

Annale 1 : sur le cours Dispositifs MOS

On considère un transistor MOS a canal N réalisé sur du Silicium de type P. l'oxyde de grille est du SiO₂ et la grille du Polysilicium. Les caractéristiques sont les suivantes :

Epaisseur de l'oxyde de grille : $e_{ox} = 6.10^{-6} \text{ cm}$ (60nm)

Permittivité diélectrique : $\epsilon_{ox} = 3,45.10^{-13} \text{ F / cm}$

Longueur de grille : $L = 6\mu\text{m}$

Largeur de grille : $b = 100 \mu\text{m}$

Travail de sortie de la grille : $W_G = 4,22 \text{ eV}$

Dopage du substrat: $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Mobilité des trous dans le substrat : $\mu_p = 500 \text{ cm}^2/\text{V.s}$

Permittivité du Silicium : $\epsilon_{Si} = 10^{-12} \text{ F / cm}$

Largeur de la bande interdite du Si : $E_g = 1,12 \text{ eV}$

Affinité électronique du Si : $\chi = 4\text{eV}$

Concentration intrinsèque du Si à 300K : $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Tension thermodynamique : $U_T = kT/q = 26\text{mV}$ et $kT \approx 20\text{meV}$ à 300K

Charge de l'électron : $q = 1,6.10^{-19} \text{ C}$

Rappels :

- Travail de sortie d'un semi-conducteur de type P: $W_{sc} = \chi + E_g/2 + kT \ln N_A/n_i$
- Capacité de déplétion par unité de surface (F/cm²) : $C_{dep} = \epsilon_{sc} / W_{dep}$

$$\text{avec : } W_{dep} = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN_A} \Phi_{dep}}$$

I-Etude du substrat (notions issues du chapitre Transistor MOS et du cours sur les semiconducteurs)

1- Calculer la conductivité et la résistivité du substrat.

- 2- Donner l'expression permettant de localiser le niveau de Fermi E_F dans la bande interdite par rapport à la référence E_{Fi} (état intrinsèque, supposé au centre de la bande interdite). Calculer en eV l'écart $E_{Fi}-E_F$. (cf cours sur le T MOS).

II Etude de la Grille MOS

- 1) Calculer la tension de seuil idéale V_{T0} de la structure., faire le schéma.
- 2) **Pour $V_{GS} = V_{T0}$** , calculer la largeur W_{dep} de la zone dépeuplée qui se forme
- 3) Calculer, en F/cm^2 les capacités C_{ox} et C_{dep} puis la capacité globale C_G
- 4) On note V_{FB1} la tension de bande plate induite par la différence de travaux de sortie entre la grille et le Silicium. Calculer cette tension et en déduire la tension de seuil V_{T1} qui en résulte.
- 5) La tension de seuil réellement mesurée sur le dispositif vaut : $V_{T2} = 0,7V$. Quelle est la cause de l'écart entre V_{T1} et V_{T2} ? En déduire la charge d'interface Q_{SS} en C/cm^2 .

III-Caractéristiques courant – tension

On utilisera les expressions les plus simples du courant de drain I_D .

La tension de seuil vaut $V_T = 0,7V$ et la tension appliquée à la grille (source à 0V) $V_{GS} = 5V$.

Le facteur de conduction noté $K = \mu_n C_{ox}$ **vaut : $K = 2.10^{-5} A / V^2$**

- 1) **On applique une très faible tension de drain.** Donner l'expression de la résistance R_{ON} du composant et calculer sa valeur numérique.
- 2) **On se place maintenant à $V_{DS} = V_{Dsat}$**

Donner la caractéristique de transfert $I_D (V_{GS})$ et calculer la transconductance dynamique g_m .

Corrigé

I- Etude du substrat :

- 1) La conductivité : Elle est donnée par la concentration en atomes dopants (SC extrinsèque, cf cours de semiconducteurs).

$$\sigma_{\text{subs}} = q N_A \mu_p \# 0,8 \Omega \text{ cm}$$

- 2) La concentration de dopants est le nombre de porteurs dans le substrat :

On a donc d'après l'équation de Boltzmann simplifiée à 300K, le niveau de Fermi se trouvant sous le centre de la bande interdite dans un SC de type P :

$$p = N_A = n_i \cdot e^{(E_{Fi} - E_F)/kT} \text{ et donc } E_{Fi} - E_F = kT \ln(N_A/n_i) \# 0,36 \text{ eV avec } kT \# 20 \text{ meV}$$

- 3) Le travail de sorti :

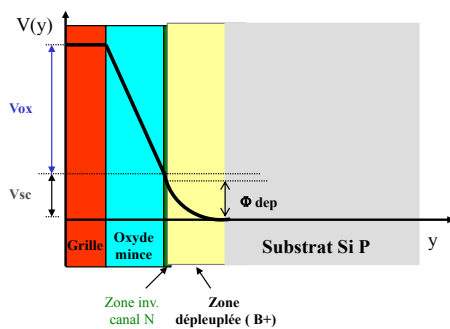
D'après la relation de l'énoncé (voir cours sur la tension de seuil du MOS)

$$W_{SC} = \chi + E_g/2 + kT \ln N_A/n_i \# 4,92 \text{ eV}$$

II-Etude de la grille MOS

- 1- La tension de seuil théorique ou idéale V_{T0}

Le schéma est sur la figure p8 du cours : on a $V_{T0} = \Phi_{\text{dep}} + V_{\text{ox}}$



$$\Phi_{\text{dep}} = 2U_T \ln \frac{N_A}{n_i} > 0 \text{ (canal N)}$$

soit ici **0,72 V**

$$V_{\text{ox}} = \frac{Q_{\text{dep}}}{C_{\text{ox}}} = \frac{1}{C_{\text{ox}}} \sqrt{2q\epsilon_{\text{Si}} N_A \Phi_{\text{dep}}} = \gamma \sqrt{\Phi_{\text{dep}}} > 0$$

Soit **0,83V**

La tension de seuil idéale (à 300K) est donc fixée par les deux paramètres fondamentaux que sont l'épaisseur du diélectrique de grille et le dopage de substrat :

$$V_{T0} \# 1,55 \text{ V}$$

Rappelons que cette valeur est bien plus élevée que la tension de seuil relevée sur les caractéristiques électriques des composants réels.

- 2- On se place à $V_{GS} = V_{T0}$: La charge d'espace sous la grille, est à sa valeur maximale car elle ne se développe qu'entre 0 et V_{T0} . Dès que la couche inversée

$$W_{\text{depmax}} = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN_A} \Phi_{\text{dep}}}$$

($n_s = N_{\text{subs}}$), la charge d'espace verticale est calée.

Soit $W_{\text{depmax}} \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ cm} = 0,3 \mu\text{m}$

- 3- Capacité de la structure MOS

La capacité C_G comme vue en cours comporte entre la grille et le substrat, deux composantes :

- La capacité de l'oxyde de grille en série avec la capacité de la charge d'espace (C_{depl}).

En considérant une structure de 1 cm^2 (pour simplifier les calculs et par hypothèse dans l'énoncé) on a :

$1/C_G = 1/C_{\text{ox}} + 1/C_{\text{depl}}$, la capacité minimale correspond à la tension de seuil (voir TD)

On a : $C_{\text{ox}} = \epsilon_{\text{ox}}/e_{\text{ox}} \approx 5,75 \cdot 10^{-8} \text{ F/cm}^2$ soit $57,5 \text{ nF/cm}^2$ (nommée C_{max} en pratique)

$C_{\text{depl}} = \epsilon_{\text{Si}}/W_{\text{depl}} \approx 2 \cdot 10^{-13} \text{ F/cm}^2$, on obtient un rapport des deux capacités important

d'autant plus que le diélectrique de grille est mince.

On trouve donc la valeur min proche de C_{depl} : $C_{\text{min}} \approx 0,13 \text{ pf/cm}^2$

La tension de grille associée est la tension de seuil V_{T0} dans notre exercice.

- 4- Tension de bande plate : V_{FB}

Comme vu dans le cours, le phénomène de déplétion peut être provoqué, sans aucune tension appliquée, ce qui réduit la tension de seuil théorique calculée précédemment. (cf TD sur le T MOS NMOS)

La tension de bande V_{FB1} est directement liée la valeur en eV de la différence des travaux de sortie déjà calculée : d'après le cours

$$V_{\text{FB1(V)}} = 4,22 - 4,92 = -0,7 \text{ V}$$

La tension de seuil corrigée vaut alors : $V_{\text{T1}} = V_{\text{T0}} + V_{\text{FB1}} = 1,55 - 0,7$

$$V_{\text{T1}} = 0,85 \text{ V}$$

5- La tension de seuil réelle mesurée vaut : $V_{T2} = 0,7V$

Comme indiqué dans le cours (p 7 et 8), la tension de bande plate peut être complétée par la contribution de charges positives d'ions dans le diélectrique, donnant lieu à des charges négatives (mobiles). Ces charges viennent s'ajouter à la charge du semi conducteur (voir TD).

Ainsi la différence entre V_{T2} et V_{T1} donne V_{FB2} ($V_{FB} = V_{FB1} + V_{FB2}$)

Donc : $V_{T2} - V_{T1} = 0,7 - 0,85$ soit $V_{FB2} = -0,15V$ due aux charges d'interface Q_{ss} .

soit $V_{FB2} = Q_{ss}/C_{ox}$ avec $C_{ox} = 5,75 \cdot 10^{-8} \text{ F/cm}^2$ déjà calculée au II.3.

$$Q_{ss} = -0,15 \times 5,75 \cdot 10^{-8} \approx -8,62 \cdot 10^{-9} \text{ C/cm}^2$$

III-Caractéristique statique courant-tension

On utilisera les expressions simplifiées (p 3 du cours) niveau 1 de SPICE)

1) La tension de drain est très faible : le terme $(V_{DS})^2/2$ est négligé.

On est alors en régime ohmique et donc : $I_D \approx K \frac{b}{L} (V_{GS} - V_T) V_{DS}$

La résistance R_{ON} se définit par le rapport V_{DS}/I_D : $R_{ON} \approx 700 \text{ Ohms}$

2) La tension de drain vaut $V_{DS} = V_{Dsat}$, soit par définition $V_{Dsat} = V_{GS} - V_T = 4,3V$

On obtient donc l'équation parabolique ordinaire :

$$I_D \approx K \frac{b}{2L} (V_{GS} - V_T)^2$$

En régime de petits signaux (fréquentiel), la transconductance est la dérivée de l'intensité : $g_m = d I_{Dsat} / d V_{GS}$ pour V_{DS} fixé (à 4,3V ici)

$$g_m = 1,43 \text{ mS}$$

Annale 2 : Sur le cours Dispositifs Bipolaires

Thème 1 : Transistor bipolaire NPN :

Un transistor NPN présente les caractéristiques $V_{BE}(\log I_C)$ et $V_{BE}(\log I_B)$ reportées sur la figure 1. La jonction collecteur base est en court circuit ($V_{BC} = 0$). Les caractéristiques sont :

$$I_C = 8.10^{-18} e^{V_{BE}/UT}$$

$$I_B = 10^{-19} e^{V_{BE}/UT}$$

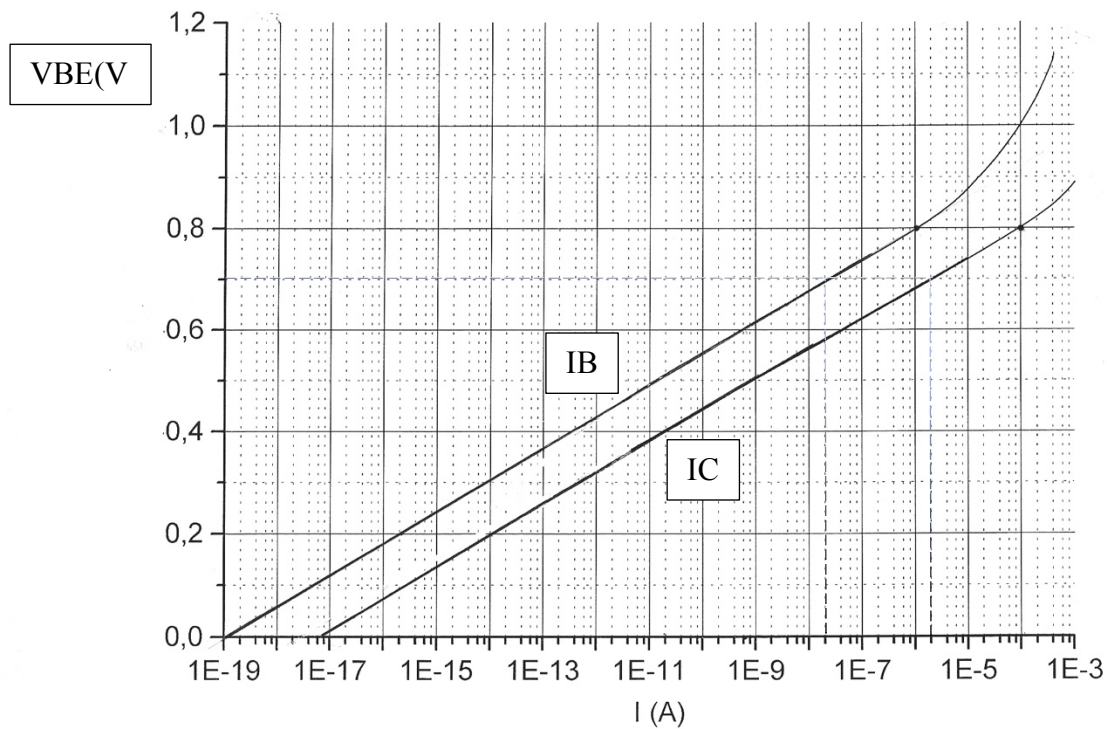


Figure 1 : Caractéristiques statiques du transistor

Caractéristiques du dispositif :

Aire : $A = 10^{-6} \text{ cm}^2$	Emetteur (N)	Base (P)
Dopage (cm^{-3})	$N_E = 5.10^{19}$	N_B à déterminer
Epaisseur (cm)	$W_E = 3.10^{-5}$	$W_B = 3.10^{-5}$
Constante de diffusion (cm^2/s)	$D_{pE} = 1$	$D_n = 10$

Autres données :

Concentration intrinsèque du Si : $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Permittivité : $\epsilon = 10^{-12} \text{ F/cm}$

Tension thermodynamique : $U_T = 26 \text{ mV}$

Charge élémentaire : $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Rappel du cours : expression de l'efficacité d'injection émetteur/base: $\gamma = \frac{D_n \frac{W_E}{N_E}}{D_p \frac{W_B}{N_B}}$

On polarise le transistor de telle sorte que : $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ et $V_{BC} = 0$.

1.a) A partir des relevés de la figure 1, donner les valeurs de I_C , I_B et la valeur du gain en courant β du transistor.

1.b) A partir de l'expression de J_{sn} (voir cours), établir l'expression du dopage de la base N_B et calculer sa valeur en relevant la valeur de I_{sn} sur la figure 1 (tenir compte de l'aire A).

2.a) Calculer l'efficacité d'injection de la jonction émetteur base.

2.b) Connaissant le gain β , en déduire la valeur du facteur de transport dans la base δ_B .

3.a) Calculer le temps de transit dans la base τ_B et la durée de vie des électrons τ_{nB}

3.b) Calculer la transconductance dynamique g_m pour le point de fonctionnement considéré en 1.a

3.c) Calculer la capacité de stockage C_{sn} des électrons dans la base

3.d) Calculer le facteur de mérite F_T théorique (maximum) du transistor ce dernier étant supposé donné par g_m et τ_B .

Indiquer comment augmenter sa valeur sans modifier la structure .

Corrigé

Thème 1 : Transistor bipolaire NPN

1.a) A partir du relevé des caractéristiques statiques aux bas niveaux (GUMMEL PLOTS), en se plaçant à $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$ on lit :

$$I_C = 2 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 2 \mu\text{A}$$

$$I_B = 2 \cdot 10^{-8} \text{ A} = 20 \text{ nA}$$

$$\beta = 100$$

1.b) D'après le cours, l'expression de $J_{sn} = q n_i^2 D_n / N_B W_B$ conduit à : $N_B = q n_i^2 D_n / J_{sn} W_B = 7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

2.a) L'efficacité d'injection de la diode D1 (Émetteur/base) vaut selon la relation de l'énoncé : $\gamma = 745$

2.b) Le gain valant 100, en écrivant son expression en fonction des deux paramètres γ et δ , le facteur de transport dans la base s'écrit: $1/\delta = 1/\beta - 1/\gamma$ soit $\delta = 115$. Ce dernier conditionne la valeur du gain étant $< \gamma$

3.a) Le temps de transit est donné par la relation du cours : $\tau_B = W_B^2 / 2 D_n = 4,5 \cdot 10^{-11} \text{ s}$ soit 45 ps
Connaissant le facteur de transport et sa définition $\delta = \text{durée de vie} / \text{temps de transit}$, on en déduit :

$$\tau_{nB} = \tau_B \cdot \delta = 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ s} = 5,2 \text{ ns}$$

3.b) La transconductance en petits signaux est donnée par I_C , soit:

$$g_m = I_C / U_T = 2 \cdot 10^{-6} / 26 \cdot 10^{-3} = 3,85 \cdot 10^{-5} \text{ S}$$

3.c) la capacité de stockage dans la C_s s'écrit : $C_s(B) = g_m \cdot \tau_B = 1,73 \cdot 10^{-15} \text{ F}$

3.d) Le facteur de mérite F_T d supposé seulement fonction g_m et τ_B s'écrit : $1/2\pi F_T(\text{théo.}) = \tau_B$
d'où

$F_T(\text{Théo}) = 1/2\pi\tau_B \approx 3,54 \text{ GHz}$

Remarque, le fonctionnement en Gummel plot (CC base collecteur) ne conduirait pas à cette valeur car l'intensité I_c est trop faible (cf TD)