

Résumé de cours M1 Microélectronique
Module : Physique des composants semi-conducteurs 2
Structure MIS

Prof. Abdelhamid BENHAYA

Directeur du Laboratoire d'Electronique Avancée
Responsable Salle Blanche

Département d'Electronique
Faculté de Technologie
Université Batna 2

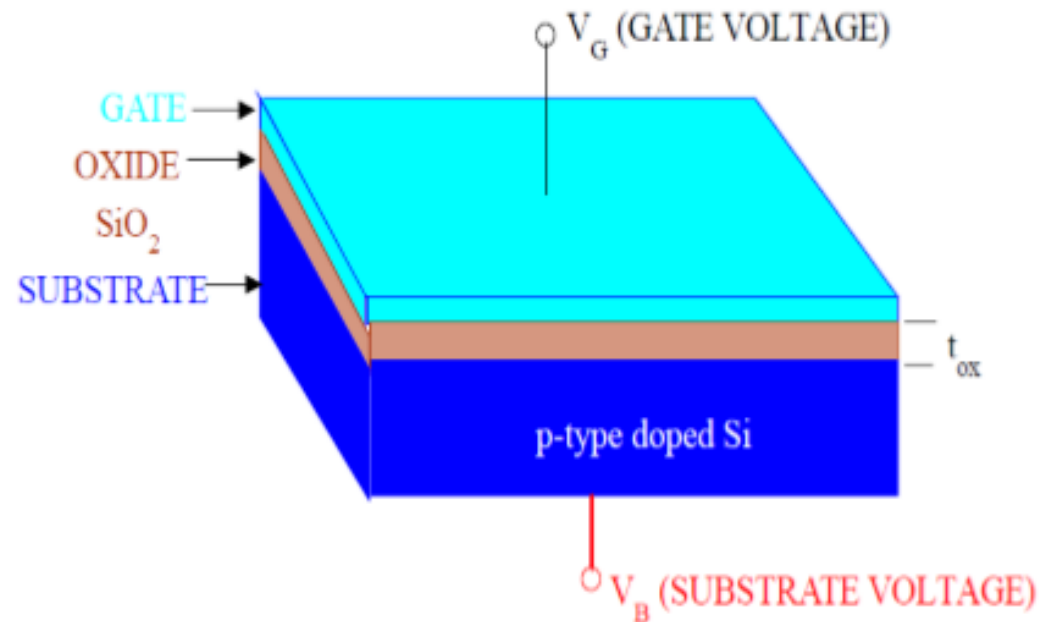
Domaines d'intérêt:

Technologie des semi-conducteurs
(Matériaux et dispositifs photovoltaïques)

e-mail: a.benhaya@univ-batna2.dz
benhaya_abdelhamid@yahoo.fr

Tel: +213 (0)7 73 87 37 84

Structure MIS



BIBLIOGRAPHIE

Langue Anglaise

1. Marius Grundmann, The Physics of Semiconductors, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
2. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, JOHN WILEY & SONS, 2007.
3. <http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/contents.htm>

Langue Française

1. A. Vapaille et R. Castagné, Dispositifs et circuits semi-conducteurs, Physique et technologie, dunod, 1987.
2. CHRISTIAN ET HELENE NGÖ, Introduction à la physique des semi-conducteurs, Dunod, 1998.
3. H. MATHIEU, physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Dunod, 2001.
4. <https://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/>
5. [http ://koeniguer.perso.cegetel.net/ips/ips.html](http://koeniguer.perso.cegetel.net/ips/ips.html)

<https://youtu.be/kJ9eOhbzY8g>

Structure MIS

Plan

Réalisation de la structure

Structure MIS idéale

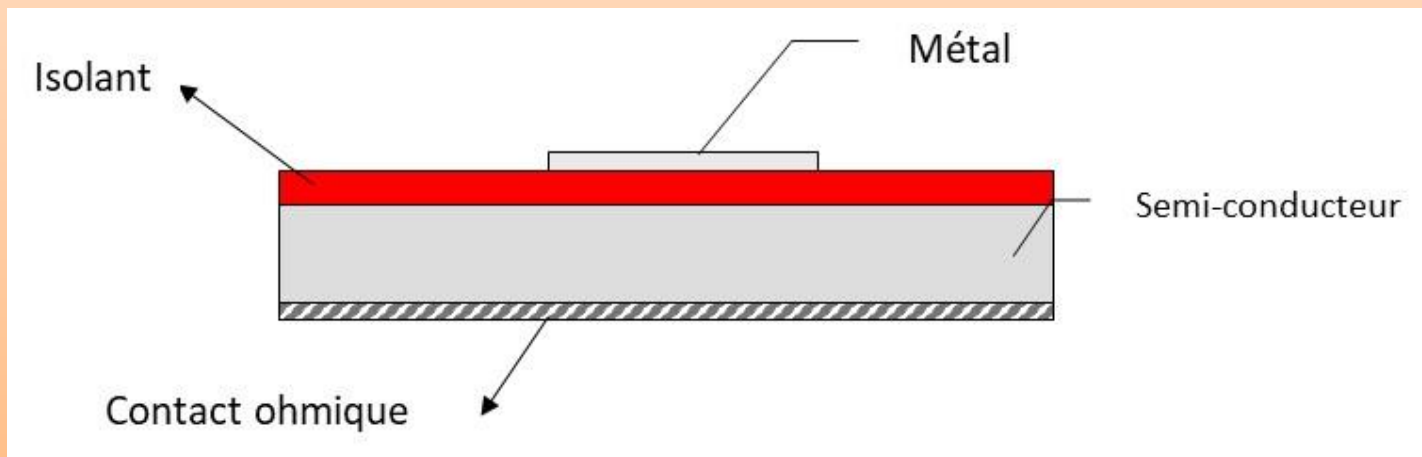
Structure MIS Réelle

1^{ère} Partie

Réalisation de la structure

Structure MIS

- Une structure MIS est un empilement de trois couches : métal, isolant et semi-conducteur.
- Dans le cas où l'isolant est l'oxyde de silicium, la structure est appelée structure MOS.



Structure MIS

Réalisation d'une structure MIS

Une **structure MIS** peut être réalisée selon les étapes suivantes :

- ✚ Croissance ou **déposition** d'une **mince couche diélectrique** (400-1000Å°) à la surface d'un substrat semi-conducteur par l'une des techniques suivantes :
 - **Pulvérisation** cathodique (**Sputtering**);
 - **Oxydation thermique**;
 - **Dépôt** par **CVD**.
- ✚ **Dépôt** d'une **électrode métallique**, dite **grille**, à la surface du diélectrique par :
 - **Evaporation thermique** ou **par faisceau d'électrons** (e-beam);
 - **Pulvérisation cathodique** (**Sputtering**).
- ✚ Elaboration sur **la face arrière du substrat** semi-conducteur d'un **contact ohmique** permettant de **polariser** le **semi-conducteur** par rapport à **la grille**.

2^{ème} Partie

Structure MIS Idéale

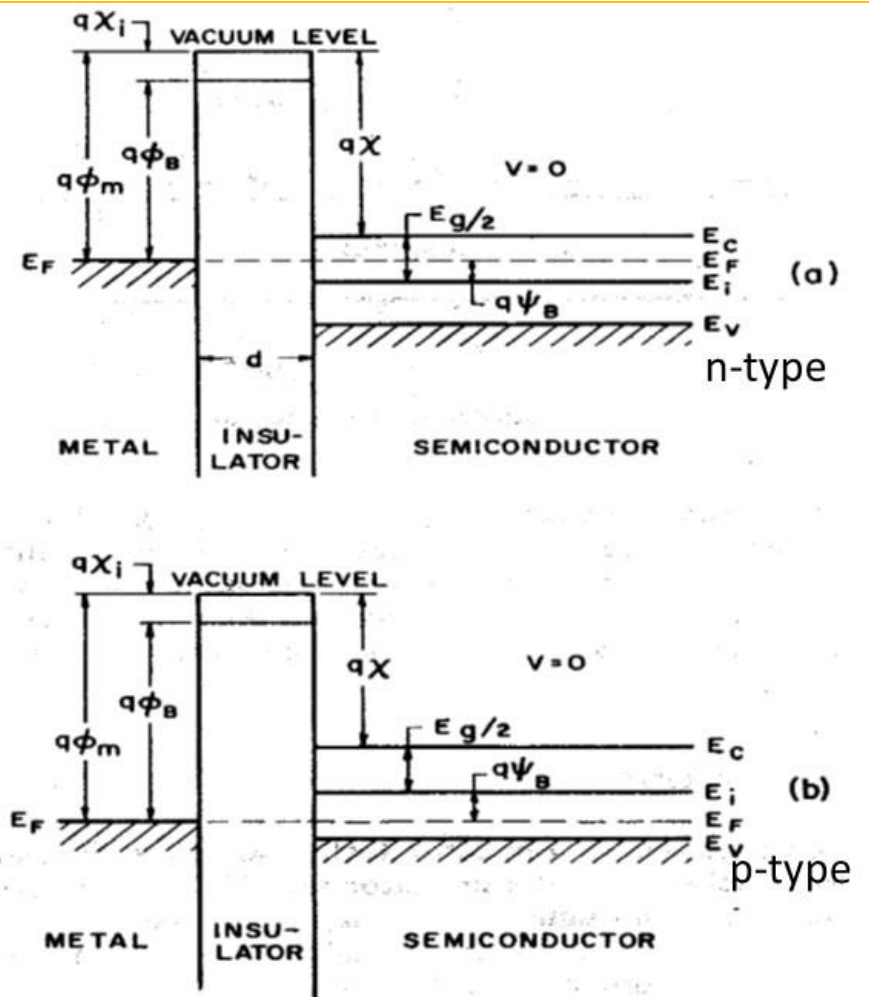
N.B.: Dans cette étude, l'oxyde de silicium (SiO_2) est considéré implicitement comme isolant

Cas de la structure MIS idéale

Structure MIS Idéale

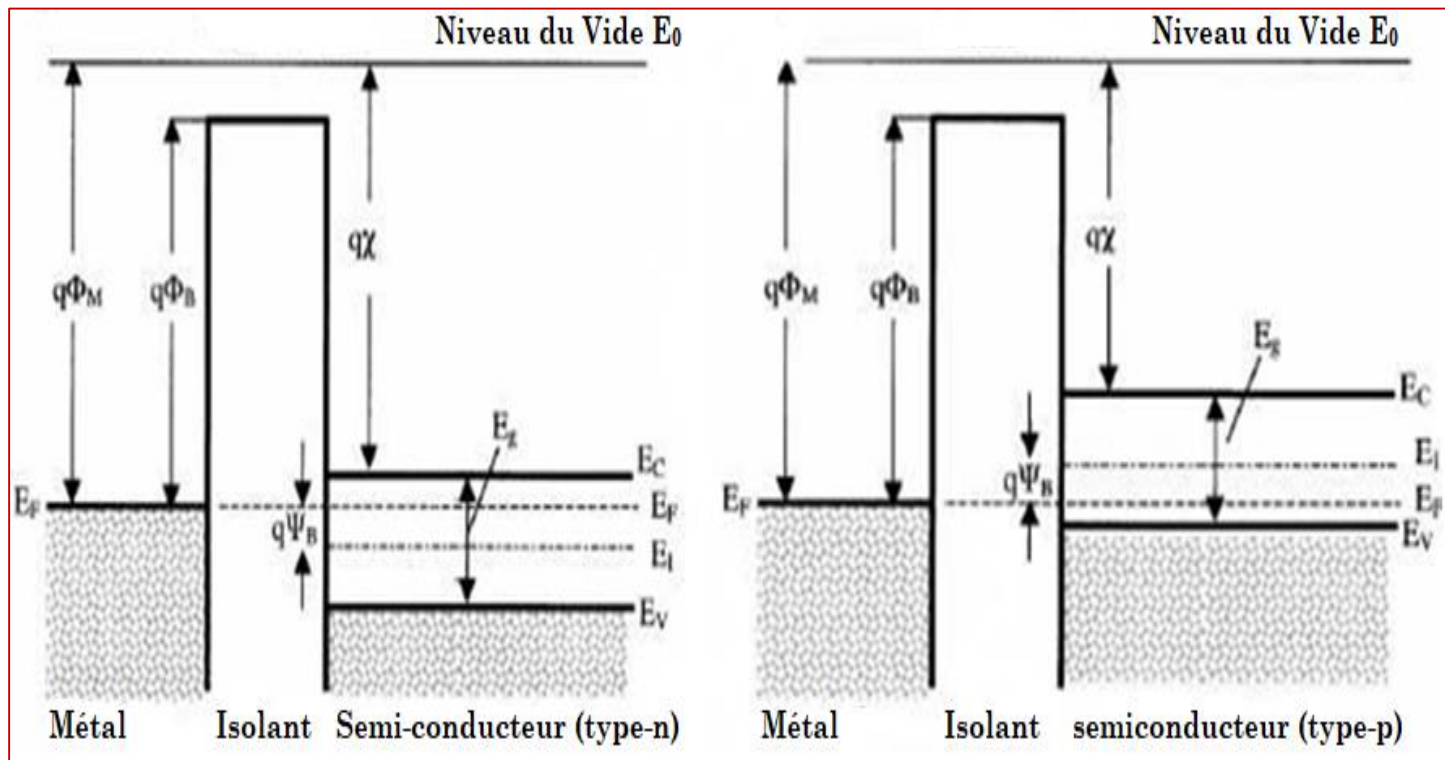
Une structure MIS idéale doit répondre aux conditions suivantes :

- Les bandes du semi-conducteur sont plates en l'absence d'une polarisation électrique ;
- L'oxyde est dépourvu de charges électriques ;
- Absence d'états électronique (états d'interface) à l'interface, oxyde semi-conducteur.



Cas de la structure MIS idéale

Diagramme de bandes d'une structure MIS idéale non polarisée

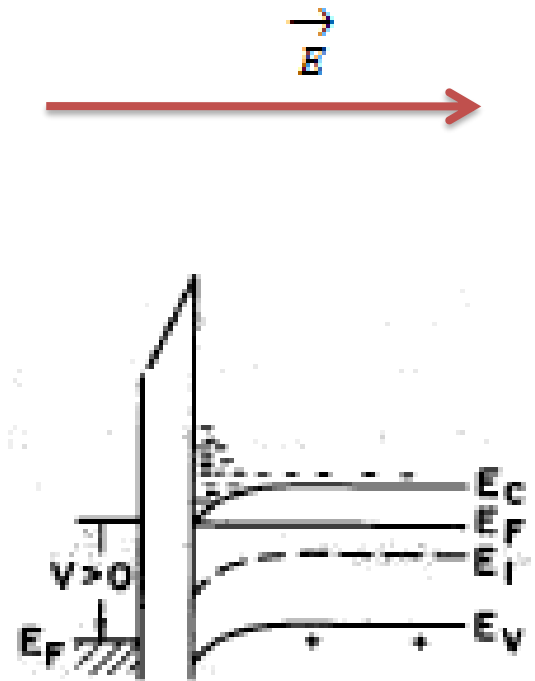


Cas de la structure MIS idéale

Régime d'accumulation

Si la grille est polarisée positivement par rapport au semi-conducteur de type n, les électrons libres du semi-conducteur s'accumulent à l'interface isolant semi-conducteur, ainsi, une zone de charge d'espace négative apparaît au voisinage de cette interface.

$$Q_{sc} + Q_m = 0$$

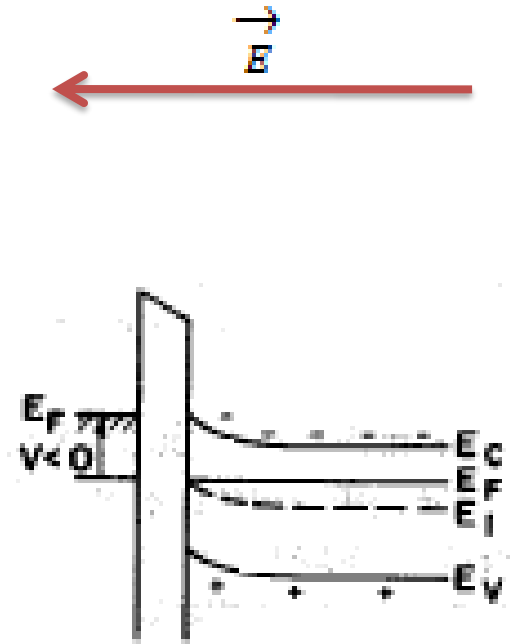


Semi-conducteur type n

Cas de la structure MIS idéale

Régime de dépeuplement (désertion)

Si la grille est polarisée négativement par rapport au semi-conducteur de type n, les électrons libres du semi-conducteur sont chassés de l'interface, ce qui conduit à **une zone déserte** chargée **positivement** qui équilibre la charge négative de l'interface métal isolant



Semi-conducteur type n

Cas de la structure MIS idéale

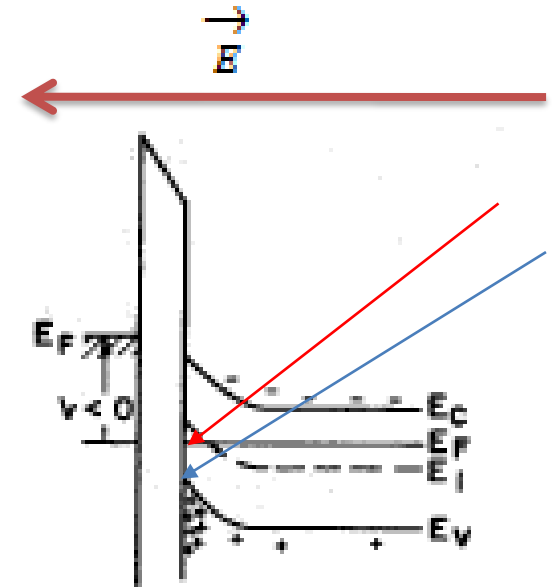
Régime d'inversion :

Si on augmente la polarisation négative de la grille, la courbure des bandes du semi-conducteur croît davantage.

Il arrive, pour une certaine polarisation, d'avoir, à l'interface, le niveau E_v plus proche de E_F que le niveau E_c n'est proche de E_F dans le volume du semi-conducteur.

Dans cette situation, la concentration des trous minoritaires à l'interface isolant semi-conducteur devient supérieure à la concentration des électrons.

Il y a donc apparition d'une couche d'inversion séparée par une zone déserte des régions neutres du semi-conducteur ; c'est le régime d'inversion



Semi-conducteur type n

N. B.: Le seuil de forte inversion se produit quand:

$$n_s = p_0 = N_A$$

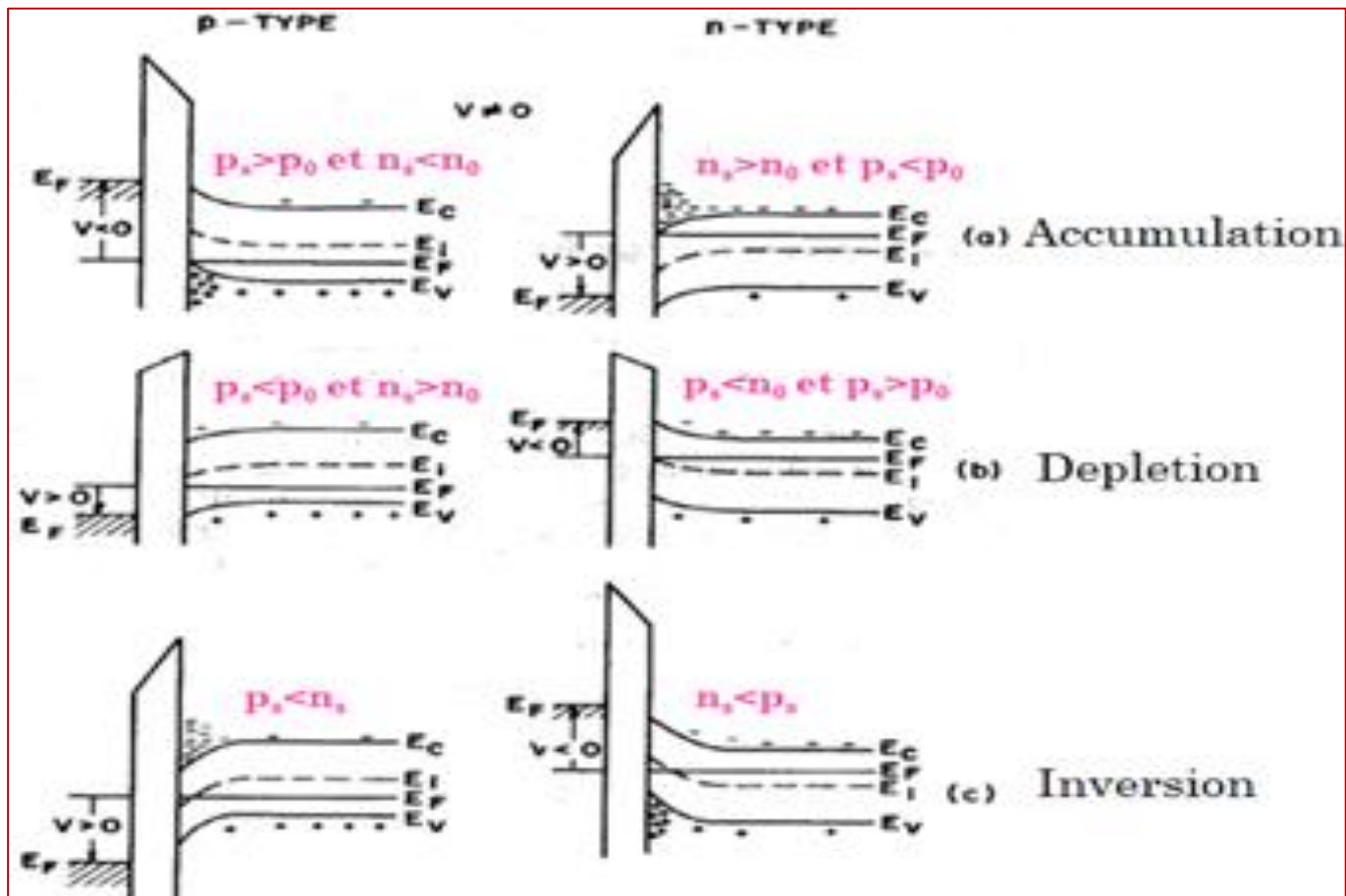
pour type p

$$P_s = n_0 = N_D$$

pour type n

Cas de la structure MIS idéale

Résumé des différents régimes de polarisation



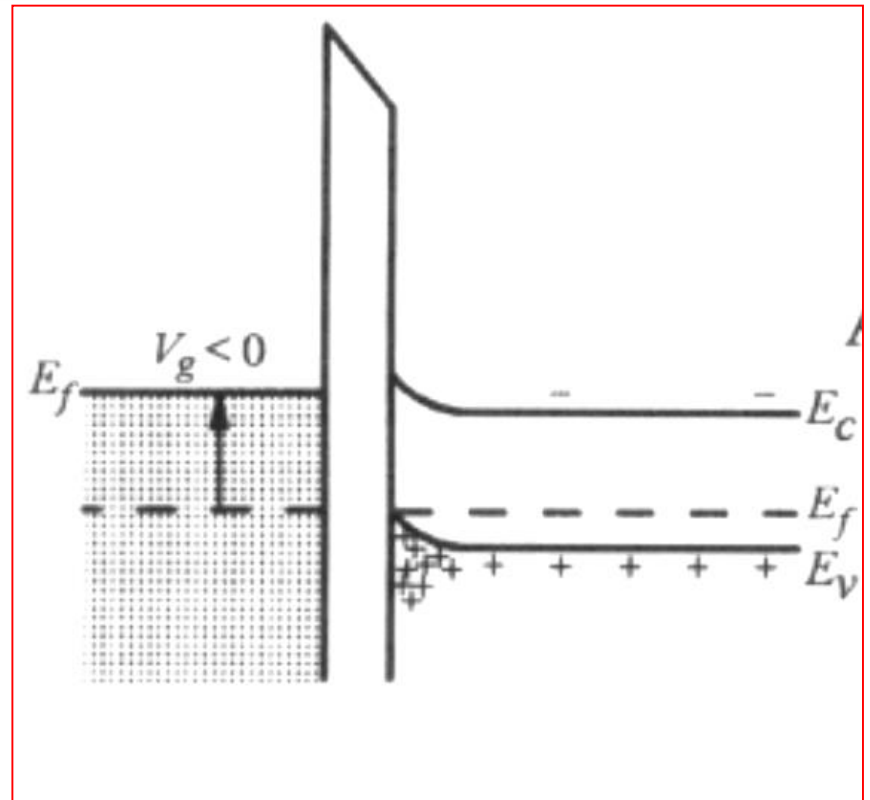
Cas de la structure MIS idéale

Caractéristique C(V) Régime d'accumulation

En régime d'accumulation,
la capacité est réduite à
celle de l'isolant:

$$C_I = \frac{\epsilon_0 \epsilon_I}{d} \text{ en F/cm}^2$$

Semi-conducteur type p



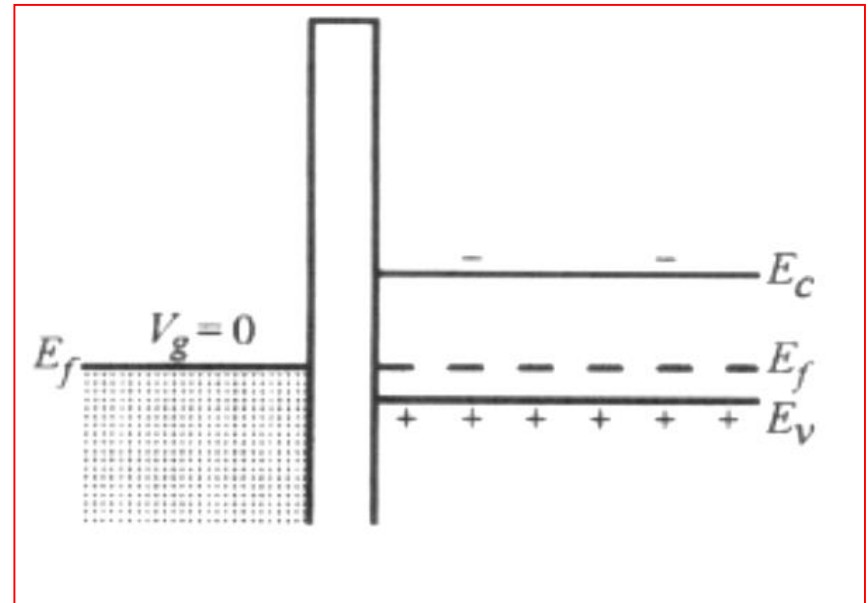
Cas de la structure MIS idéale

Caractéristique C(V)/ Régime de bandes plates

En régime de bandes plates, la capacité est donnée par l'expression:

$$C_{FB} = \frac{\sqrt{2}\epsilon_{SC}\epsilon_0}{L_D} = \frac{\epsilon_I\epsilon_0}{d + \frac{\epsilon_I}{\sqrt{2}\epsilon_{SC}}L_D}$$

$$L_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_{SC}\epsilon_0}{q p_0} \left(\frac{kT}{q} \right)}$$



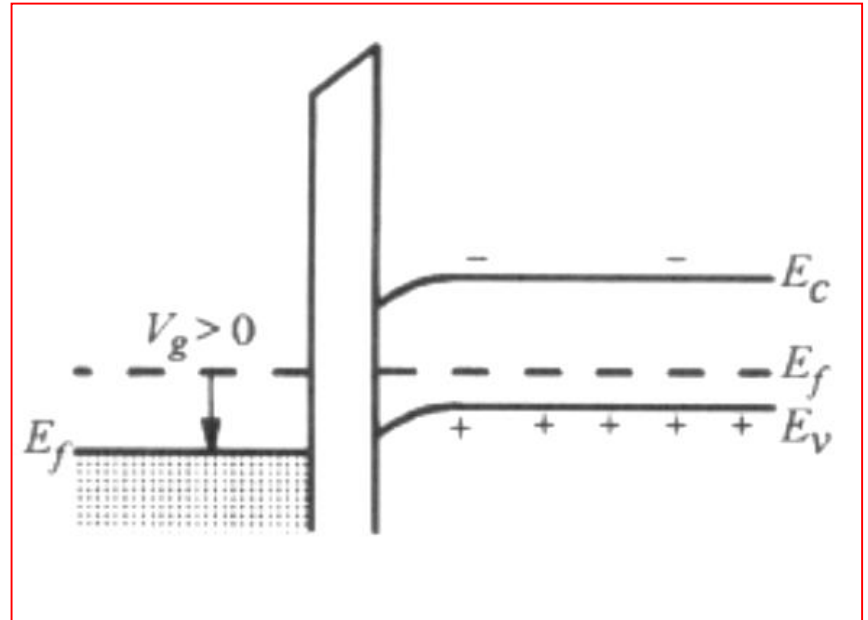
Semi-conducteur type p

Cas de la structure MIS idéale

Caractéristique C(V)/ Régime de déplétion

En régime de déplétion, la capacité est donnée par l'expression:

$$\frac{1}{C_{des}} = \sqrt{\frac{1}{C_I^2} + \frac{2 V_G}{q N_A \epsilon_{SC} \epsilon_0}}$$



Semi-conducteur type p

Cas de la structure MIS idéale

Caractéristique $C(V)$ /Régime d'inversion

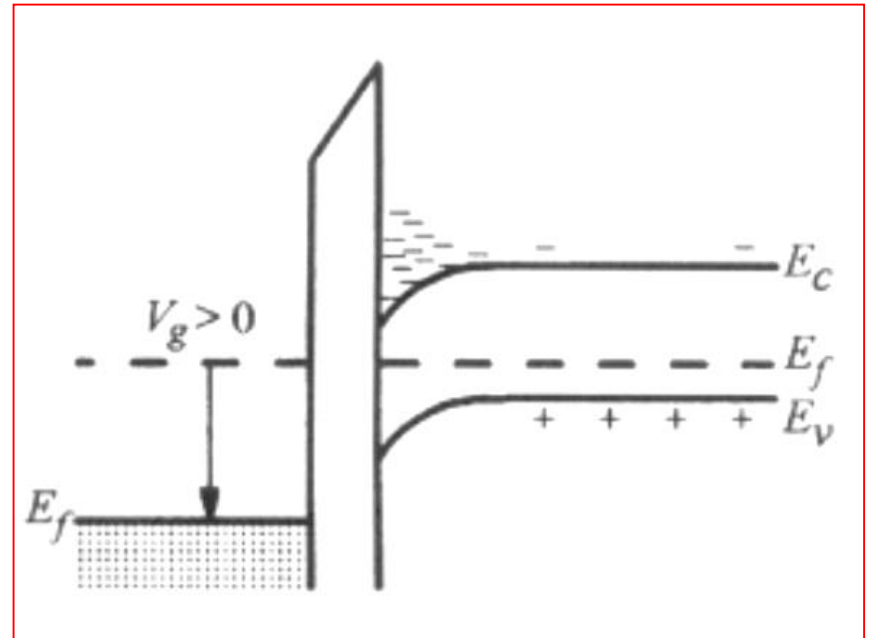
En régime d'inversion, la capacité est donnée par l'expression:

- B. F.:

$$C_I = \frac{\epsilon_I \epsilon_0}{d}$$

- H.F.

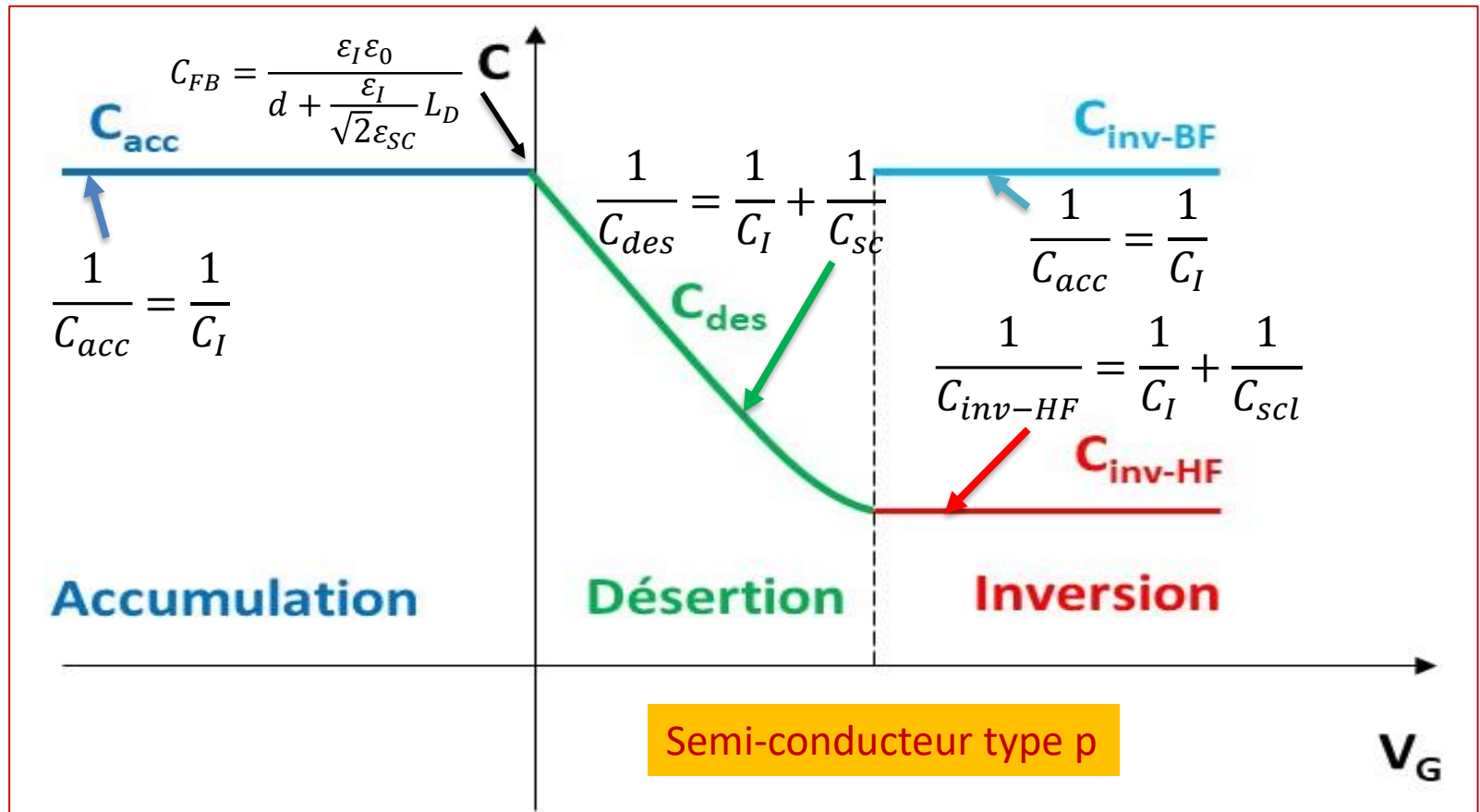
$$\frac{1}{C_{min}} = \frac{1}{C_I} + \sqrt{\frac{4kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)}{\epsilon_{SC} e^2 N_A}}$$



Semi-conducteur type p

Cas de la structure MIS idéale

Description de la caractéristique $C(V_g)$



Cas de la structure MIS idéale

Relation champ électrique-potentiel de surface

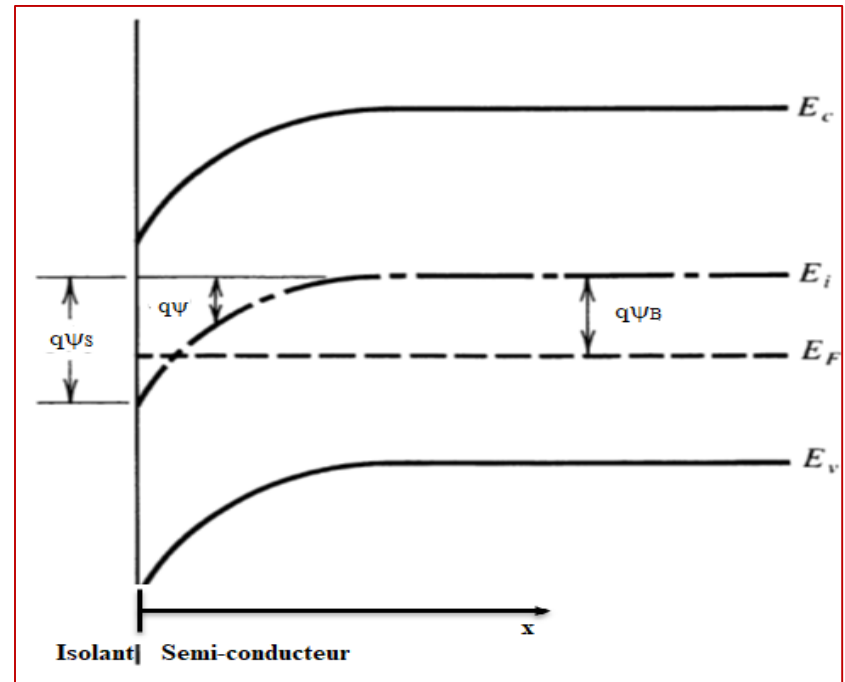
Champ électrique

$$\xi_s = \mp \frac{2kT}{qL_D} \sqrt{\left[e^{-\left(\frac{q\psi}{kT}\right)} + \beta\psi - 1 \right] + \frac{n_0}{p_0} \left[e^{\left(\frac{q\psi}{kT}\right)} - \beta\psi - 1 \right]}$$

Longueur de Deby:

$$L_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{SC}\varepsilon_0}{q p_0} \left(\frac{kT}{q} \right)}$$

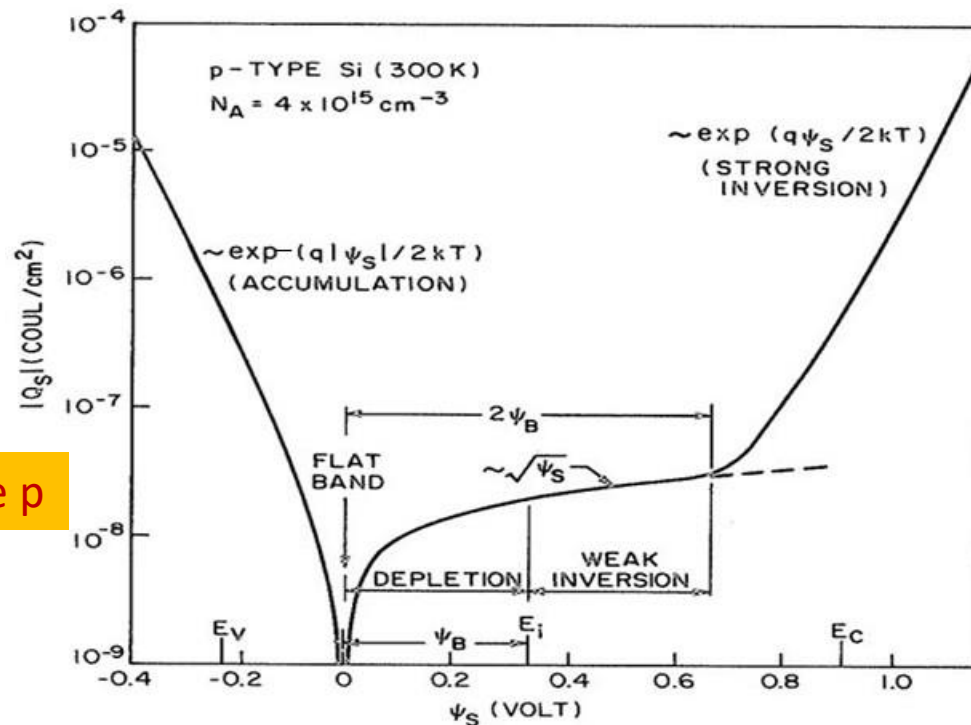
Semi-conducteur type p



Cas de la structure MIS idéale

Relation densité de charge-potentiel de surface

$$Q_{sc} = \varepsilon_{sc} \varepsilon_0 \xi_s = \mp \frac{2\varepsilon_{sc} \varepsilon_0 kT}{qL_D} \sqrt{\left[e^{-\left(\frac{q\psi}{kT}\right)} + \beta\psi - 1 \right] + \frac{n_0}{p_0} \left[e^{\left(\frac{q\psi}{kT}\right)} - \beta\psi - 1 \right]}$$



Semi-conducteur type p

Cas de la structure MIS idéale

Expressions des différentes capacités

Capacité de l'isolant: $C_I = \frac{\epsilon_I \epsilon_0}{d}$

Semi-conducteur type p

Capacité du semi-conducteur BF

$$C_{SC} = \frac{dQ_{SC}}{d\psi_s} = \frac{\epsilon_{SC} \epsilon_0}{L_D} \cdot \frac{\left[\left(1 - e^{-\left(\frac{q\psi_s}{kT} \right)} \right) + \frac{n_0}{p_0} \left(e^{\left(\frac{q\psi_s}{kT} \right)} - 1 \right) \right]}{\sqrt{\left[e^{-\left(\frac{q\psi}{kT} \right)} + \beta\psi - 1 \right] + \frac{n_0}{p_0} \left[e^{\left(\frac{q\psi}{kT} \right)} - \beta\psi - 1 \right]}}$$

Capacité du semi-conducteur HF

$$C_{SC-HF} = \frac{\epsilon_{SC} \epsilon_0}{\int_0^{\psi_s} \frac{qp_0 \left(e^{-\frac{q\psi}{kT}} - 1 \right)}{\frac{2kT}{qL_D} \sqrt{\left[e^{-\left(\frac{q\psi}{kT} \right)} + \beta\psi - 1 \right] + \frac{n_0}{p_0} \left[e^{\left(\frac{q\psi}{kT} \right)} - \beta\psi - 1 \right]}} d\psi}$$

Cas de la structure MIS idéale

Expressions particulières de la capacité

Capacité des Bandes Plates (Flat Bands)

$$C_{FB} = \frac{\sqrt{2}\epsilon_{SC}\epsilon_0}{L_D} = \frac{\epsilon_I\epsilon_0}{d + \frac{\epsilon_I}{\sqrt{2}\epsilon_{SC}}L_D}$$

Capacité de désertion

$$\frac{1}{C_{des}} = \sqrt{\frac{1}{C_I^2} + \frac{2 V_G}{q N_A \epsilon_{SC} \epsilon_0}}$$

Semi-conducteur type p

Cas de la structure MIS idéale

Représentation graphique de la capacité $C_{BF}(V_G)$

1. Choisir un ensemble de valeurs discrètes adéquates pour le potentiel de surface ψ_s ;
2. Pour chaque valeur de ψ_s , calculer Q_{SC}
3. Calculer V_I au moyen de :

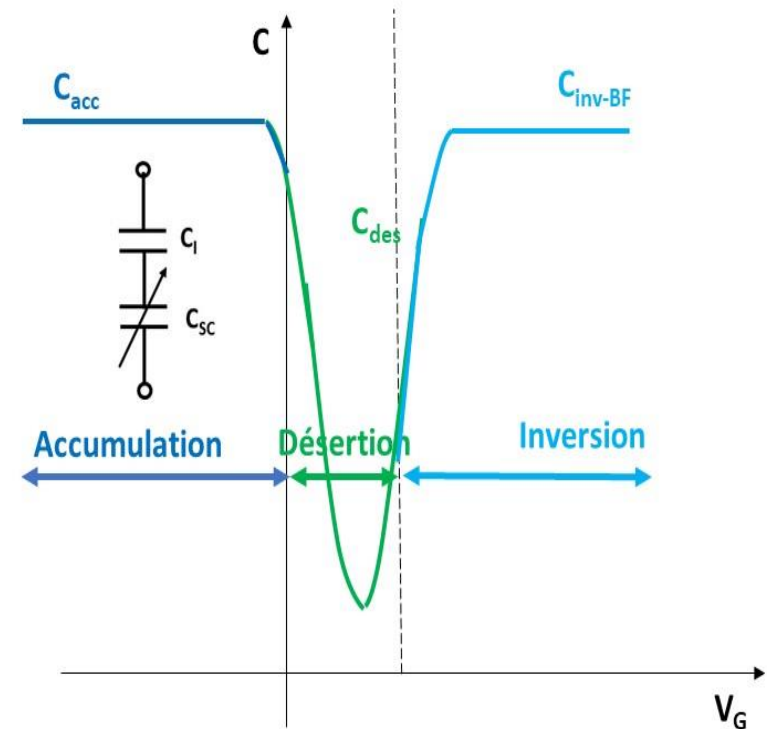
$$V_I = \frac{Q_M}{C_I} = -\frac{Q_{SC}}{C_I}$$

4. Dédire l'ensemble des valeurs de $V_G(\psi_s)$ grâce à l'expression :

$$V_G = V_I + \psi_s$$

5. Calculer, pour les mêmes valeurs de ψ_s , $C_{SC}(\psi_s)$ et $C(\psi_s)$;

6. A partir des valeurs discrètes $C(V_G)$, on peut tracer la caractéristique $C_{BF}(V_G)$.



3^{ème} Partie

Structure MIS Réelle

Cas de la structure MIS réelle

Structure MIS réelle

Dans ce cas, on va s'affranchir des hypothèses simplificatrices admises pour la structure MOS idéale, c.a.d.:

- ❑ Les travaux de sortie du métal et du semi-conducteur ne sont pas égaux ($\phi_m \neq \phi_{sc}$);
- ❑ Il y a des états à l'interface isolant - semi-conducteur ($N_{ss} \neq 0$);
- ❑ Il y a des charges électriques dans l'isolant ($Q_{ox} \neq 0$).

Cas de la structure MIS réelle

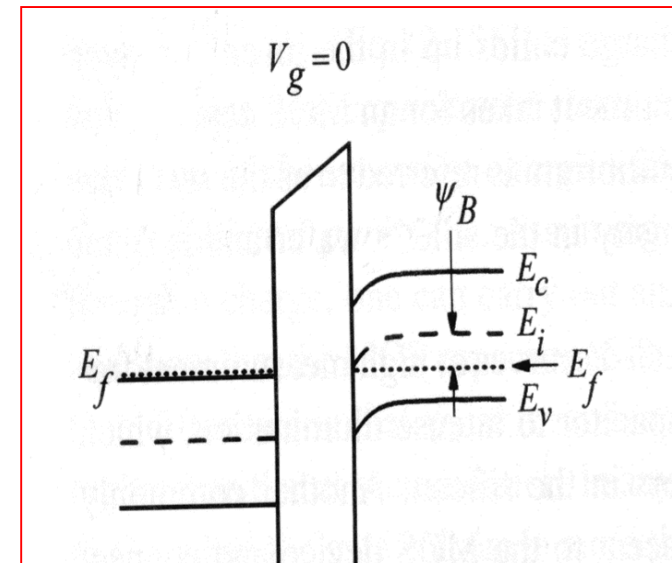
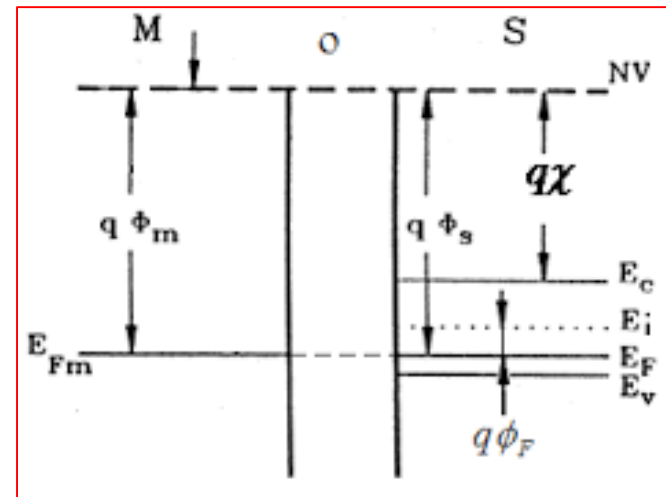
Effet des travaux de sortie

A cause de la différence entre les travaux de sortie, les bandes ne sont pas plates même en l'absence d'une polarisation externe.

Pour retrouver la situation des bandes plates, il faut appliquer une tension V_{FB} (positive ou négative selon la situation) donnée par l'expression:

$$V_{FB1} = \frac{\phi_m - \chi - (E_c - E_{Fsc})}{q}$$

N.B.: La caractéristique $C(V)$ subit une translation selon l'axe des tensions.



Cas de la structure MIS réelle

Effet des charges de l'oxyde

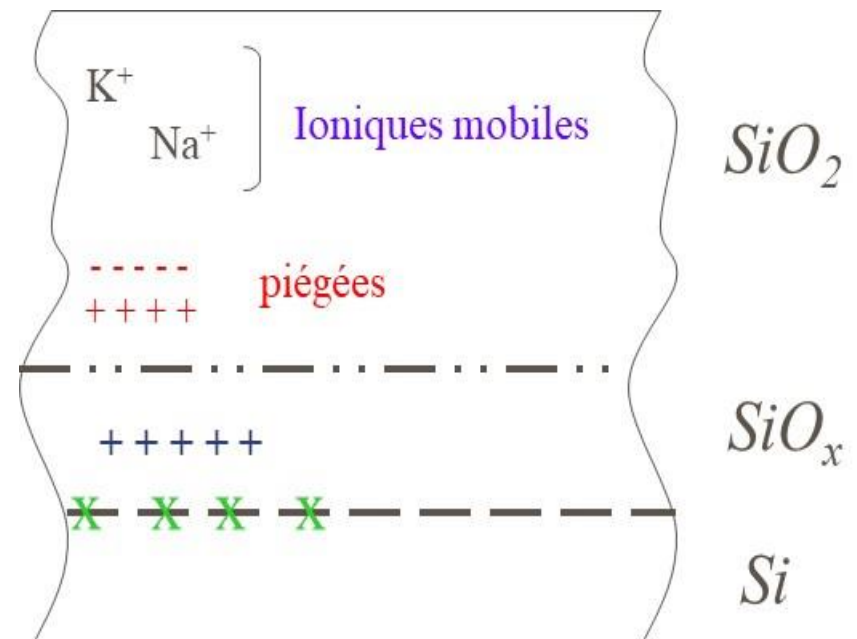
1) Nature des charges

- Charges **ioniques mobiles**;
- Charges **piégées dans l'oxyde**;
- Charges **fixes dans l'oxyde**;
- Charges **piégées à l'interface Si-SiO₂**.

2) Influence des charges

En fonction de **leur position** dans l'oxyde, ces charges auront **une influence plus ou moins grande** sur la population électronique sous la grille.

L'influence **est maximale** lorsque les charges **sont proches de l'interface** Oxyde – Semi-conducteur.



Cas de la structure MIS réelle

Effet des charges de l'oxyde (suite)

1) Charge équivalente

Pour simplifier, on introduit **une charge équivalente** d'oxyde par **unité de surface** définie par:

$$\Delta V_g(V_S) = - \frac{Q_{ox}(V_S)}{C_{ox}} = V_{FB2}$$

2) Effet sur la caractéristique C(V)

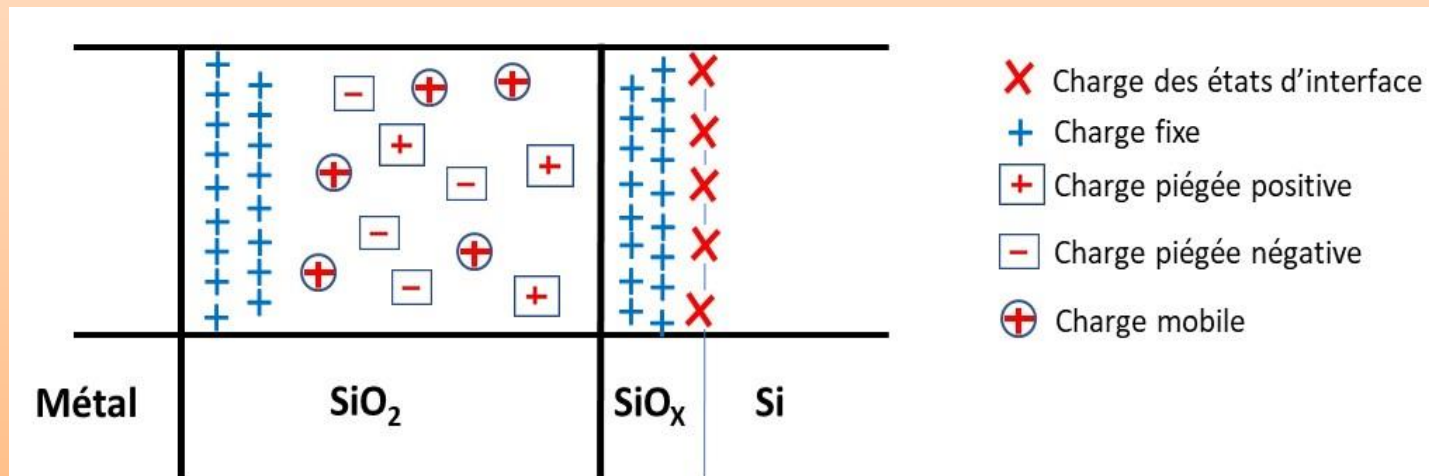
N.B.: La caractéristique C(V) subit une translation selon l'axe des tension d'une quantité V_{FB2} .

Cas de la structure MIS réelle

Influence des états d'interface

Origine des états d'interface

Les états d'interface ont pour origine **les liaisons pendantes** et les **impuretés restantes** à la surface du semi-conducteur.

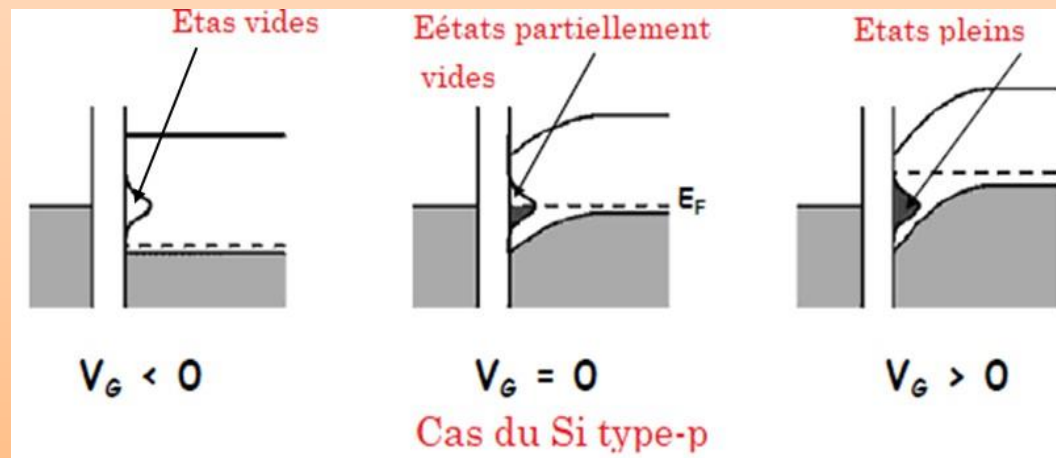


Cas de la structure MIS réelle

Règle d'occupation des états d'interface

La population de ces états obéit aux règles suivantes :

- Tous les états situés au-dessus du niveau de Fermi sont vides.
- Tous les états situés au-dessous du niveau de Fermi sont pleins.



Cas de la structure MIS réelle

Bilan des charges et répartition de la tension

- Si Q_{ss} est la charge piégée dans les états d'interface, alors cette charge va contribuer avec la charge Q_{sc} dans le semi-conducteur pour équilibrer la charge Q_m sur la grille métallique, ce qui donne :

$$Q_m = Q_{sc} + Q_{ss}$$

- Dans ce cas, l'expression du potentiel devient :

$$V_G = \frac{Q_{sc} + Q_{ss}}{C_I} + \psi_s$$

Cas de la structure MIS réelle

Capacité de la structure

La capacité de la structure MIS, en présence des états d'interface, a donc comme expression :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_I} + \frac{1}{C_{SC} + C_{SS}}$$

avec:

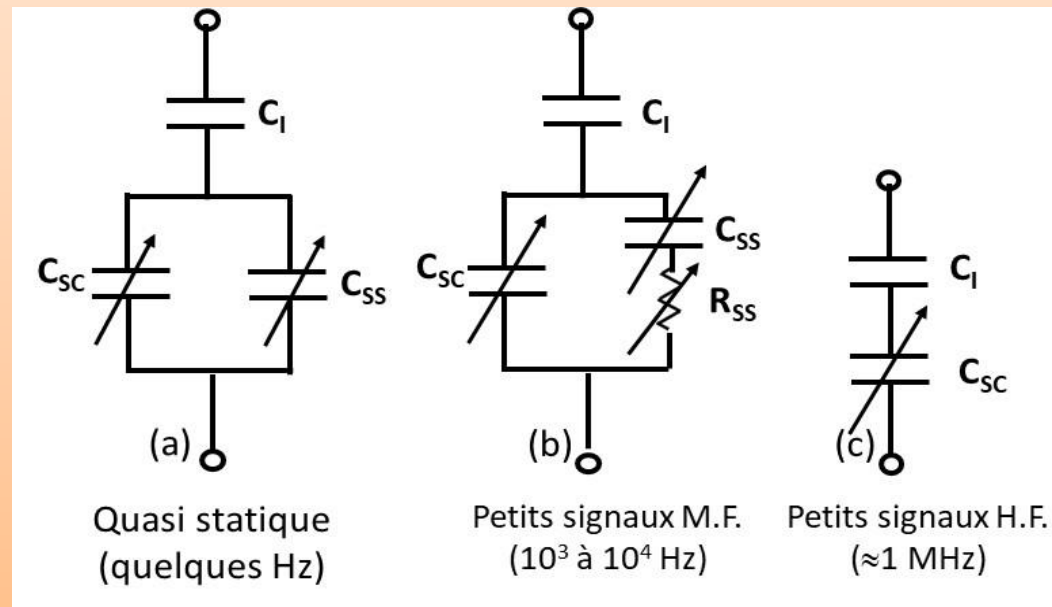
$$C_{SS} = \frac{dQ_{SS}}{d\psi_s} = qN_{SS}$$

Où N_{SS} est la densité d'états d'interface ($\text{cm}^{-2}.\text{eV}^{-1}$).

Cas de la structure MIS réelle

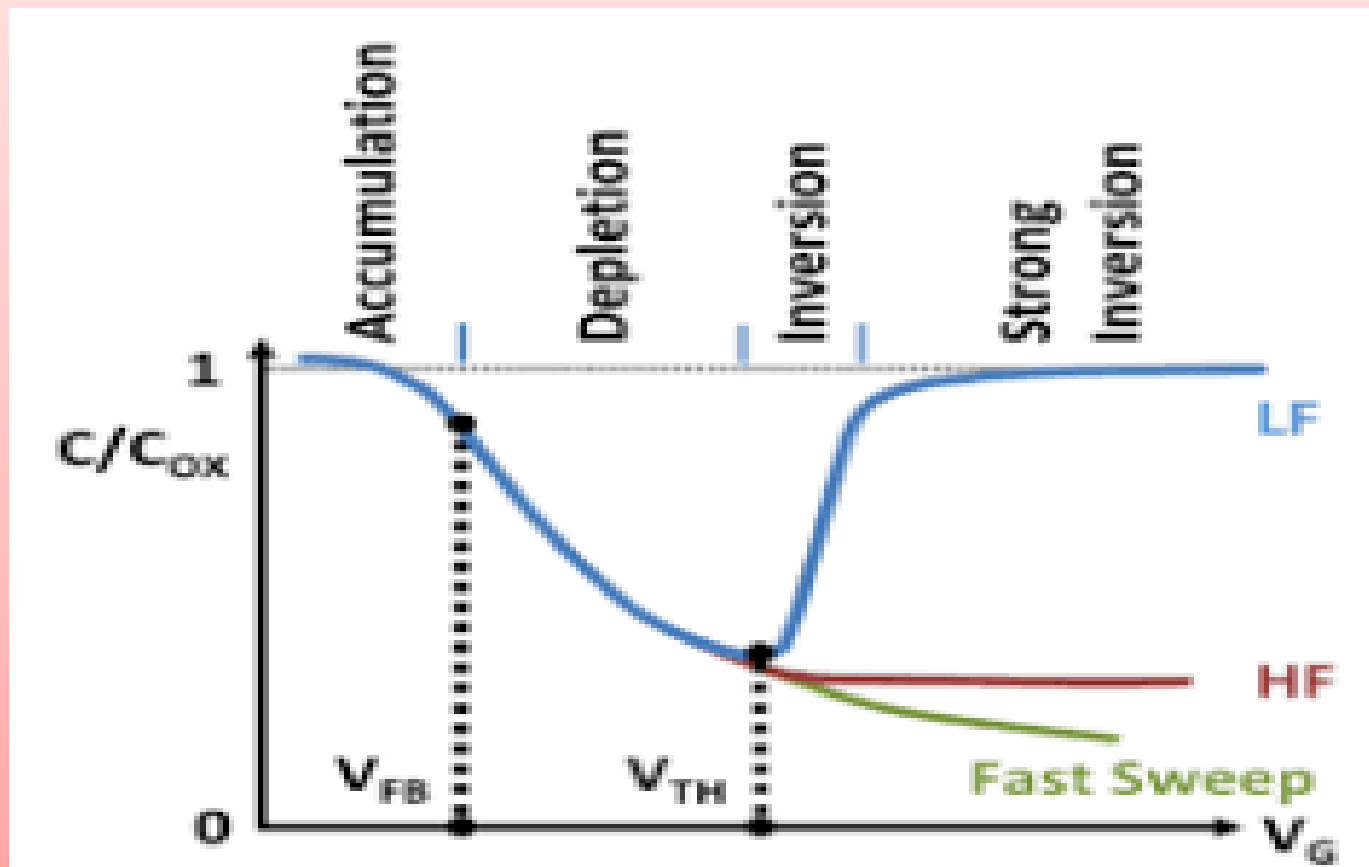
Schéma équivalent

Le schéma équivalent d'une structure MIS dépend fortement de la fréquence du petit signal appliquée à la structure.



Cas de la structure MIS réelle

Caractéristique $C(V)$ de la structure MOS (**Si-type p**)



Cas de la structure MIS réelle

Caractéristique $C(V)$ de la structure MOS (Si-type n)

