

Chapitre 2.

Structure Métal-Isolant Semi-conducteur (MIS).

S. LATRECHE

I- Introduction :

Cette structure est **fondamentale** car elle **est la base du composant** le plus utilisé en électronique : le transistor à effet de champ ou **MOSFET**.

De plus, la surface des semi-conducteurs est en général recouverte d'un oxyde après fabrication aussi mincesoit-il. Les interfaces métalliques sont donc en réalité des structures métal-oxyde-semiconducteur.

✚ Réalisation:

La réalisation d'une structure MOS est simple :

- la surface du semi-conducteur est oxydée thermiquement pour former une couche d'isolant (SiO_2) de 10 à 50 nm avec une densité minimale de pièges à l'interface isolant-semi-conducteur.
- Les contacts électriques sont réalisés par dépôts métalliques ou par des couches de silicium polycristallin fortement dopées appelées "polysilicium".
- **Polysilicium ou poly-Si** est obtenu par croissance de silicium à basses température (LPCVD à une température de 620 °C). Les cristaux de silicium polycristallin ont un diamètre de 0.03 à 0.3 μm et une hauteur de la taille de la couche déposée

II- Diagramme énergétique :

II-1 Structure métal-vide-semiconducteur

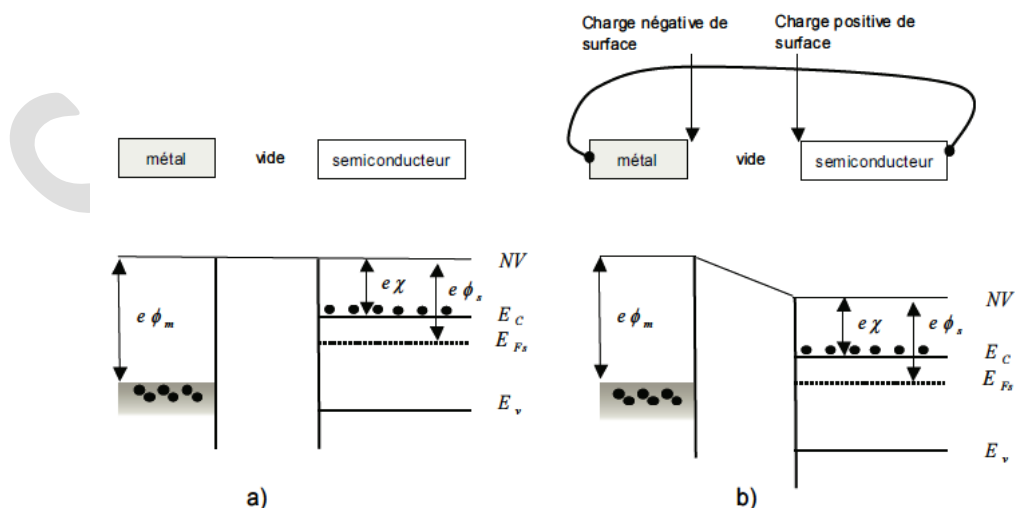


Figure 2.1 : Structure métal-vide-semiconducteur : a : 2 structures séparées, b : structures reliées.
[H. Mathieu, 'Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques']

Caractéristiques du métal :

- $q\phi_m$: travail de sortie

Caractéristiques du semiconducteur:

- $q\phi_s$: travail de sortie
- $q\chi_s$: affinité électronique

Ces deux systèmes sont indépendants, les niveaux de Fermi dans chacun d'eux sont respectivement à la distance $e\phi_m$ et $e\phi_s$ d'un niveau du vide.

- $q\Phi_m$: travail de sortie du métal
- $q\Phi_s$: travail de sortie du semi-conducteur
- Si le métal et le semi-conducteur sont reliés électriquement, ils constituent un seul système thermodynamique, leur niveau de FERMI s'alignent et une différence de potentiel créée par les différences des travaux de sortie apparaît :

$$V_d = \phi_m - \phi_s \quad \text{ou} \quad \phi_{ms}$$

A cette différence de potentiel sont associés un champ électrique et une charge d'espace par les relations

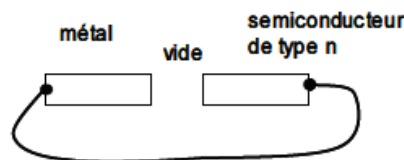
$$E = -\frac{dV}{dx} \quad \frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon}$$

Une courbure de bande apparaît dans le semiconducteur lors de l'assemblage des deux systèmes et une ZCE apparaît dans le S/C.

La nature de la charge d'espace et la courbure des bandes sont fonction d'une part du type du semiconducteur et d'autre part de la différence des travaux de sortie $e\phi_m - e\phi_s$.

✚ Cas d'un semi-conducteur type N :

Différentes valeurs relatives des travaux de sortie du métal et du semi-conducteur sont à considérer.



➤ **Premier cas : $\phi_m < \phi_s$**

Dans ce cas, $V_s - V_m$ est négatif,

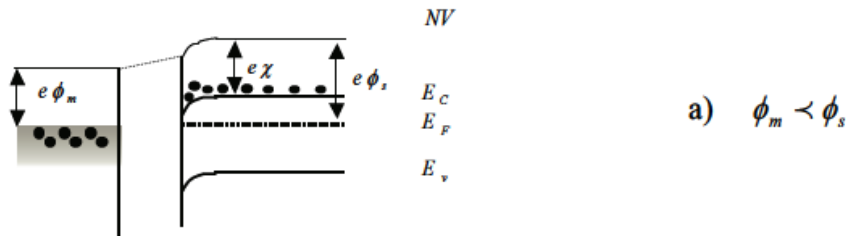
- $\phi_m < \phi_s \rightarrow V_s - V_m < 0 \rightarrow$ ♦ des charges >0 se développent dans le métal
♦ et des charges <0 se développent dans le S/C.

Les charges >0 dans le métal résultent d'un départ d'électrons de la surface.

Les charges <0 dans le semiconducteur résultent d'une accumulation d'électrons vers la

Surface.

Il s'ensuit alors que la bande de valence et la bande de conduction se courbent vers le bas . Lesemiconducteur est dit en régime d'accumulation, le diagramme énergétique est représenté sur la figure (2-2-a).



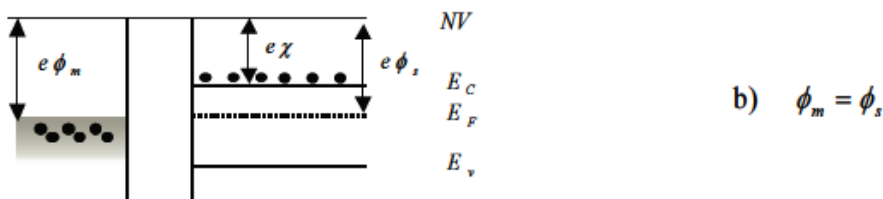
[H. Mathieu, 'Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques']

➤ **Deuxième cas : $\phi_m = \phi_s$**

Dans ce cas, $V_s - V_m$ est nul.

$\phi_m = \phi_s \rightarrow V_s - V_m = 0 \rightarrow$

la tension de diffusion est nulle, aucune charge n'apparaît, les **bandes restent horizontales**, le semiconducteur est dit **en régime de bandes plates**. Le diagramme énergétique est représenté sur la figure 2-2b.



[H. Mathieu, 'Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques']

➤ **troisième cas : $\phi_m > \phi_s$**

Dans ce cas, $V_s - V_m$ est positif,

- $\phi_m > \phi_s \rightarrow V_s - V_m > 0 \rightarrow$
- ◆ des charges <0 se développent dans le métal (accumulation d'e- en surface).
 - ◆ et des charges >0 se développent dans le S/C.

Les charges positives dans le semiconducteur résultent :

- 1- du **départ d'électrons** et proviennent
- 2- d'une part de la **présence d'ions donneurs** noncompensés par la charge électronique, et
- 3- d'autre part de **l'augmentation correspondante du nombre de trous** résultant de la condition $np = Cte$.

A la diminution de la densité électronique est associée une courbure des bandes vers le haut.

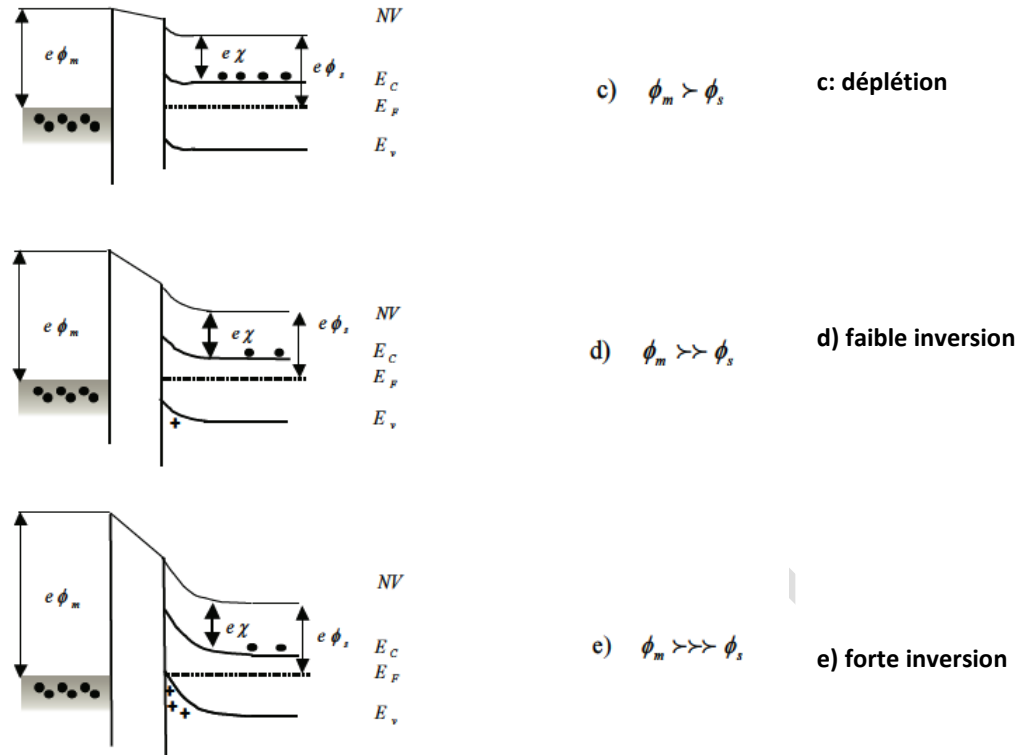
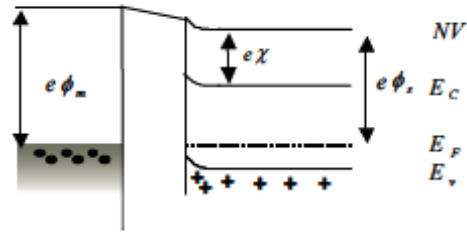
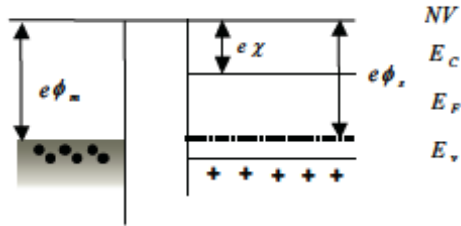


Figure2-2 : Diagramme de bande d'une structure métal/ semiconducteur N
 [H. Mathieu, 'Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques']

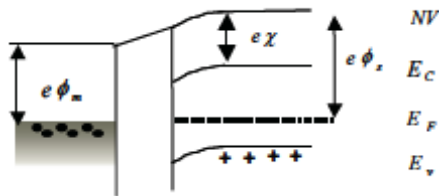
Ces différents régimes existent pour un semiconducteur de type p, les diagrammes énergétiques correspondants sont représentés sur la figure (2-3).



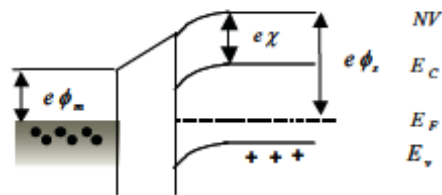
a) $\phi_m > \phi_s$



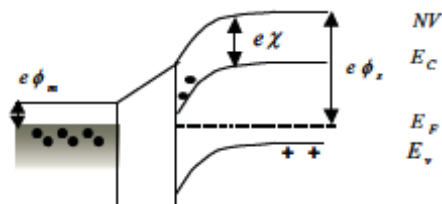
b) $\phi_m = \phi_s$



c) $\phi_m < \phi_s$



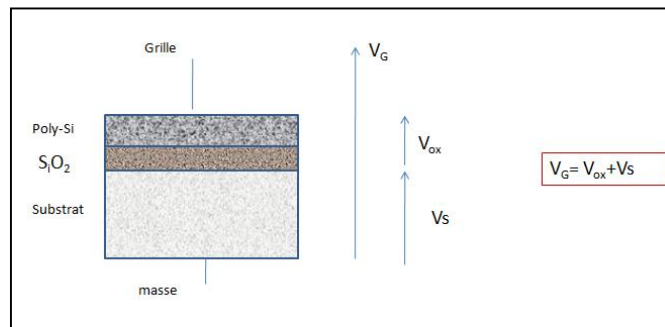
d) $\phi_m \ll \phi_s$



e) $\phi_m \ll \ll \phi_s$

Figure2-3 : Diagramme de bande d'une structure métal/ semi-conducteur N
 [H. Mathieu, 'Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques']

✚ Polarisation V_G :



Quand on applique une tension V_G sur la grille \Rightarrow 3 modes de fonctionnement sont possibles:

- l'accumulation;
- la désertion (*déplétion*);
- l'inversion.

II-2-1 Structure M.O.S. en régime d'accumulation :

On va considérer un substrat P, mais le même raisonnement peut être appliqué au cas N, il suffit de changer le signe de la polarisation à chaque fois.

❖ Cas d'un substrat P,

$V_G < 0 \Rightarrow$ régime accumulation

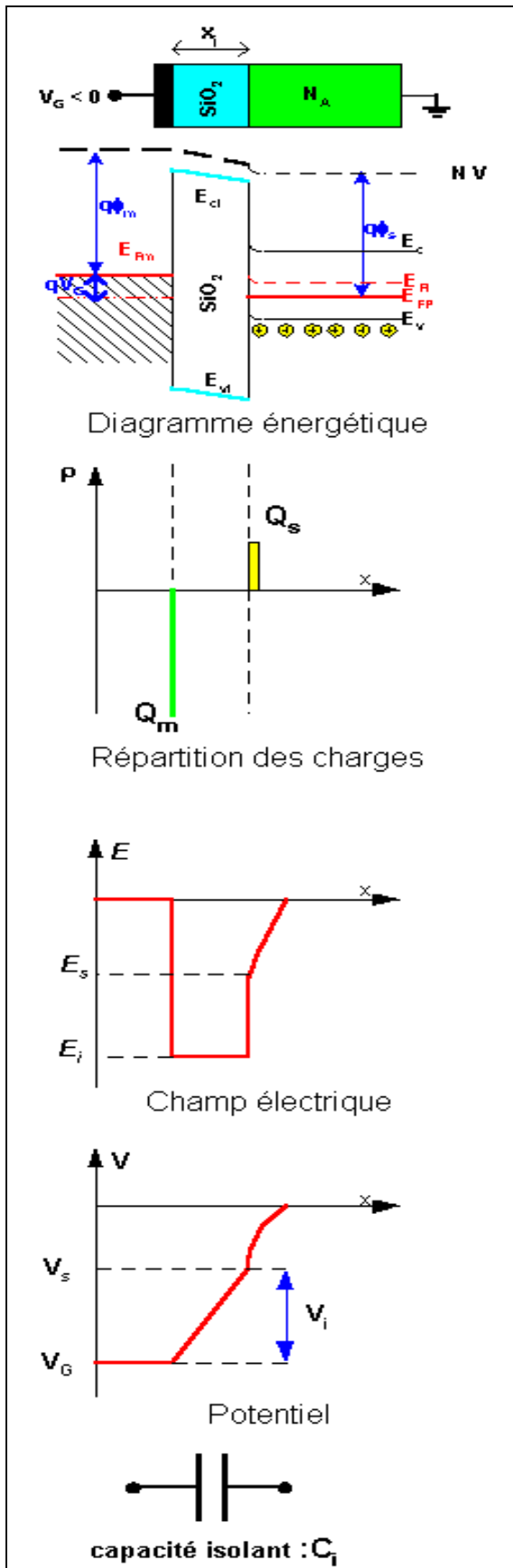


Figure 2-5 : Structure MOS en régime d'accumulation.

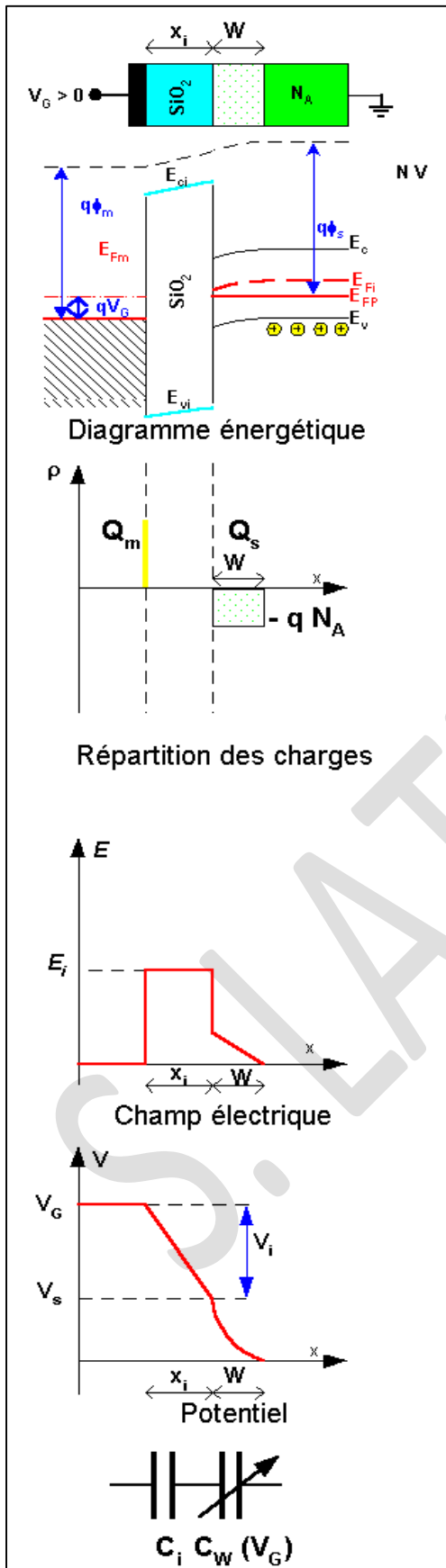
Exemple applications :

<http://jas2.eng.buffalo.edu/applets/education/mos/mosCap/biasBand10.html>

- Sur l'électrode métallique apparaît une charge négative : $Q_m < 0$.
- Par effet d'influence, les trous sont attirés vers l'interface SiO₂/Si
 → apparition de $Q_s > 0$ tq :
 - $Q_m > 0$.
- Il se forme **une accumulation** d'e⁺ (maj.) à l'interface SiO₂/Si. C'est le **régime d'accumulation**.

- **E_i** (champ électrique dans l'isolant) **est constant**.
- **Q_s** peut être considérée comme **surfactive**.
- $V_G \sim V_i = Q_m / C_i$ avec :
 $C_i = \epsilon_i / x_i$: capa./unité surface de l'isolant (pf/cm²).
- Le temps de relaxation des porteurs majoritaires étant très faible (qq. picosecondes), **la valeur de la capacité est la même en B.F. qu'en H.F.**

II-2-2Capa M.O.S. en régime de désertion: $V_G > 0$ sur l'électrode métallique



- $V_G > 0 \Rightarrow Q_m > 0$
- Par effet d'influence les trous sont repoussés de l'interface SiO2/Si, il se crée une charge négative due à la ZCE d'épaisseur W tq :

$$Q_m = -Q_s = q N_A W$$
- Il y a une **désertion** des porteurs maj. à l'interface SiO2/Si : C'est le **régime de désertion**.
- Toute variation de la charge sur l'électrode de grille sera **compensée** par une variation de l'épaisseur W de la zone désertée dans le S/C.

- Le potentiel en surface vaut alors :

$$V_s = \frac{q N_A W^2}{2 \epsilon_s}$$
 et le potentiel dans le semiconducteur:

$$V(x) = V_s \left(1 - \frac{x}{W}\right)^2$$
- La capacité de la structure en régime de désertion C_{des} est la **somme de** :
 La **capacité de l'isolant**: $C_i = \epsilon_i/x_i$
 de la **capacité de la ZCE** $C_W = \epsilon_s/W$
 placées en série.

$$1/C_{des} = 1/C_i + 1/C_W$$
- avec : $V_G = V_i + V_s$ et $V_i = Q_m/C_i = q N_A W/C_i$
 on trouve alors :

$$\frac{1}{C_{des}} = \sqrt{\frac{1}{C_i^2} + \frac{2V_G}{qN_A \epsilon_s}}$$
- On retrouve la même propriété que la capa. d'1 jonction polarisée en inverse :

$$C_{des} = K V_G^{-1/2}$$

Figure 2-6 : Structure MOS en régime de désertion.

- Le temps de relaxation des porteurs majoritaires étant très faible (qq. ps), une variation très rapide de la charge de grille sera compensée par une variation aussi rapide de l'épaisseur de la ZCE. **La valeur de la capacité est la même en B.F. (qq. Hz) qu'en H.F. (qq. MHz).**
- En **régime de désertion**, la capacité de la structure est égale à la capacité de l'isolant (constante) en série avec la capacité de la zone de désertion (qui varie en fonction de la tension appliquée sur la structure). La valeur de cette capacité est indépendante de la fréquence de mesure.

$$1/C_{\text{des}} = 1/C_i + 1/C_w$$

II-2-3-Structure M.O.S. en régime d'inversion:

- **$V_G \gg 0$**
- Les trous sont de plus en plus repoussés de l'interface SiO₂/Si pendant que les électrons sont de plus en plus attirés.
- La courbure des bandes d'énergie s'accroît, et pour une certaine tension, ϕ_{fi} passe sous le niveau de FERMİ ϕ_F .
- Le Niveau de FERMİ est plus proche de E_c que de E_v , le S/C est devenu de type "N". Les électrons minoritaires dans le semiconducteur (type "P") sont majoritaires à l'interface SiO₂/Si. Il y a eu le **phénomène d'inversion**.
- Il y a apparition d'une **couche d'inversion séparée par une zone désertée de la région neutre du semiconducteur**.
- La charge de cette couche d'inversion Q_{inv} s'ajoute à la charge de la zone désertée Q_w telle que :

$$Q_m = -(Q_w + Q_{inv})$$

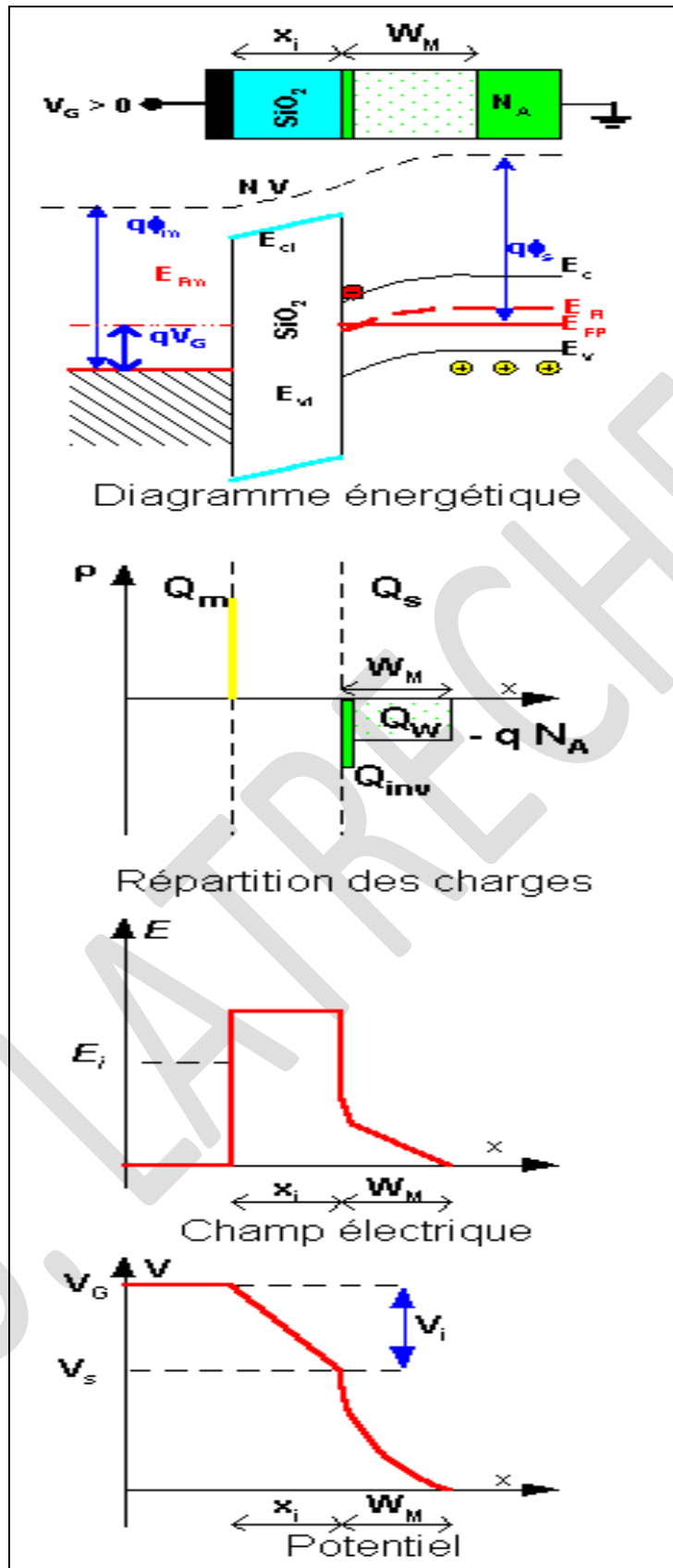


Figure 2-7 : Structure MOS en régime d'inversion.

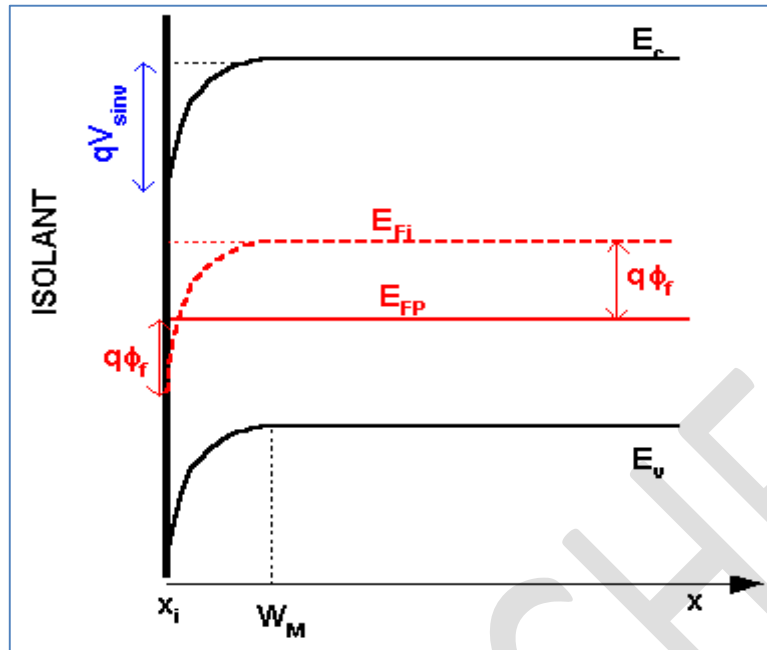


Figure 2-7 bis: Structure MOS en régime d'inversion.

- La courbure totale des bandes d'énergie est telle que :

$$q V_{sinv} = 2 q \cdot \phi_f$$

C'est le Critère pour le seuil de forte inversion.

- Le potentiel à l'interface en régime de forte inversion est donc :

$$V_{sinv} = \frac{2k_B T}{q} \text{Log} \frac{N_A}{n_i}$$

- L'épaisseur de la zone désertée est alors :

$$W_M = \sqrt{\frac{2 \epsilon_s V_{sinv}}{q N_A}}$$

- la charge totale de la structure est :

$$Q_s = Q_W + Q_{inv} = -q N_A W_M + Q_{inv}$$

- En régime d'inversion, tout accroissement de la charge sur l'électrode métallique peut être équilibrée par deux phénomènes différents :

1. l'augmentation de la charge de la couche d'inversion (Q_{inv})
2. l'augmentation de la charge d'espace due à la zone désertée (Q_W donc W).

II-2-4 Capacité équivalente de la structure MOS en régime d'inversion:

La variation de Q_{inv} est un mécanisme lent. Pour que Q_{inv} \nearrow , il faut attendre que des e- mino. soient créés par l'agitation thermique ou par photogénération et viennent se plaquer sur l'interface SiO2/Si.

✚ Cas de Basses Fréquences : régime quasi statique

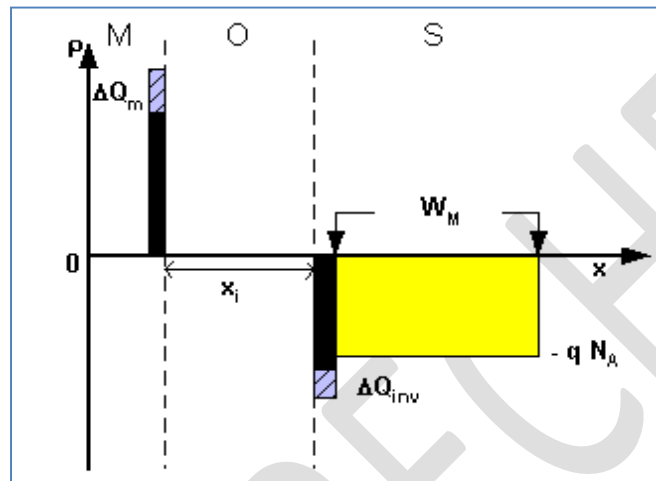


Fig 2-8 Variation des charges en régime quasi-statique

Dans le cas où la mesure de la capacité de la structure s'effectue en B.F. (régime quasi-statique qqHz), les variations de la charge d'inversion ΔQ_{inv} peuvent compenser les variations (lentes) de la charge ΔQ_m .



La capacité mesurée est alors celle de l'isolant :

$$C_{inv} (BF) = C_i = \frac{\epsilon_i}{x_i}$$

✚ Cas des hautes Fréquences.

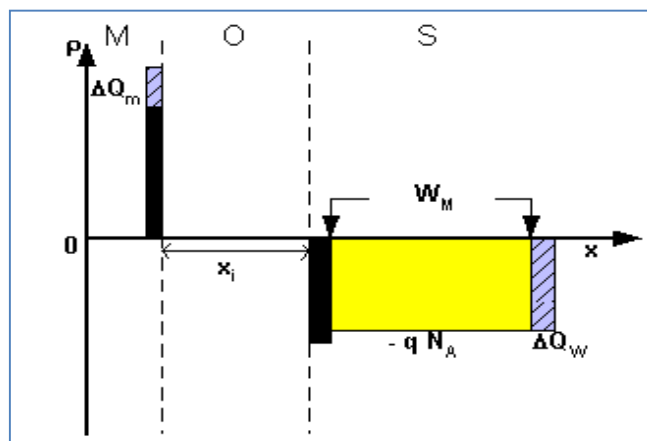


Fig 2-9 Variation des charges en H.F.

- ❖ Pour des mesures en Hautes Fréquences (qq MHz), la variation rapide de la charge ΔQ_m ne peut être compensée par une variation de Q_{inv} . c'est donc une variation de la charge de désertion ΔQ_w qui fait l'équilibre.



La capacité mesurée est alors :

$$C_{inv} (HF) = \frac{\epsilon_i}{x_i + \frac{\epsilon_i}{\epsilon_s} W_M}$$

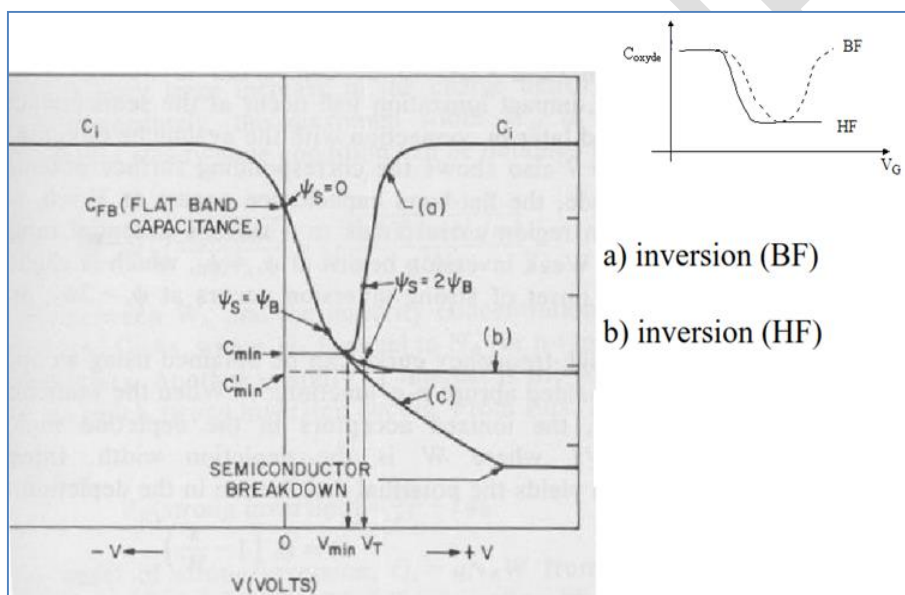


Fig 2-10 Caractérisation C(V) : Valeurs caractéristiques.
 [Sze, Physics of semiconductor devices]

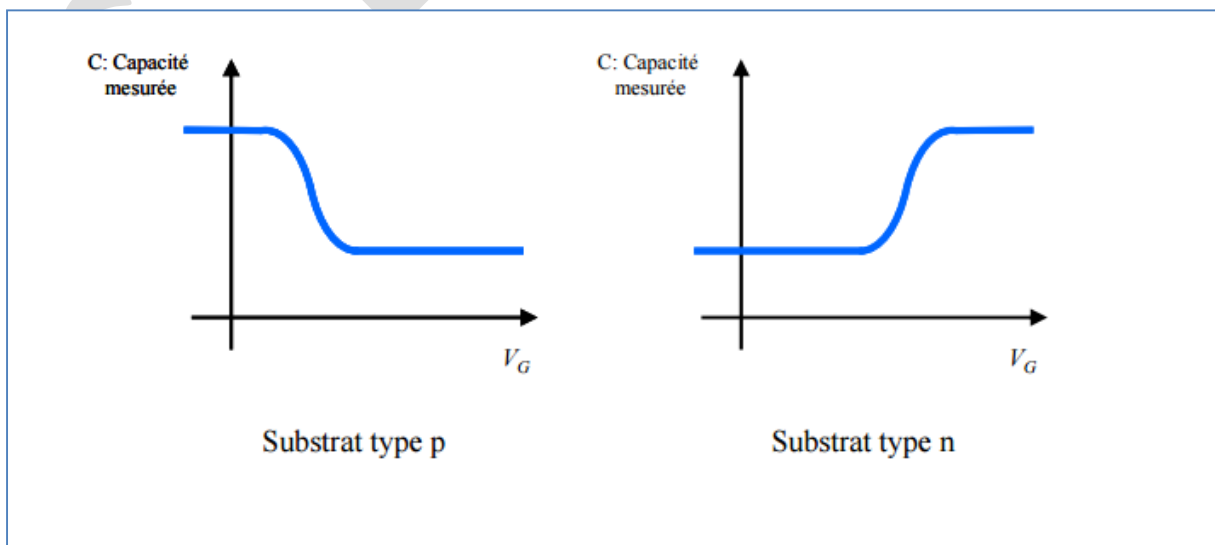
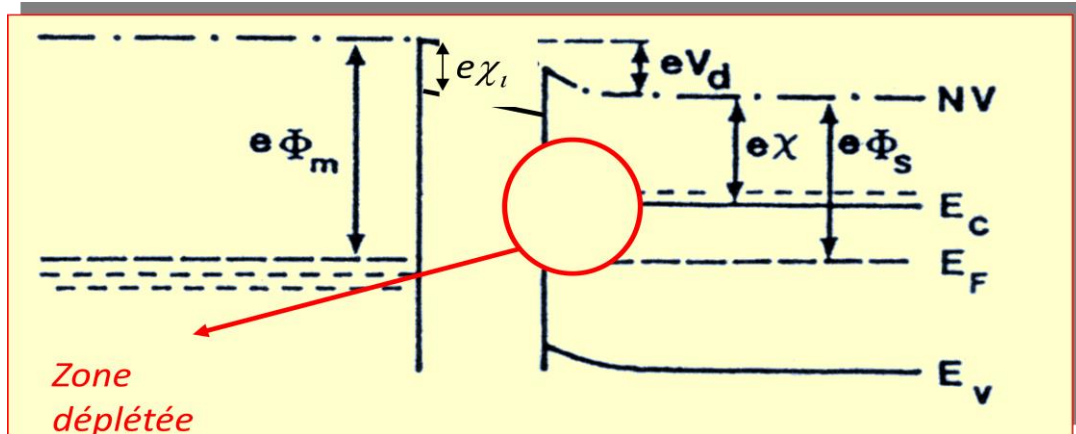


Fig 2-11 Caractérisation C(V) : type de dopage.

II-2-5 Tension de bandes plates VFB :

la tension de bandes plates représente la tension de polarisation nécessaire à l'établissement du régime de bandes plates.

En effet, même si $V_G=0$, la structure n'est pas en bandes plates.



- Dans le cas où il n'existe pas de charges Q_{ss} et Q_{ox} , VFB représente la différence de travaux de sorties entre le métal et le semi-conducteur. La tension à appliquer pour se ramener en bandes plates est :

$$V_{FB} = \Phi_M - \Phi_S = \Phi_{MS}$$

- Dans le cas où il existe des charges Q_{ss} et/ou Q_{ox} , la tension de bandes plates globale (effets de Φ_{MS} et charges dans l'oxyde) devient :

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}}$$

V_{FB} est appelée *tension de bandes plates* (Flat Band). Dans la mesure où ϕ_m est inférieur à ϕ_s et Q'_0 toujours positif, la tension de bandes plates est négative. Considérons par exemple une structure de type Al-SiO₂-Si:

Le travail de sortie de l'aluminium est $e\phi_m=4,3$ eV. Avec un dopage de $10^{15}cm^{-3}$, le travail de sortie du silicium est $e\phi_{sn}=4,6$ eV pour du type n et $e\phi_{sp}=5,2$ eV pour du type p. Avec une épaisseur d'oxyde $d=1000$ Å , la capacité de l'oxyde est $C'_{ox} \approx 35.10^{-9} Fcm^{-2}$. Enfin, si on suppose une densité de pièges d'interface Q'_0/e de l'ordre de $5.10^{10} cm^{-2}$, on obtient $V_{FB} = - 0,5$ V pour du type n et $V_{FB} = - 1,1$ V pour du type p.

II-2-6 Tension de seuil:

C'est la tension à appliquer sur la grille pour amener la structure en limite de forte inversion.

$$V_T = V_g (V_S = 2\Phi_{Fi}) = \frac{\sqrt{4\epsilon_{sc}eN_A\Phi_{Fi}}}{C_{OX}} + 2\Phi_{Fi} + V_{FB}$$

où N_A est le dopage du substrat, V_{FB} est la tension de bandes plates et Φ_F le potentiel de volume du substrat donné par :

$$\Phi_F = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

$$e\phi_{Fi} = |E_F - E_{Fi}| > 0$$

✚ En supposant C_{ox} **grand (oxyde mince) et dopage faible**, l'expression de la tension de

seuil peut se réduire à $V_T \approx 2\phi_{Fi} + V_{FB}$ ou encore $V_{gs} - V_{FB} \approx 2\phi_{Fi}$

✚ En considérant une **tension V_{sb}** , la tension de seuil devient :

$$V_T = V_{T0} + \gamma \left(\sqrt{|2\Phi_{Fi} + V_{sb}|} - \sqrt{|2\Phi_{Fi}|} \right) \text{ avec}$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{2eN_A\epsilon_{sc}}}{C_{ox}}$$

Cette polarisation V_{sb} entraîne donc un décalage de V_T