

Junction PN et MOS

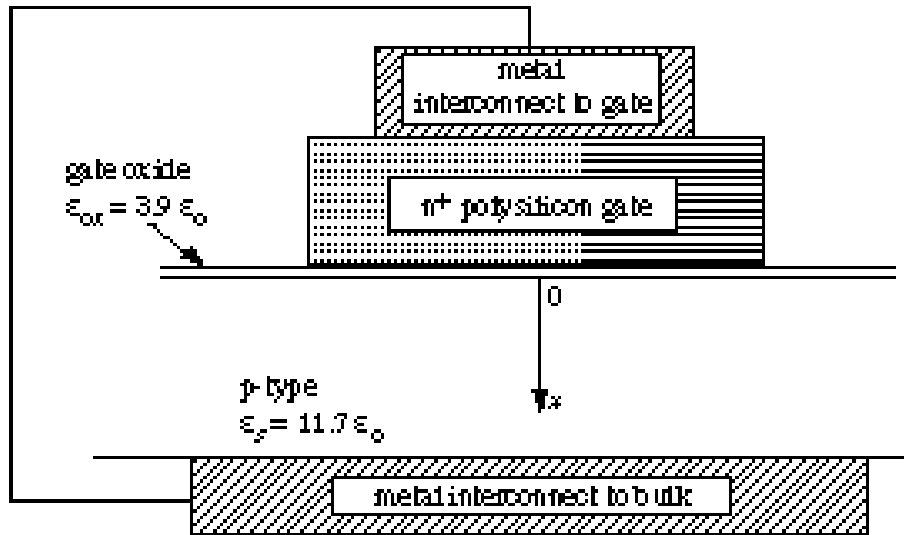
Metal-Oxide-Semiconductor

Sommaire

1. Introduction à la structure MOS
2. Comportement du MOS à l'équilibre thermoélectrique
3. Fonctionnement du MOS polarisé

1. Introduction

Metal-Oxide-Semiconductor

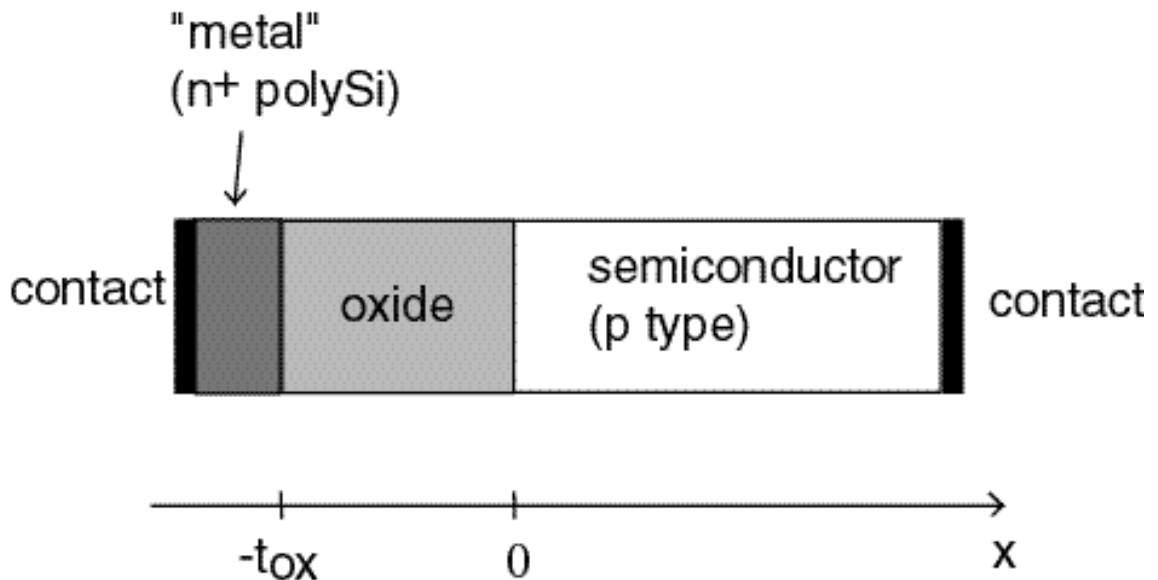


MOS au coeur de la révolution industrielle:

- Fonctions analogiques et numériques
 - Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) est l'élément clé de la famille de circuits Complementary -Oxide-Semiconductor (CMOS)
- Fonctions mémoire
 - "Dynamic Random Access Memory" (DRAM)
 - "Static Random Access Memory" (SRAM)
 - "Non-Volatile Random Access Memory" (NVRAM)
- Imagerie
 - Caméra "Charge Coupled Device" (CCD)
- Afficheurs
 - "Active Matrix Liquid Crystal Displays" (AMLCD)

2. Electrostatique du MOS à l'équilibre

Structure 1D idéale:

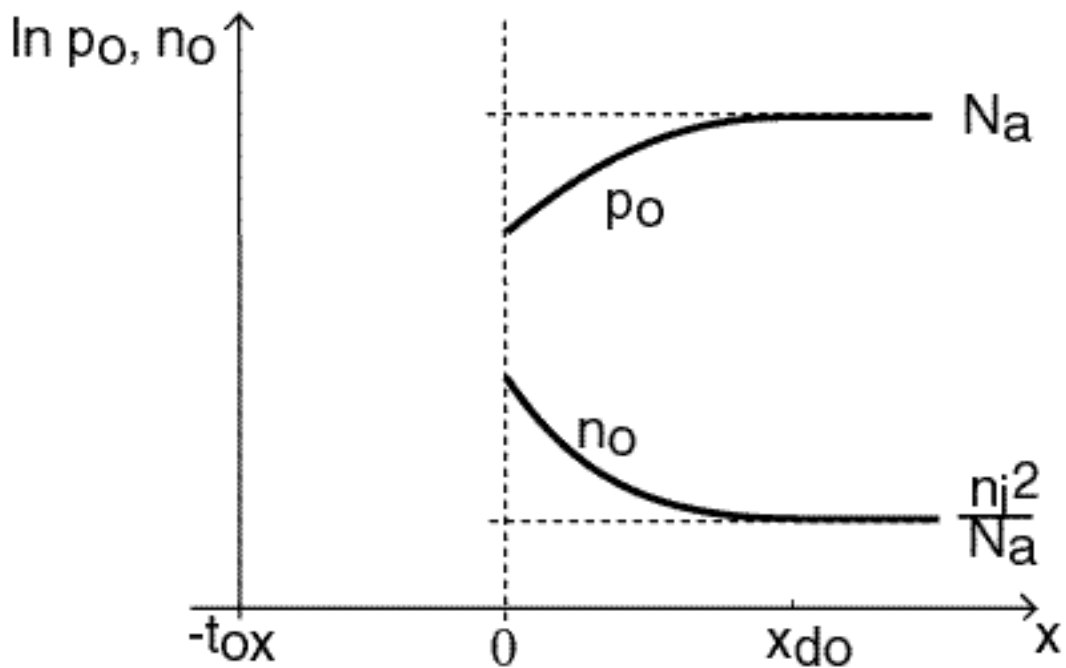


- **Metal:** Pas de charge volumique
 - $\Rightarrow$ uniquement en surface
- **Oxide:** isolant, pas de charge volumique
 - $\Rightarrow$ pas de porteurs libres, non dopé
- **Semiconducteur:** Charges volumiques possibles
 - $\Rightarrow$ Region (Zone) de charges d'espace (SCR/ZCE)

On suppose (équilibre thermique) que le contact de Grille est connecté au "Bulk" (i. e, $V_{GB} = 0V$)

Profil des concentrations metal - oxyde -Si

Similaire à une jonction coté P, charges coté N+



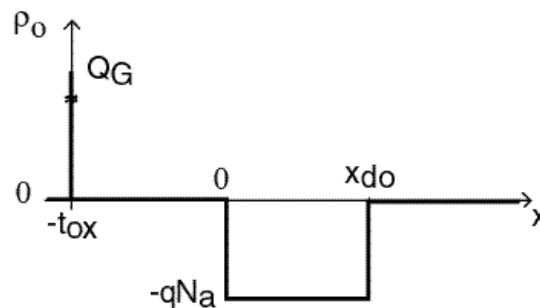
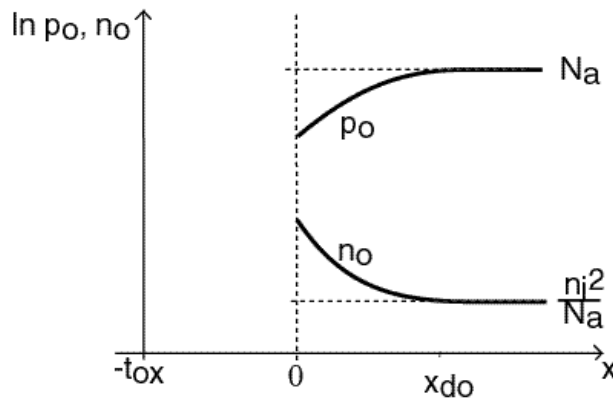
Rappel $n_o p_o = n_i^2$ $n_i = 1,45 \cdot 10^{10}$

Densité moindre à l'interface **Si / SiO₂**

⇒

⇒ **Les accepteurs sont "ionisés" (charge volumique)**

Densité de charge d'espace



- Semiconducteur: zone de charge d'espace à l'interface Si /SiO₂
 - *approximation zone de déplétion*
- Metal : "feuille" de charges à l'interface Metal/SiO₂
- Equilibre total des charges :

$$x = -t_{ox};$$

$$\sigma = Q_G$$

$$-t_{ox} < x < 0;$$

$$\rho_o(x) = 0$$

$$0 < x < x_{do};$$

$$\rho_o(x) = -qN_a$$

$$x > x_{do};$$

$$\rho_o(x) = 0$$

Champ Electrique

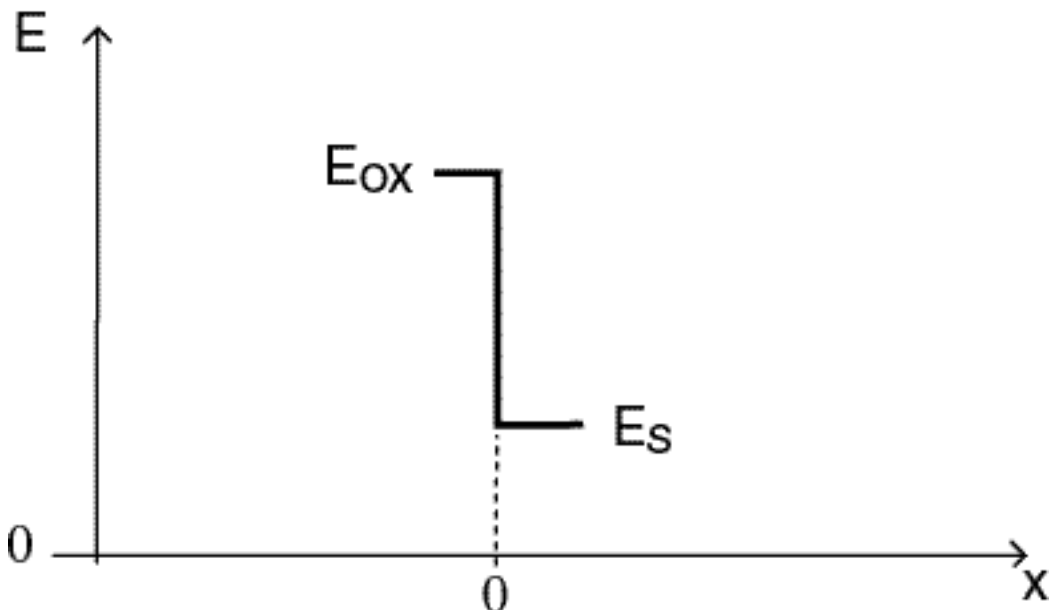
Integration de l'équation de Poisson:

$$E_o(x_2) - E_o(x_1) = \frac{1}{\epsilon} \int_{x_1}^{x_2} \rho(x') dx'$$

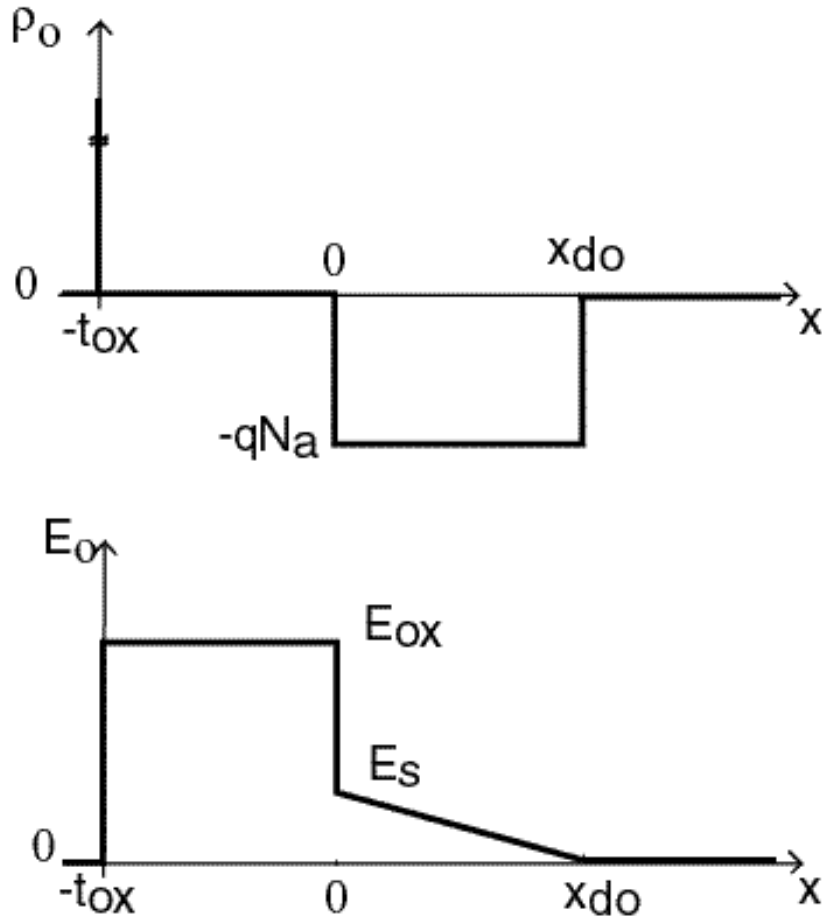
A l'interface entre l'oxyde et SC, il y a un changement de **permittivité** $\Rightarrow$ changement dans le champ électrique

$$\epsilon_{ox} E_{ox} = \epsilon_s E_s$$

$$\frac{E_{ox}}{E_s} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} \approx 3$$



Intégration dans le semi-conducteur:



$$x > x_{do}; \quad E_o(x) = 0$$

$$0 < x < x_{do}; \quad E_o(x) - E_o(x_{do}) = \frac{1}{\epsilon_s} \int_{x_{do}}^x -qN_a dx' = -\frac{qN_a}{\epsilon_s} (x - x_{do})$$

$$-t_{ox} < x < 0; \quad E_o(x) = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} E_o(x = 0^+) = \frac{qN_a x_{do}}{\epsilon_{ox}}$$

$$x < -t_{ox}; \quad E(x) = 0$$

Potentiel Electrostatique

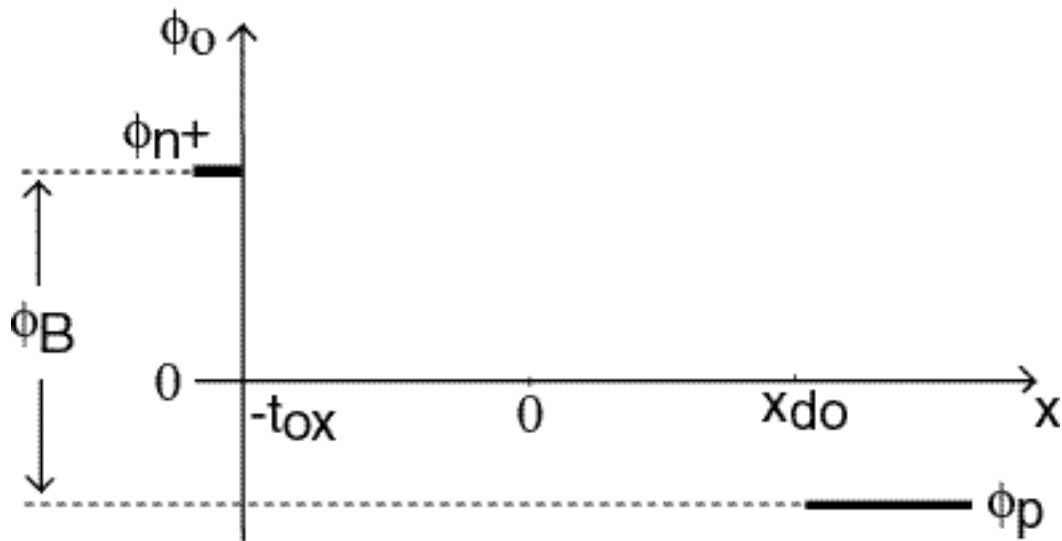
(avec $\phi = 0$ @ $n_o = p_o = n_i$)

$$\phi = \frac{kT}{q} \bullet \ln \frac{n_o}{n_i} \quad \phi = -\frac{kT}{q} \bullet \ln \frac{p_o}{n_i}$$

En QNRs, n_o et p_o sont connus $\Rightarrow$ détermination de ϕ

en p-QNR: $p_o = N_a \Rightarrow \phi_p = -\frac{kT}{q} \bullet \ln \frac{N_a}{n_i}$

grille n^+ : $n_o = N_d^+ \Rightarrow \phi_g = \phi_{n^+}$

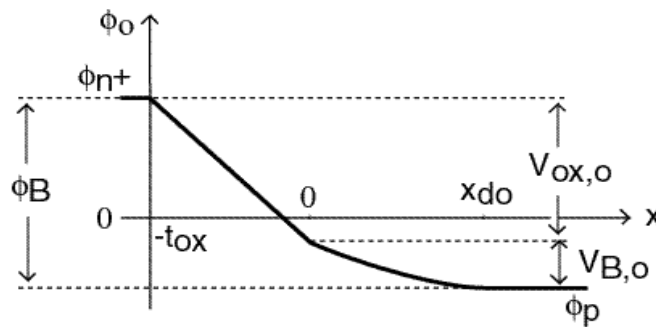
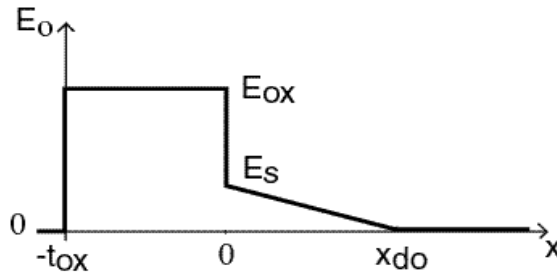


Potentiel "built-in":

$$\phi_B = \phi_g - \phi_p = \phi_{n^+} + \frac{kT}{q} \bullet \ln \frac{N_a}{n_i}$$

Pour $\phi_o(x)$, on intègre $E_o(x)$;
à partir du "bulk" du semiconducteur:

$$\phi_o(x_2) - \phi_o(x_1) = - \int_{x_1}^{x_2} E_o(x') dx'$$



$$x > x_{do}; \quad \phi_o(x) = \phi_p$$

$$0 < x < x_{do}; \quad \phi_o(x) - \phi_o(x_{do}) = - \int_{x_{do}}^x - \frac{qN_a}{\epsilon_s} (x' - x_{do}) dx'$$

$$\phi_o(x) = \phi_p + \frac{qN_a}{2\epsilon_s} (x - x_{do})^2$$

$$-t_{ox} < x < 0; \quad \phi_o(x) = \phi_p + \frac{qN_a x_{do}^2}{2\epsilon_s} + \frac{qN_a x_{do}}{\epsilon_{ox}} (-x)$$

$$x < -t_{ox}; \quad \phi_o(x) = \phi_{n+}$$

On y est presque

Une inconnue $x_{do} \Rightarrow$ **besoin d'une dernière équation**

La différence de potentiel (structure) est égale à ϕ_B :

$$\phi_B = V_{B,o} + V_{ox,o} = \frac{qN_a x_{do}^2}{2\epsilon_s} + \frac{qN_a x_{do} t_{ox}}{\epsilon_{ox}}$$

La résolution quadratique de l'équation donne:

$$\begin{aligned} x_{do} &= \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} t_{ox} \left[\sqrt{1 + \frac{2\epsilon_{ox}^2 \phi_B}{q\epsilon_s N_a t_{ox}^2}} - 1 \right] \\ &= \frac{\epsilon_s}{C_{ox}} \left[\sqrt{1 + \frac{2C_{ox}^2 \phi_B}{q\epsilon_s N_a}} - 1 \right] \end{aligned}$$

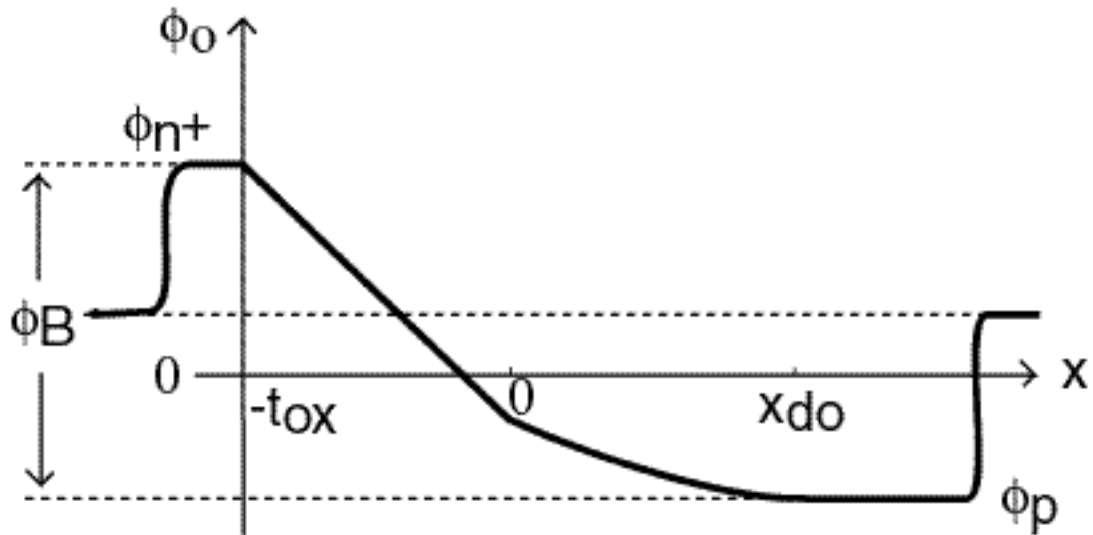
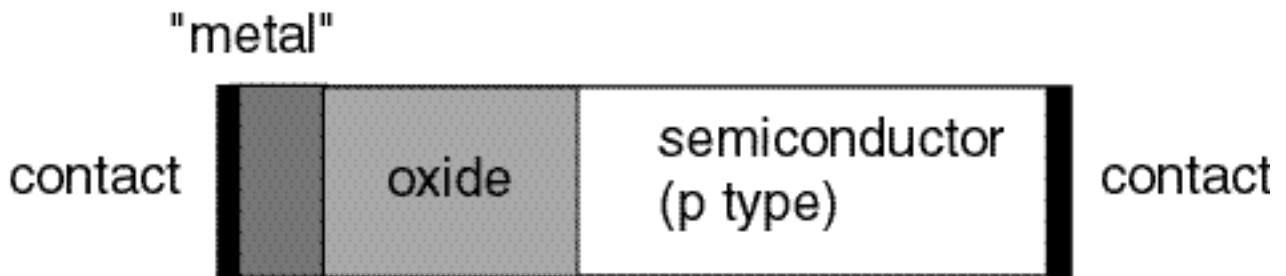
Avec C_{ox} = capacité par aire unité de l'oxyde (F/m²)

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

Le problème est maintenant complètement résolu!

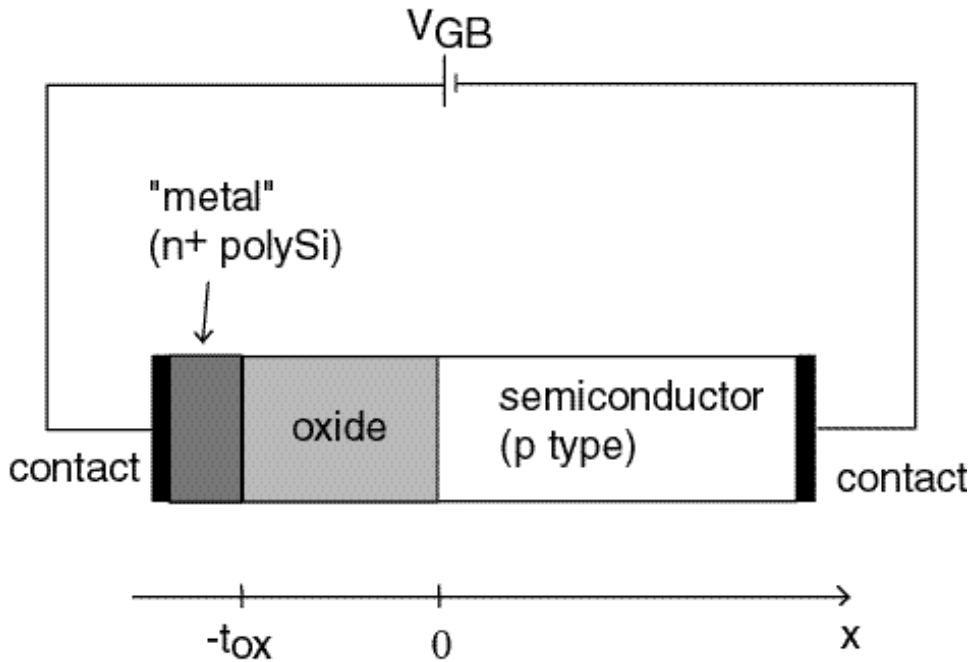
Il y a aussi des potentiels de contact

⇒ La différence de potentiel contact à contact est égale à 0!



3. MOS polarisé par V_{GB}

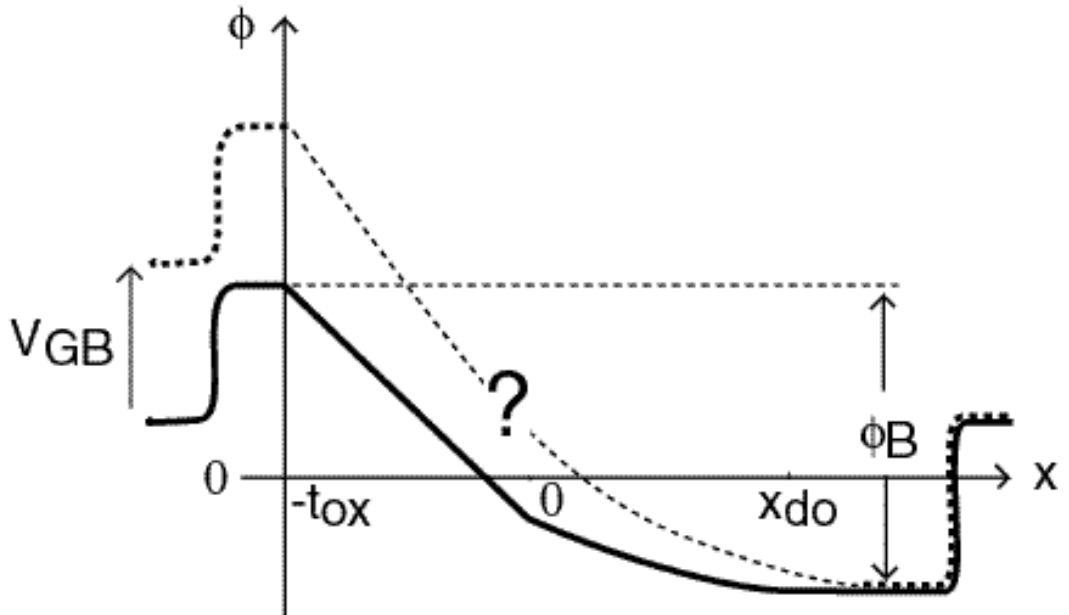
Appliquons une tension V_{GB} :



Le fonctionnement de la structure MOS est modifié
⇒ La différence de potentiel totale est maintenant $\neq 0$

Comment la différence de potentiel s'adapte?

Montrons la différence de potentiel entre l'oxyde et la ZCE dans le semiconducteur



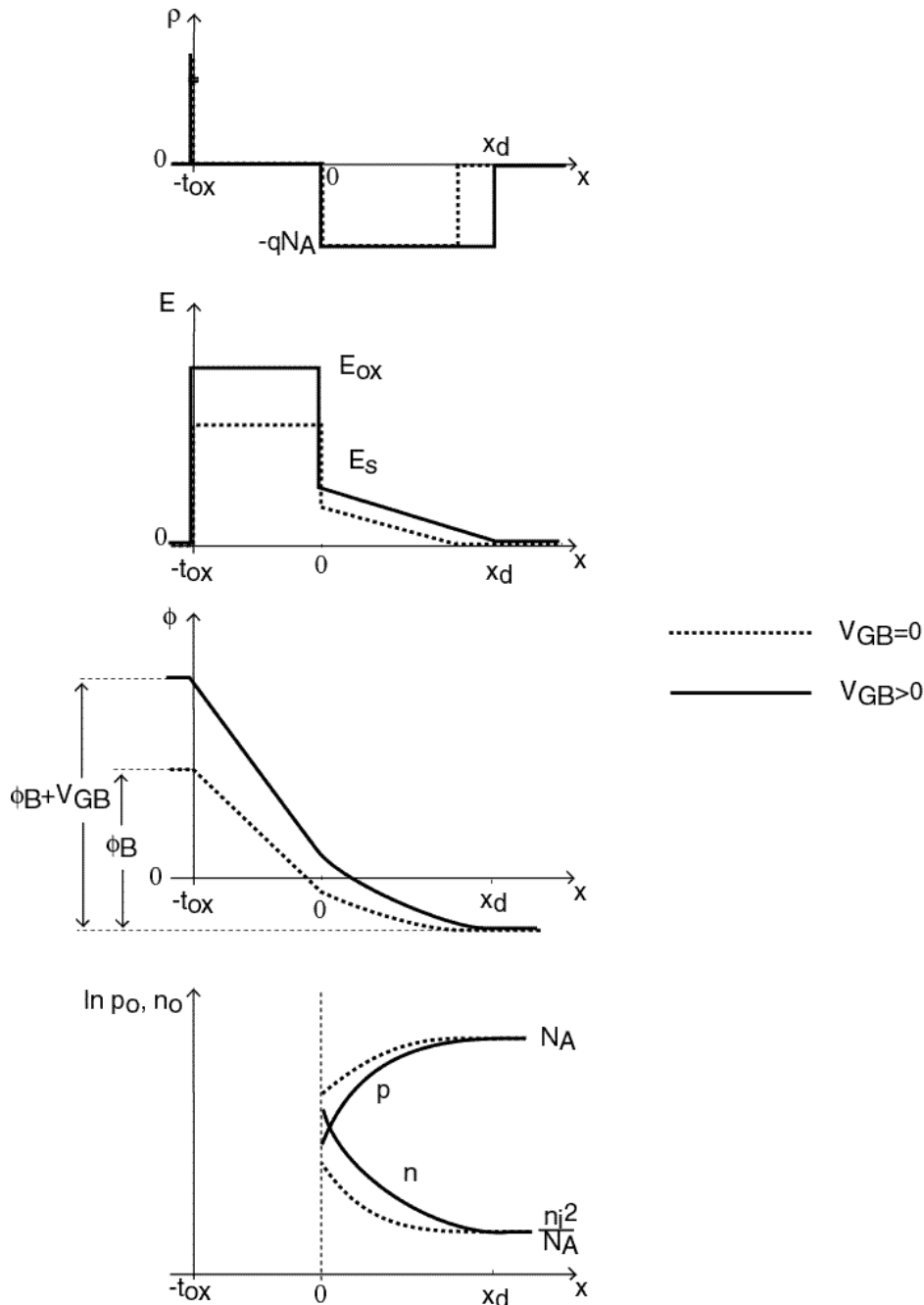
L'oxyde est un isolant $\Rightarrow$ pas de courant dans la structure

Dans la ZCE, le "quasi-equilibre" prévaut

$\Rightarrow$ Nouveau compromis entre "drift" et diffusion

- Qualitativement identique à l'équilibre thermique (mais la redistribution des charges est différente)
- $np = n_i^2$

Soit $V_{GB} > 0$: La différence de potentiel augmente
 $\Rightarrow$ nécessité d'un dipole plus chargé $\Rightarrow$ ZCE s'étend
dans le substrat du semiconducteur



Comment s'en rappeler facilement:

avec $V_{GB} > 0$, la grille attire les e^- et repousse les trous.

Qualitativement, le comportement physique n'est pas affecté $V_{GB} > 0$. On utilise la formulation mathématique à l'équilibre, mais :

$$\phi_B \rightarrow \phi_B + V_{GB}$$

Par ex., pour déterminer $x_d(V_{GB})$:

$$\begin{aligned}\phi_B + V_{GB} &= V_B(V_{GB}) + V_{ox}(V_{GB}) \\ &= \frac{qN_a x_d^2(V_{GB})}{2\epsilon_s} + \frac{qN_a x_d(V_{GB})t_{ox}}{\epsilon_{ox}}\end{aligned}$$

$$x_d(V_{GB}) = \frac{\epsilon_s}{C_{ox}} \left[\sqrt{1 + \frac{2C_{ox}^2 (\phi_B + V_{GB})}{\epsilon_s q N_a}} - 1 \right]$$

$$\phi(0) = \phi_s = \phi_p + \frac{qN_a x_d^2(V_{GB})}{2\epsilon_s}$$

ϕ_s donne les concentrations n & p à la surface

Résumons?

Concepts clés

- Redistribution des charge dans la structure MOS à l'équilibre
 - ZCE dans le semiconducteur
 - $\Rightarrow$ **potentiel interne dans la structure MOS**
- Généralement, on utilise l'approximation de déplétion pour la ZCE semiconducteur
- L'application d'une tension fait varier la largeur de la région de déplétion dans le semiconducteur
 - **Pas de circulation de courant**

Exercice lec6_f4_pn_electrostat_MOS

- On considère un transistor NMOS de concentration équivalente sur la grille $n^+=2.10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et de concentration de substrat $N_A=3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.
- 1) Donnez la barrière de potentiel (« built-in ») de la jonction (on a n_i =concentration intrinsèque du silicium = $1,5.10^{10}$) pour $V_{GB}=0$
- 2) Donnez la valeur de l'épaisseur de la zone de déplétion pour une épaisseur d'oxyde de $t_{ox}=50 \text{ nm}$ (on rappelle $\epsilon_s=1.10^{10} \text{ F/m}$, $\epsilon_{ox}=3,45.10^{11} \text{ F/m}$)
- 3) Calculez la formule suivante :
$$\sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_s \phi_B}{q \cdot N_A}}$$
- Et comparez à la valeur trouvée en 2) et conclure.
- 4) Donnez la valeur de l'épaisseur de la zone de déplétion pour $V_{GB}=1 \text{ V}$