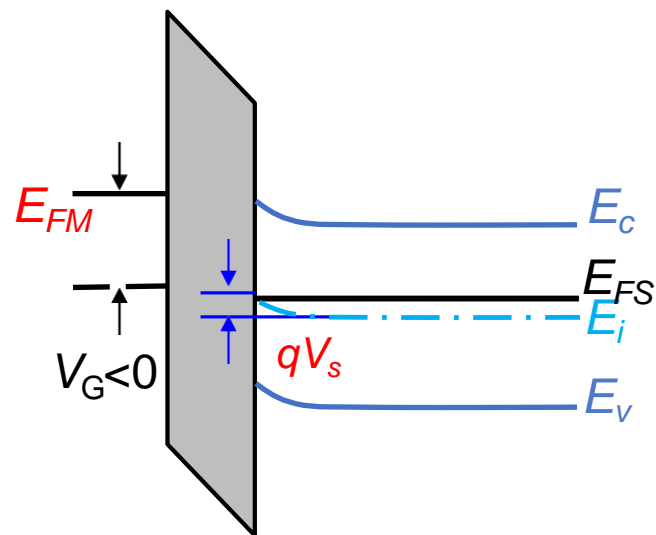
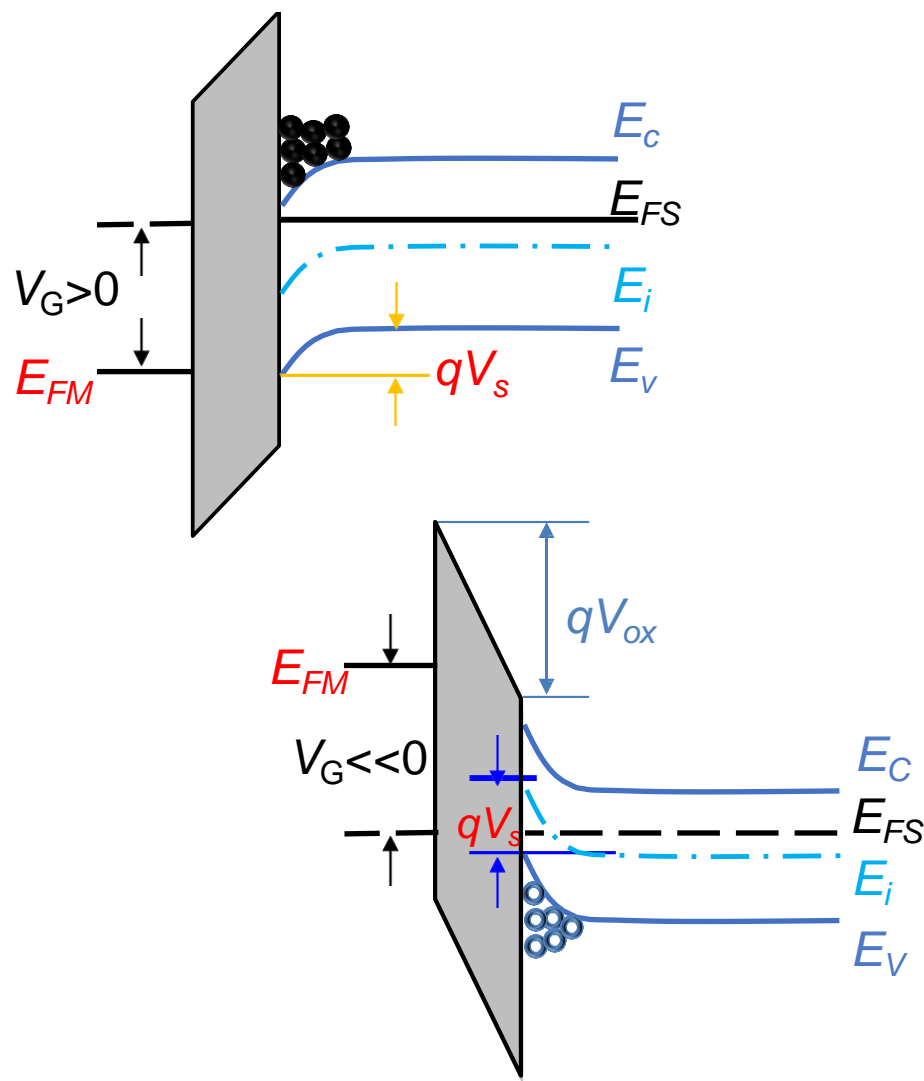


# 第五章第一次作业

1. (1) 画出 N 型 Si 衬底理想 MOS 电容的三种状态（积累、耗尽、反型）的能带图，标出金属费米能级 ( $E_{FM}$ )、半导体费米能级 ( $E_{FS}$ )、导带 ( $E_C$ )、价带 ( $E_V$ )、本征费米能级 ( $E_i$ )、表面势 ( $qV_s$ ) 及不同状态时的栅压条件（栅压大于、小于、远大于或远小于 0）。(2) 针对上述电容，在不考虑金属-半导体功函数差、界面电荷等非理想因素时，推导出强反型时的表面势 ( $V_s$ ) 及外加栅压 ( $V_g$ ) 的表达式，其中氧化层电容、n 型衬底掺杂浓度、本征载流子浓度分别为  $C_{ox}$ 、 $N_D$ 、 $n_i$ 。



$$V_G = V_{ox} + V_s$$

注:

$V_s$  的符号与分析 P 型 MOS 时相反  
n 型半导体和 p 型半导体费米能级  
位置不要画错  
氧化层的压降方向和半导体一致

1. (1) 画出 N 型 Si 衬底理想 MOS 电容的三种状态（积累、耗尽、反型）的能带图，标出金属费米能级 ( $E_{FM}$ )、半导体费米能级 ( $E_{FS}$ )、导带 ( $E_C$ )、价带 ( $E_V$ )、本征费米能级 ( $E_i$ )、表面势 ( $qV_s$ ) 及不同状态时的栅压条件（栅压大于、小于、远大于或远小于 0）。(2) 针对上述电容，在不考虑金属-半导体功函数差、界面电荷等非理想因素时，推导出强反型时的表面势 ( $V_s$ ) 及外加栅压 ( $V_g$ ) 的表达式，其中氧化层电容、n 型衬底掺杂浓度、本征载流子浓度分别为  $C_{ox}$ 、 $N_D$ 、 $n_i$ 。

(2) 半导体表面空穴浓度  $p_s = p_{n0} \exp(\frac{qV_s}{k_0T}) = \frac{n_i^2}{n_{n0}} \exp(\frac{qV_s}{k_0T})$

强反型时有  $p_s = n_{n0}$

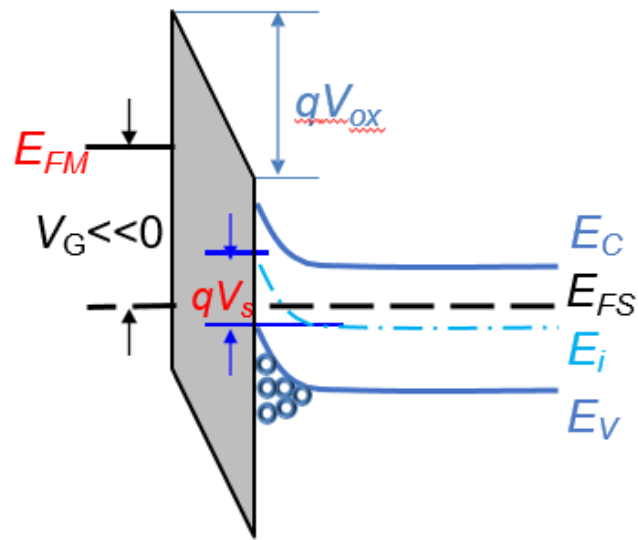
故有  $n_{n0}^2 = n_i^2 \exp(\frac{qV_s}{k_0T})$ , ~~即~~  $n_{n0} = n_i \exp(\frac{qV_s}{2k_0T})$

又  $n_{n0} = n_i \exp(-\frac{E_i - E_F}{k_0T}) = n_i \exp(\frac{-qV_B}{k_0T})$

上式代入  $n_{n0} = N_D$

得  $V_B = \frac{-k_0T}{q} \ln(\frac{N_D}{n_i})$

$V_s \leq 2V_B$  ~~即~~  $V_s \leq \frac{-2k_0T}{q} \ln(\frac{N_D}{n_i})$  时达到强反型

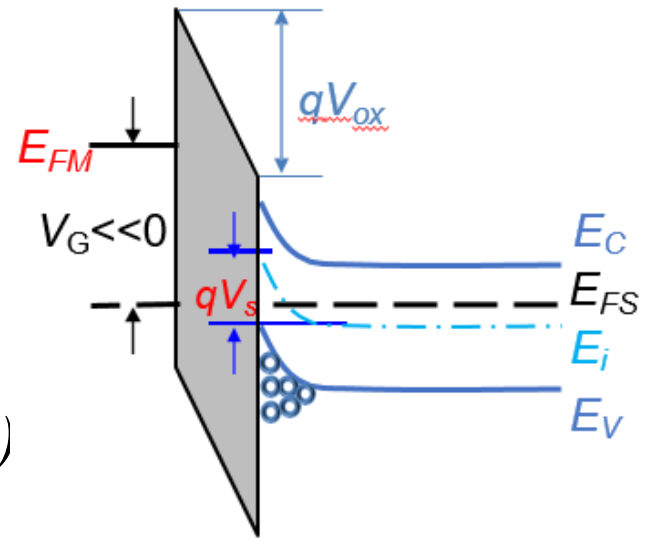


注：若自己的答案中定义的  $qV_B = E_F - E_i$ ，  
要在  $V_s$  处体现出电压的正负

1. (1) 画出 N 型 Si 衬底理想 MOS 电容的三种状态（积累、耗尽、反型）的能带图，标出金属费米能级 ( $E_{FM}$ )、半导体费米能级 ( $E_{FS}$ )、导带 ( $E_C$ )、价带 ( $E_V$ )、本征费米能级 ( $E_i$ )、表面势 ( $qV_s$ ) 及不同状态时的栅压条件（栅压大于、小于、远大于或远小于 0）。(2) 针对上述电容，在不考虑金属-半导体功函数差、界面电荷等非理想因素时，推导出强反型时的表面势 ( $V_s$ ) 及外加栅压 ( $V_g$ ) 的表达式，其中氧化层电容、n 型衬底掺杂浓度、本征载流子浓度分别为  $C_{ox}$ 、 $N_D$ 、 $n_i$ 。

(2) 接上页

$$\begin{aligned}
 V_g &= V_{ox} + V_s \\
 &= -\frac{|Q_s|}{C_{ox}} + V_s \\
 &= \frac{-\sqrt{2\varepsilon_s q N_D |2V_B|}}{C_{ox}} + 2V_B \\
 &= \frac{-\sqrt{4\varepsilon_s k_0 T N_D \ln(\frac{N_D}{n_i})}}{C_{ox}} - \frac{2k_0 T}{q} \ln(\frac{N_D}{n_i})
 \end{aligned}$$



注：要在  $V_g$  处体现出电压的正负

2. 考虑一  $t_{\text{ox}}=35 \text{ nm}$  的铝栅-二氧化硅-p 型 Si 的 MOS 结构。Si 掺杂浓度为  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，平带电压  $V_{\text{FB}}$  为  $-1.5 \text{ V}$ ，试确定固定氧化层电荷  $Q_{\text{ss}}$ （不考虑氧化层移动电荷  $Q_{\text{ox}}$ ），并指明的固定电荷的正负。若其他条件不变，已知固定氧化层电荷密度  $Q_{\text{ss}}$  为  $-2 \times 10^{-7} \text{ C/cm}^2$ ，求此时的平带电压值。Si 的电子亲和能、禁带宽度、本征载流子浓度分别按照  $4.05 \text{ eV}$ 、 $1.12 \text{ eV}$ 、 $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  计算，铝的功函数按照  $4.1 \text{ eV}$  计算。

$$(1) C_{\text{ox}} = \frac{\epsilon_{\text{ox}}}{t_{\text{ox}}} = \frac{3.9 \times 8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}}{35 \times 10^{-7} \text{ cm}} = 9.866 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$$

$$V_{\text{B}} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_{\text{A}}}{n_{\text{i}}}\right) = 0.026 \times \ln \frac{3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}}{1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}} = 0.437 \text{ V}$$

$$W_{\text{s}} = \chi + \frac{E_{\text{g}}}{2} + qV_{\text{B}} = (4.05 + \frac{1.12}{2} + 0.437) \text{ eV} = 5.047 \text{ eV}$$

$$\varphi_{\text{ms}} = \varphi_{\text{m}} - \varphi_{\text{s}} = (4.10 - 5.047) \text{ V} = -0.947 \text{ V}$$

$$\text{由 } V_{\text{FB}} = \varphi_{\text{ms}} - \frac{Q_{\text{ss}}}{C_{\text{ox}}} = -0.947 \text{ V} - \frac{Q_{\text{ss}}}{9.866 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2} = -1.50 \text{ V}$$

$$\text{得 } Q_{\text{ss}} = 5.46 \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2, \text{ 固定电荷为正}$$

$$(2) \text{ 若 } Q_{\text{ss}} \text{ 为 } -2 \times 10^{-7} \text{ C/cm}^2, \text{ 则 } \frac{Q_{\text{ss}}}{C_{\text{ox}}} = \frac{-2 \times 10^{-7} \text{ C/cm}^2}{9.866 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2} = -2.03 \text{ V}$$

$$V_{\text{FB}} = \varphi_{\text{ms}} - \frac{Q_{\text{ss}}}{C_{\text{ox}}} = -0.947 \text{ V} - (-2.03 \text{ V}) = 1.083 \text{ V} \approx 1.08 \text{ V}$$

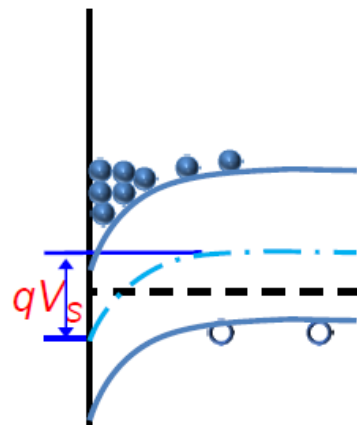
3. 理想n沟道（p型衬底）MOSFET，说明以下对结构的改变将分别对阈值电压  $V_T$  产生什么影响并简单解释原因。

（注：a.此处“理想”指无界面固定正电荷  $Q_{ss}$  和可移动电荷  $Q_{ox}$ ； b.Al 功函数为4.1eV，Cu 功函数为 4.7eV）

- (1) 进行离化辐射，导致明显的  $Q_{ss} \neq 0$ ；
- (2) 将栅极材料由Al改为Cu；
- (3) 提高衬底掺杂浓度；
- (4) 减薄氧化层厚度；
- (5) 在硅表面附近注入硼离子。

$$V_{Tn} = \phi_{ms} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} + \frac{qN_A d_{max}}{C_{ox}} + \frac{2k_0 T}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad d_{max} \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_s}{qN_A}} \approx \sqrt{\frac{4\varepsilon_s kT \ln(N_A/n_i)}{q^2 N_A}}$$

- (1)使阈值电压向负方向移动
- (2)Cu功函数更高，阈值电压向着正方向移动
- (3)衬底浓度上升，反型更加困难，阈值电压向着正方向移动
- (4)减薄氧化层，单位面积电容大小上升，阈值电压向负方向移动
- (5)注入B离子,相当于“增加”了衬底浓度，阈值电压向着正方向移动



注：氧化层固定电荷  $Q_{ss}$  一般为正电荷



4. 一个 MOSFET，其器件参数为  $\Phi_{ms} = -0.46 \text{ eV}$ ， $Q_{ss}/q = 2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ，氧化硅厚度  $t_{ox} = 0.05 \mu\text{m}$ ，衬底施主杂质掺杂浓度为  $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。（Si 的电子亲和能、禁带宽度、本征载流子浓度分别按照  $4.05 \text{ eV}$ 、 $1.12 \text{ eV}$ 、 $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  计算， $\text{SiO}_2$  相对介电常数为 3.9， $k_0T = 26 \text{ meV}$ ）

(1) 求  $V_{FB}$  及  $V_T$ ；

(2) 假设利用离子注入技术在靠近硅-氧化硅界面处注入了剂量为  $1.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  的硼离子，求  $\Delta V_T$ ；

(3) 离子注入前后的 MOSFET 是增强型还是耗尽型？

**注意：该晶体管衬底为n型掺杂，即该晶体管为p型MOSFET**

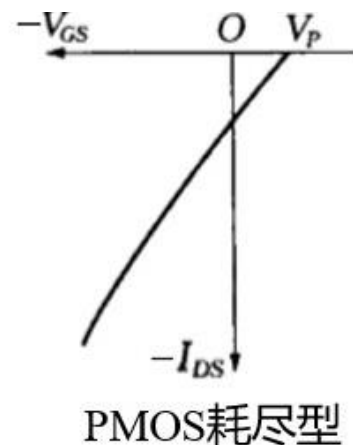
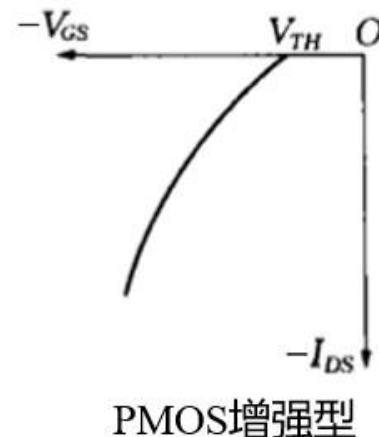
$$(1) V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} = -0.46 \text{ V} - \frac{2 \times 10^{11} \times 1.6 \times 10^{-19}}{\frac{3.9 \times 8.854 \times 10^{-14}}{5 \times 10^{-6}}} \text{ V} = -0.923 \text{ V}$$

$$V_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) = 0.026 \times \ln\left(\frac{5 \times 10^{15}}{1.5 \times 10^{10}}\right) = 0.3306 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} V_T &= V_{FB} - 2V_B - \frac{qN_D}{C_{ox}} \sqrt{\frac{2\epsilon_{rs}\epsilon_0(2V_B)}{qN_D}} \\ &= -0.923 \text{ V} - 0.661 \text{ V} - 0.483 \text{ V} \\ &= -0.2076 \text{ V} \approx -0.207 \text{ V} \end{aligned}$$

$$(2) \Delta V_T = \frac{\Delta Q_B}{C_{ox}} \approx \frac{qN_{Im}}{C_{ox}} \approx \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 1.5 \times 10^{12} \text{ C/cm}^2}{6.906 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2} \approx 3.48 \text{ V}$$

(3) 注入前  $V_T < 0$ ，为增强型；注入后  $V_T > 0$ ，为耗尽型。



**注：千万要弄清半导体极性；**

**假如  $\phi_{ms}$  没直接给出数值也要会计算**

5. 一铝栅-二氧化硅-Si MOS 电容器的高频特性曲线如图 1 所示。器件的面积为  $2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ ，Si 掺杂浓度为  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。(1) 半导体是 n 型的还是 p 型的？(2) 求平带电容。(3) 画出其低频 CV 曲线，并标出耗尽、弱反型、强反型的区域及条件（表面势  $V_s$  与  $|V_B|$  的关系）。

(1) n型。因为负压下耗尽，正压下积累。

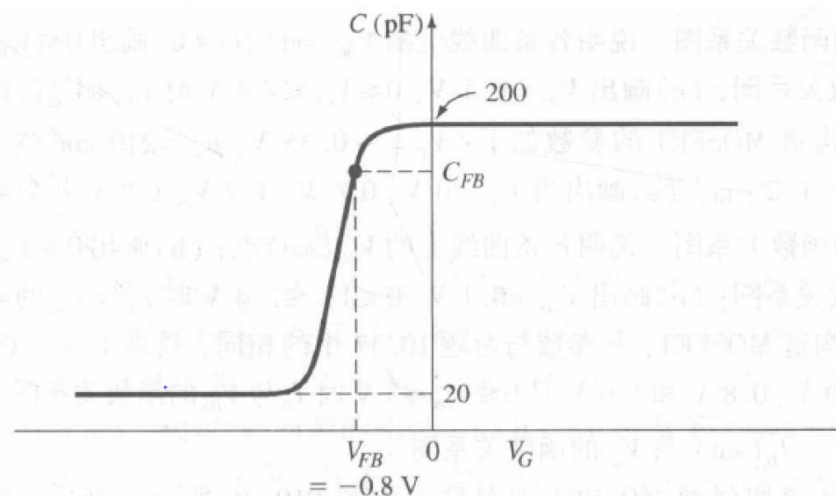
$$(2) C_{FB} = \frac{\epsilon_{ox} S}{t_{ox} + \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_s} \sqrt{\frac{kT}{q}} \times \frac{\epsilon_s}{q N_D}}$$

注：公式在施敏老师《半导体器件物理》P158，公式(24)

其中  $t_{ox}$  可由  $C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} S}{t_{ox}} = 200 \text{ pF}$  得出，

$$\begin{aligned} t_{ox} &= \frac{\epsilon_{ox} S}{C_{ox}} \\ &= \frac{3.9 \times 8.85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}^2 \times 2 \times 10^3 \text{ cm}^2}{200 \text{ pF}} \\ &= 3.45 \times 10^{-6} \text{ cm} \\ &= 34.5 \text{ nm} \end{aligned}$$

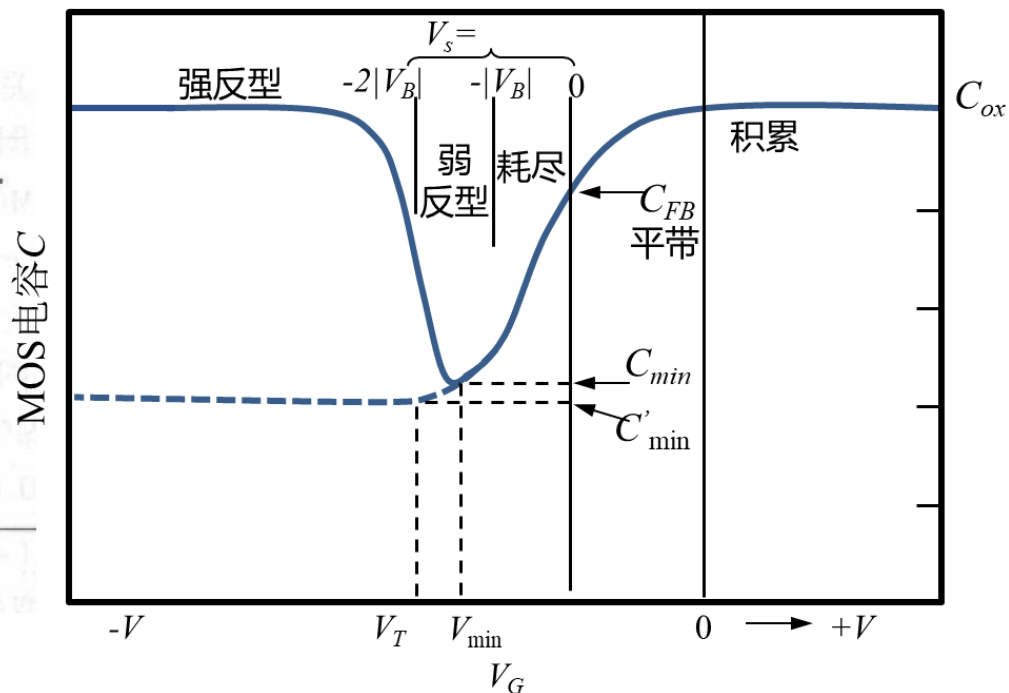
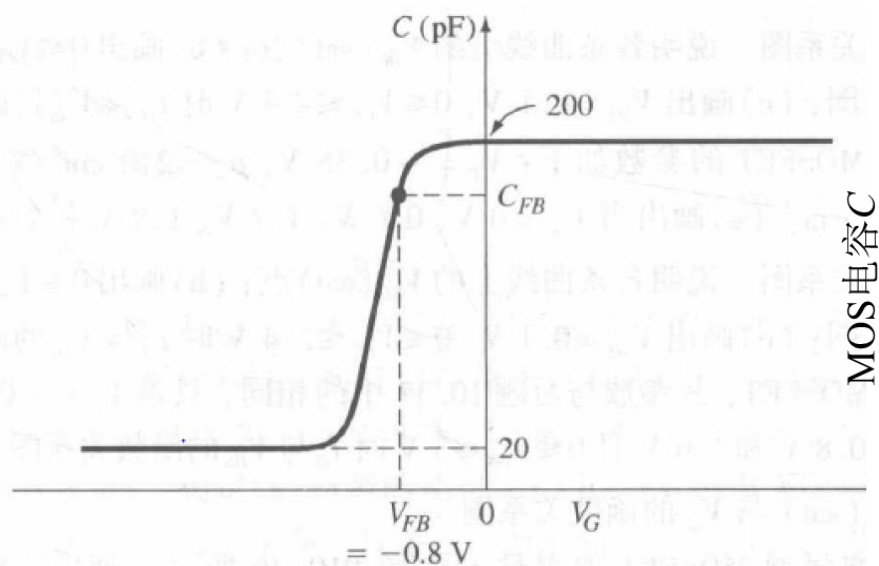
故  $C_{FB} = 156 \text{ pF}$





5. 一铝栅-二氧化硅-Si MOS 电容器的高频特性曲线如图 1 所示。器件的面积为  $2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ ，Si 掺杂浓度为  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。(1) 半导体是 n 型的还是 p 型的？(2) 求平带电容。(3) 画出其低频 CV 曲线，并标出耗尽、弱反型、强反型的区域及条件（表面势  $V_s$  与  $|V_B|$  的关系）。

(3)



# 第五章第二次作业

1. N 沟道 MOSFET 的参数如下:  $\mu_n=650 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $t_{ox}=80 \text{ \AA}$ ,  $W/L=12$ ,  $V_T=0.40 \text{ V}$ 。设晶体管源漏电压固定在  $V_{DS}=1 \text{ V}$ , 求  $V_{GS}=0.8 \text{ V}$ 、 $1.2 \text{ V}$ 、 $1.6 \text{ V}$  时的漏电流。(注: 饱和区不考虑沟道长度的变化。)

当  $V_{GS}=0.8 \text{ V}$ 、 $1.2 \text{ V}$  时,  $V_{DS} > V_{GS} - V_T$ , 器件处于饱和区

当  $V_{GS}=1.6 \text{ V}$  时,  $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ , 器件处于线性区

$$\beta = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 650 \times \frac{3.9 \times 8.854 \times 10^{-14}}{80 \times 10^{-8}} \times 12 = 3.37 \text{ mA/V}^2$$

$$(1) \quad V_{GS}=0.8 \text{ V}, \quad I_{DS} = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{1}{2} \times 3.37 \times (0.8 - 0.4)^2 = 0.27 \text{ mA}$$

$$(2) \quad V_{GS}=1.2 \text{ V}, \quad I_{DS} = \frac{1}{2} \beta (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{1}{2} \times 3.37 \times (1.2 - 0.4)^2 = 1.08 \text{ mA}$$

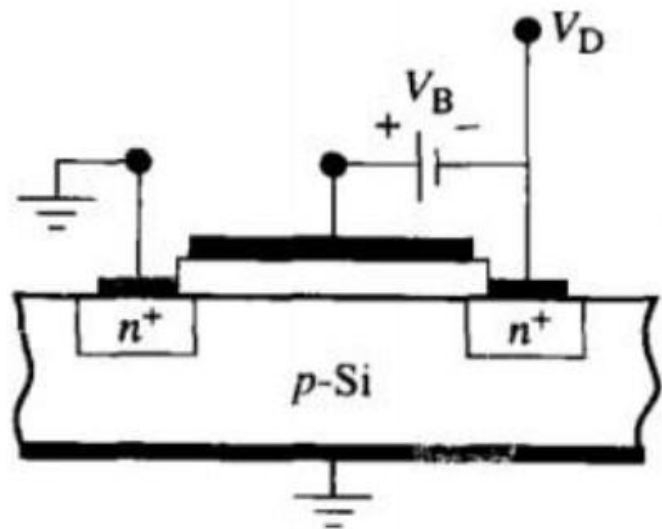
$$(2) \quad V_{GS}=1.6 \text{ V}, \quad I_{DS} = \beta \left( (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right) = 3.37 \times \left( (1.6 - 0.4) \times 1 - \frac{1}{2} \times 1^2 \right) = 2.36 \text{ mA}$$

注: 先判断工作区、确定公式, 再计算

2. 理想N沟道MOSFET 如下图, 假设  $V_B \geq 0$ ,  $V_D \geq 0$ , 求下列条件时  $I_{DS}-V_{DS}$  关系:

(1)  $V_B = V_T/2$ ;

(2)  $V_B = 2V_T$ 。



注: 不要忘了对 $v_G$ 的判断

(1) 当  $V_B = \frac{V_T}{2}$  时, 若  $V_D > \frac{V_T}{2}$ , 则  $V_G > V_T$ , 且  $V_D = V_G - V_B = V_G - \frac{V_T}{2} > V_G - V_T$ ,

所以器件处于饱和区  $I_{DSsat} = \frac{1}{2} C_{ox} \mu_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$ ;

若  $V_D < \frac{V_T}{2}$ ,  $V_G < V_T$ , 器件不导通, 处于截止状态。

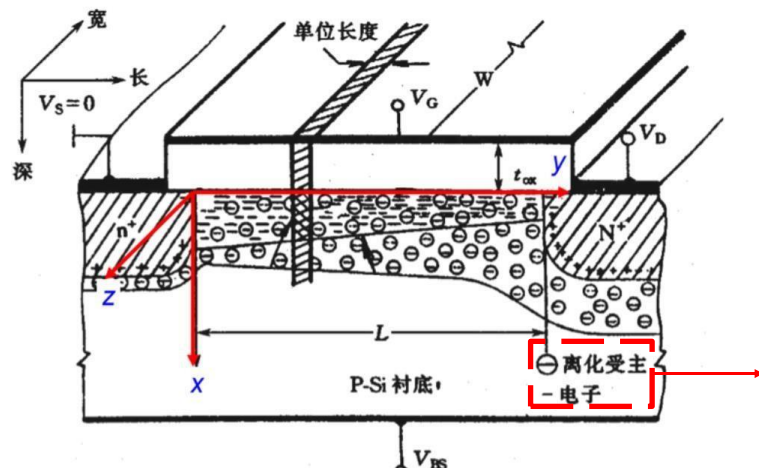
(2) 当  $V_B = 2V_T$  时,  $V_G = V_D + V_B > V_T$ ,  $V_D = V_G - V_B = V_G - 2V_T < V_G - V_T$ ,

器件处于线性区  $I_{DS} = C_{ox} \mu_n \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2]$

3. 理想N沟道 MOSFET, 器件参数  $W=70\ \mu\text{m}$ ,  $L=7\ \mu\text{m}$ ,  $\mu_n=550\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $t_{ox}=0.05\ \mu\text{m}$ ,  $V_T=1\ \text{V}$ , 所加偏压  $V_{GS}=3\ \text{V}$ ,  $V_{DS}=0\ \text{V}$ 。(注: 使用简单模型)

- (1) 求沟道中点 ( $y=L/2$ ) 处单位面积 (每平方厘米) 上的反型电荷;
- (2) 求此偏置下的漏电导  $g_D$ 。

注: 若  $V_{ds}$  不等于 0, 反型电荷也要会求;



$$(1) V_{GS} > V_T, \text{ 且 } V_{DS} = 0, \quad V(y) = 0, \quad Q_n\left(\frac{L}{2}\right) = -C_{ox}(V_{GS} - V_T)$$

$$Q_n\left(\frac{L}{2}\right) = -\frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}}(V_{GS} - V_T) = -\frac{3.9 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 2}{5 \times 10^{-6}} = -1.38 \times 10^{-7} \text{ C/cm}^2$$

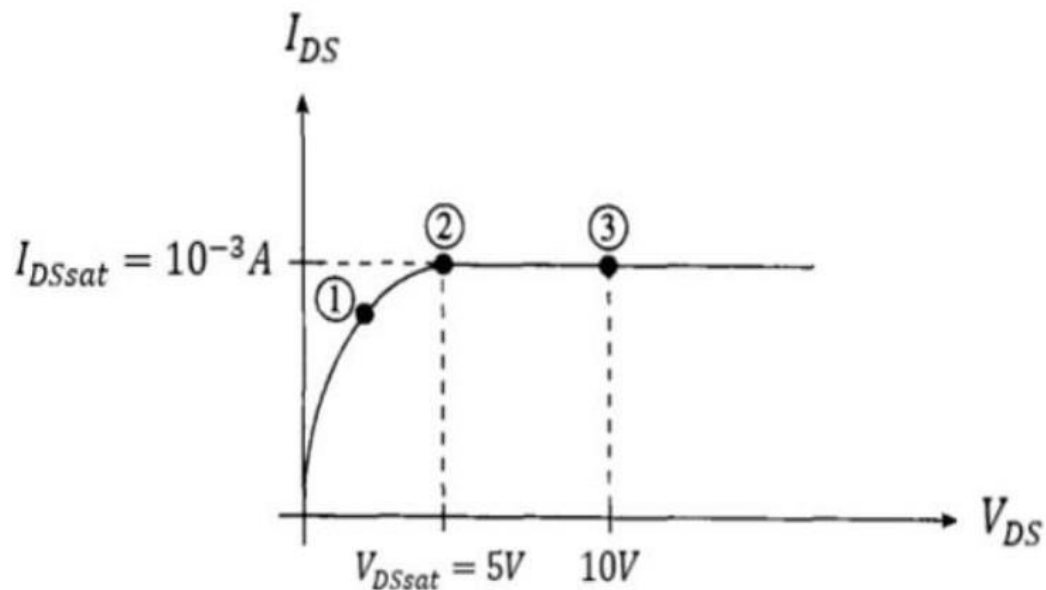
$$(2) \quad I_{DS} = C_{ox} \mu_n \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

$$g_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) = \frac{70 \times 10^{-4} \times 550 \times 1.38 \times 10^{-7}}{7 \times 10^{-4}} = 7.59 \times 10^{-4} \text{ S}$$



4. 下图是理想MOSFET的输出曲线图,  $I_{DSsat}=10^{-3} A$ ,  $V_{DSsat}=5 V$ , 利用简单模型回答下列问题。

- (1) 若阈值电压  $V_T=1 V$ , 为了得到图中的特性曲线, 需要在栅极施加多大的电压?
- (2) 若  $t_{ox}=0.1 \mu m$ , MOSFET 偏置在图中②处时, 求其沟道区漏端单位面积上 (每平方厘米) 的反型层电荷;
- (3) 假设栅极电压被调整到  $V_{GS}-V_T=3 V$ , 求  $V_{DS}=4 V$  时的电流;
- (4) 若图中点③为该 MOSFET 的静态工作点, 请求出  $g_D$  和  $g_m$ 。

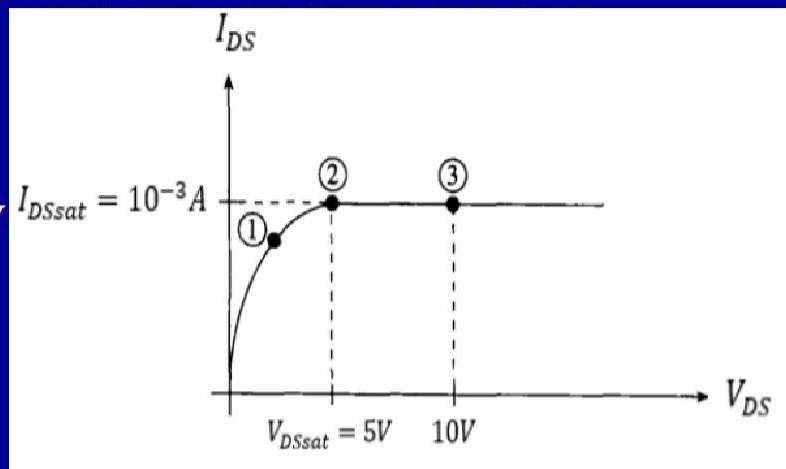




若阈值电压 $V_T = 1V$ ，为了得到图中的特性曲线，需要在栅极施加多大的电压？

$$I_{DSSat} = 10^{-3}A, V_{DSSat} = 5V$$

$$V_{DSSat} = V_{GS} - V_T = 5V, V_{GS} = V_{DSSat} + V_T = 6V$$



若 $t_{ox} = 0.1\mu m$ ，MOSFET偏置在图中②处时，求其沟道区漏端单位面积上(每平方厘米)的反型层电荷。

②点处于刚刚饱和时，因此漏端反型层刚刚夹断，所以反型电子为0

假设栅极电压被调整到 $V_{GS} - V_T = 3V$ ，求 $V_{DS} = 4V$ 时的电流。

$$V_{GS} - V_T = 3V, V_{DS} = 4V \text{ 时, 器件处于饱和区域, } I_{DSSat} = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2,$$

$$I_{DSSat1} = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS1} - V_T)^2 = 10^{-3}A, I_{DSSat2} = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS2} - V_T)^2,$$

$$\frac{I_{DSSat1}}{I_{DSSat2}} = \frac{(V_{GS1} - V_T)^2}{(V_{GS2} - V_T)^2} = \frac{5^2}{3^2}, I_{DSSat2} = 3.6 \times 10^{-4}A$$

若图中点③为该MOSFET的静态工作点，请求出 $g_D$ 和 $g_m$ 。

③点处于饱和区，则漏电导 $g_D$ 为0； $g_m = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) = \frac{2I_{DSSat}}{V_{GS} - V_T} = \frac{2 \times 10^{-3}}{5} = 4 \times 10^{-4}S$ 。

注：思考若考虑短沟道效应，漏电导 $g_d$ 会怎么变化