

Extraction de la tension de seuil, la mobilité à faible champs, et de la longueur effective des transistors.

Nous allons décrire des méthodes simples permettant d'extraire expérimentalement les paramètres tension de seuil, mobilité à faible champ et longueur effective d'un transistor MOS. L'extraction de ces paramètres est une étape fondamentale de la technologie, aussi bien pour comparer l'efficacité d'une filière par rapport à une autre que pour calibrer les outils de simulation circuit.

I Théorie : conduction en régime ohmique dans le canal d'un transistor NMOS

Ces trois paramètres sont extraits en régime ohmique, ie en appliquant une tension de drain V_d très faible, de l'ordre de 10 mV, ou encore $V_d \ll V_{dsat}$. Dans ces conditions, le courant de drain peut s'exprimer de la façon suivante :

$$I_d(V_g, V_d) = \frac{W}{L} \mu_{eff}(V_g) Q_i(V_g) V_d \quad (1)$$

W et L sont les dimensions du transistor, (avec L la longueur de canal), μ_{eff} est la mobilité effective, et Q_i la valeur absolue de la charge d'inversion (par unité de surface).

En règle générale, la mobilité effective dépend de la tension de grille. En effet, plus on augmente la tension de grille, plus le champ électrique à l'interface est fort, et donc plus le canal est étroit (même s'il compte une densité surfacique d'électrons plus importante). En conséquence, les collisions avec la rugosité de surface (à l'interface Si/SiO₂) sont plus nombreuses, et donc la mobilité effective est dégradée. On peut modéliser ce comportement par la loi empirique suivante¹ :

$$\mu_{eff}(V_g) = \frac{\mu_0}{1 + \frac{Q_i(V_g)}{Q_c}} \quad \text{avec } Q_c \cong q \times 10^{17} \text{ m}^{-2} \quad (2)$$

μ_0 est aussi appelée mobilité à faible champ. D'après la relation précédente, la mobilité effective est égale à la mobilité à faible champs lorsque $Q_i \ll Q_c$, en régime de faible inversion par exemple. Cette mobilité à faible champ dépend essentiellement de la température (collision avec les phonons) et du dopage (collision avec les impuretés + écrantage).

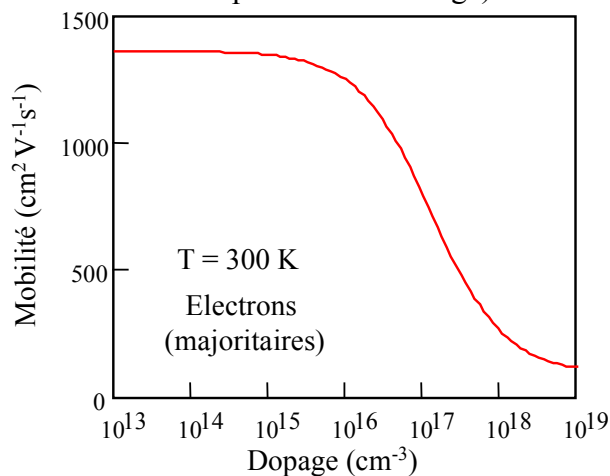


Figure 1 : dépendance de la mobilité à faible champ en fonction du dopage pour le silicium massif dopé N à 300 K en fonction du dopage.

¹ Attention à ne pas confondre cette relation (qui relie la mobilité avec le champ transverse) avec celle qui relie la mobilité effective avec le champ longitudinal, qui dépend de V_d . L'équation (2) est en toute rigueur valable qu'en régime ohmique.

En forte inversion (c'est à dire lorsque le canal d'électrons entre la source et le drain est ouvert), les expressions (1) et (2) peuvent se simplifier. En effet, en forte inversion, la charge d'inversion dépend linéairement de la tension de grille suivant la relation :

$$Q_i(V_g) \approx C_{ox} (V_g - V_T) \quad (\text{si } V_g > V_T) \quad (3)$$

où C_{ox} désigne la capacité de l'oxyde (par unité de surface), i.e. $C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$. On en déduit :

$$\mu_{eff}(V_g) = \frac{\mu_0}{1 + \theta(V_g - V_T)} \quad (4)$$

$$I_d(V_g, V_d) = G_m V_d \frac{(V_g - V_T)}{1 + \theta(V_g - V_T)} \quad (5)$$

en posant $G_m = \frac{W}{L} C_{ox} \mu_0$ et $\theta = \frac{C_{ox}}{Q_c}$.

De ces équations, nous allons à présent déduire des méthodes d'extraction de paramètres.

II Extraction de V_T en négligeant la dépendance de la mobilité en fonction de la tension de grille.

Pour des faibles valeurs de θ , le terme $\theta(V_g - V_T)$ peut être négligeable devant 1. C'est le cas en particulier quand C_{ox} est faible, c'est à dire quand des oxydes épais sont utilisés. Dans ce cas, l'équation reliant le courant de drain en fonction de la tension de grille en forte inversion ($V_g > V_T$) et en régime ohmique ($V_d \ll V_{dsat}$) est donnée par :

$$I_d(V_g, V_d) = G_m V_d (V_g - V_T) \quad (6)$$

Il est donc facile d'extraire la pente de cette droite ($G_m V_d$) et d'extrapoler son intersection avec l'axe des abscisse (V_T). Connaissant G_m , on peut extraire la mobilité à faible champ μ_0 et la longueur de canal effective des transistors (voir suite).

III Extraction de V_T en prenant en compte la dépendance de la mobilité en fonction de la tension de grille.

Malheureusement, la méthode précédente est peu adaptée à l'extraction précise de V_T , à cause de la dépendance de la mobilité en fonction de la tension de grille. C'est pourquoi l'approche suivante a été développée. Si on calcule la dérivée g_m de I_d en fonction de V_g (aussi appelée « transconductance »), on obtient en régime ohmique et en forte inversion :

$$g_m(V_g, V_d) = \frac{G_m V_d}{(1 + \theta(V_g - V_T))^2} \quad (7)$$

En utilisant les expressions (5) et (7), on peut montrer que la fonction mathématique $Y(V_g)$ définie par :

$$Y(V_g) = \frac{I_d(V_g)}{\sqrt{g_m(V_g)}} \quad (8)$$

dépend linéairement de la tension de grille en forte inversion :

$$Y(V_g) = \sqrt{G_m V_d} (V_g - V_T) \quad (9)$$

Autrement dit, en mesurant I_d en fonction de la tension de grille en régime ohmique, et en calculant la fonction Y à partir de la relation (8), on peut déduire de la droite obtenue la tension de seuil et la grandeur G_m . (voir figures 2 et 3).

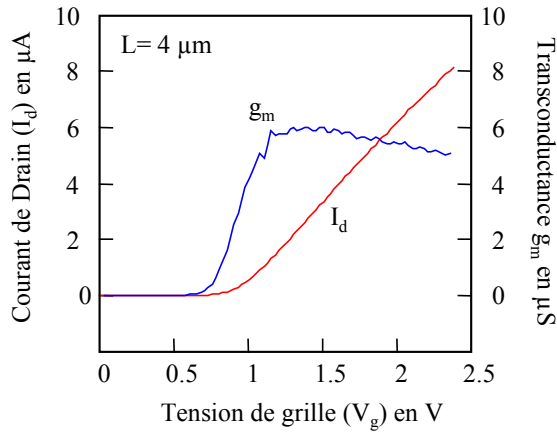


Figure 2 : Courbes $I_d(V_g)$ et $g_m(V_g)$ obtenues sur un transistor NMOS réalisé au CIME ($L=4 \mu\text{m}$ et $t_{\text{ox}}=520 \text{ \AA}$)

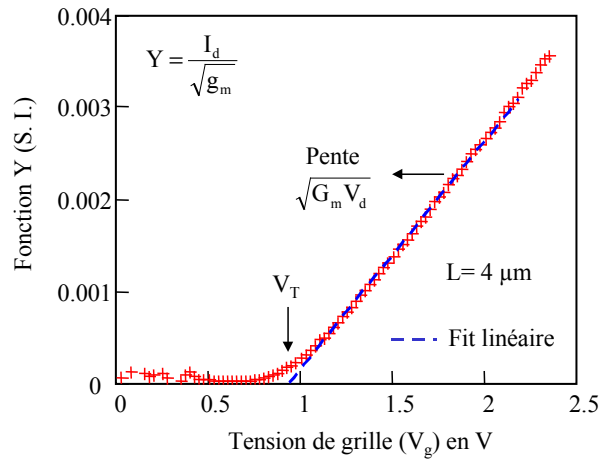


Figure 3 : Fonction Y obtenue à partir des mesures de la figure 1.

IV Extraction de la mobilité à faible champ et de la longueur de canal effective :

Les méthodes précédentes permettent d'extraire le paramètre $G_m = \frac{W}{L} C_{\text{ox}} \mu_0$.

Si on trace G_m en fonction de la longueur de canal L pour des transistors appartenant à une même plaque, on obtient une droite qui ne passe pas exactement par l'origine (figure 4).

Ce décalage est dû à un écart existant entre la valeur de longueur de canal L attendue et la longueur de canal L' réel. L'erreur ΔL existant entre L et L' est due à l'incertitude de la techno (lithographie et gravure). En première approximation, puisque les transistors d'une même plaque ont vu les mêmes procédés, le décalage ΔL est le même quelque soit L .

En conséquence, en traçant $1/G_m$ en fonction de L , on peut non seulement extraire la mobilité μ_0 de la pente de la courbe, mais aussi décalage ΔL .

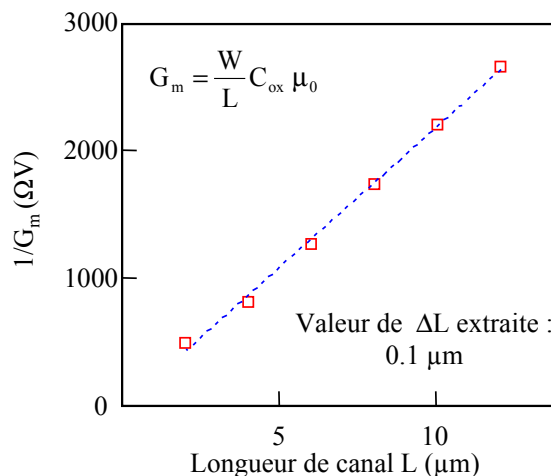


Figure 4 : Courbes $1/G_m$ en fonction de L obtenues sur des transistors NMOS réalisés au CIME de longueur de canal attendu L variable ($t_{\text{ox}}=520 \text{ \AA}$)

V Travail à réaliser :

1°) Pour $V_T = 0.6$ V et V_g variant de 0 à 3 V, calculer l'épaisseur d'oxyde à partir de laquelle l'atténuation de la mobilité due à la rugosité de surface commence à être significative.

2°) mesurer les courbes $I_d(V_g)$ en régime ohmique ($V_d=10$ mV) pour toutes les longueurs de canal disponible sur le circuit JOPE. Pour chaque courbe :

- Extraire G_m et V_T en négligeant l'atténuation de mobilité.
- Extraire G_m et V_T en prenant en compte l'atténuation de la mobilité.

Conclusion ?

3°) En déduire de ces mesures la mobilité à faible champs et la correction ΔL à apporter pour connaître la longueur de canal effective.

Notes :

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\epsilon_{ox} = 3.9 \epsilon_0$$

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$k T = 26 \text{ meV}$$