

## Correction TD N° 2

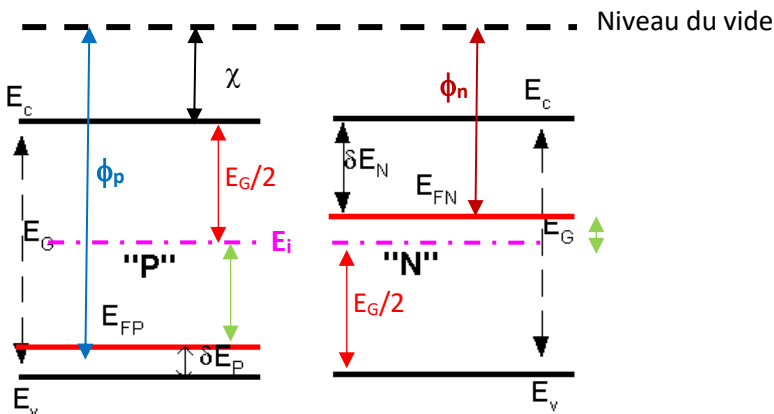
### Exo.1

#### 1) Calcul de $\delta E_p$ et $\delta E_n$

$$p = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_{FP}}{k_B T}\right) \approx N_A \Rightarrow \delta E_p = E_{FP} - E_V = k_B T \cdot \text{Ln}(N_V / N_A)$$

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{FN}}{k_B T}\right) \approx N_D \Rightarrow \delta E_n = E_C - E_{FN} = k_B T \cdot \text{Ln}(N_C / N_D)$$

#### 2) Travail de sortie



##### 2.1. Pour le semi-conducteur de type p

$$\phi_p = \chi + E_g - \delta E_p = \chi + E_g - k_B T \cdot \text{Ln}(N_V / N_A)$$

##### 2.1. Pour le semi-conducteur de type n

$$\phi_n = \chi + \delta E_n = \chi + k_B T \cdot \text{Ln}(N_C / N_D)$$

#### 3) Expressions des distances énergétiques $E_{FN} - E_i$ et $E_i - E_{FP}$

$$n = N_D = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{FN}}{k_B T}\right) \quad \text{et} \quad p = N_A = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_{FP}}{k_B T}\right) \quad (1)$$

Pour un semi-conducteur intrinsèque,  $E_{FN} = E_{FP} = E_i$  et on peut écrire :

$$n = n_i = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_i}{k_B T}\right) \quad p = p_i = n_i = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_i}{k_B T}\right) \quad (2)$$

Ce qui donne, en faisant les rapports entre les équations (1) et (2) :

$$n = N_D = n_i \exp\left(\frac{E_{FN} - E_i}{k_B T}\right) \quad \text{et} \quad p = p_i = n_i = N_A = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_{FP}}{k_B T}\right)$$

Par conséquent :

$$E_{FN} - E_i = k_B T \text{Ln}(N_D / n_i) \quad \text{et} \quad E_i - E_{FP} = k_B T \text{Ln}(N_A / n_i)$$

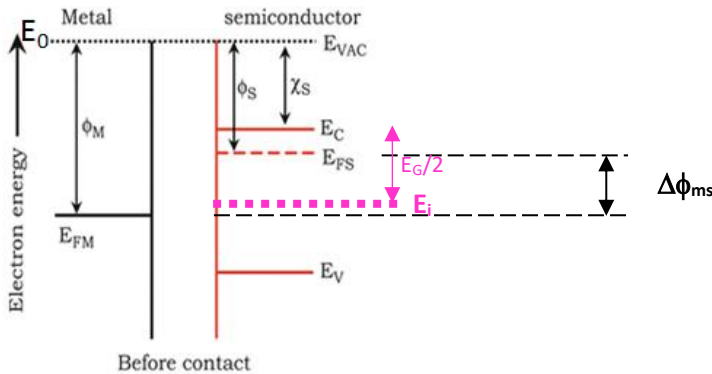
#### 4) Les travaux de sortie

$$\phi_p = \chi + \frac{E_g}{2} + kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad \phi_n = \chi + \frac{E_g}{2} - kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

### Exo2.

#### 2.1. Calcul de la différence des travaux de sortie

$$\Delta\phi = \phi_m - \phi_s = \phi_m - \left[\chi + \frac{E_g}{2} - (E_{FS} - E_i)\right] = \phi_m - \left[\chi + \frac{E_g}{2} - (k_B T \cdot \ln(N_D/n_i))\right]$$

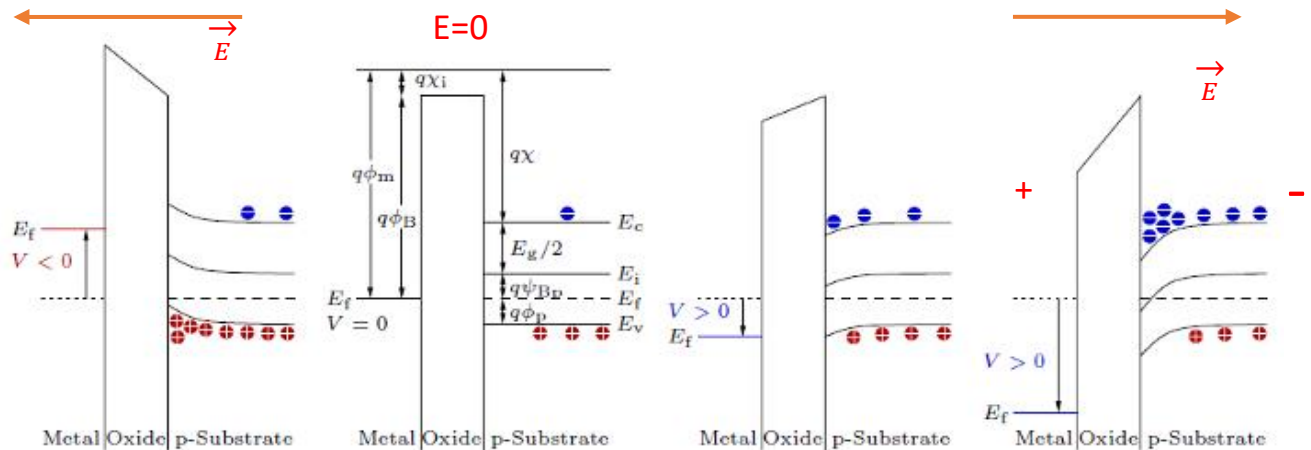


#### 2.2. Application numérique

$$\Delta\phi = \phi_m - \phi_s = 4.1 - [4.05 + 1.12/2 - 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot \ln(10^{15}/10^{10})] = 4.1 - (4.05 + 0.56 - 0.36) = 4.1 - 4.25 = -0.15 \text{ eV}$$

### Exo3.

#### 3.1. Le type de la polarisation sur la grille pour avoir le régime d'inversion et les porteurs majoritaires



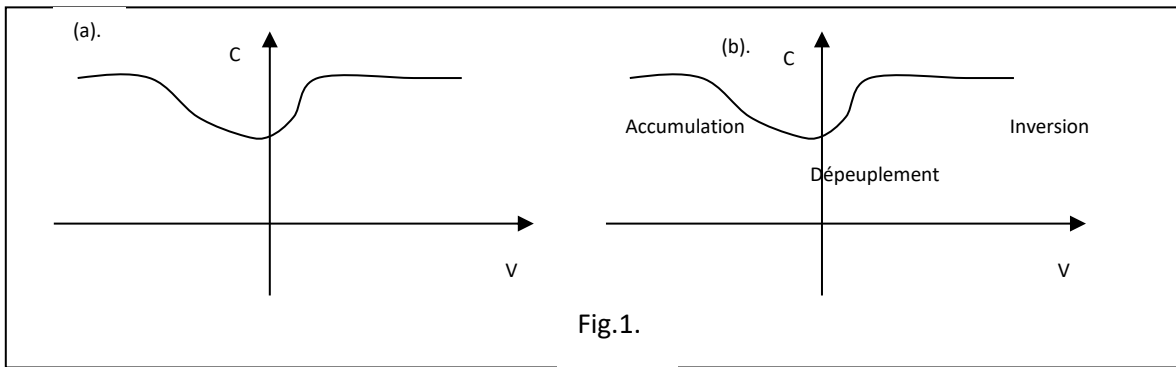
- On a une structure Métal (Al)-Oxyde(SiO<sub>2</sub>)-Semi-conducteur(p) ⇒ la grille doit être polarisée positivement avec une amplitude suffisante pour avoir l'inversion à l'interface
- Les porteurs majoritaires qui apparaissent à l'interface sont les électrons.

#### 3.2. L'allure de la caractéristique C<sub>BF</sub>(V)

Voir Fig.1.a

#### 3.3. Les régimes C(V)

Voir Fig.1.b



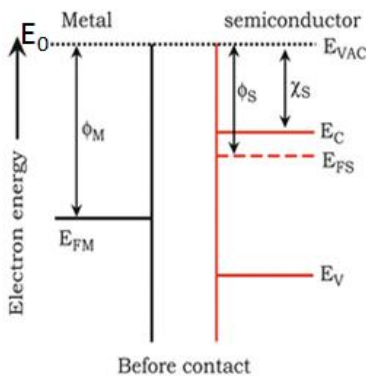
### 3.4. La capacité maximale

La capacité maximale  $C_i$  est celle de l'isolant (oxyde)  $\Rightarrow$

$$C_i = \epsilon_i \epsilon_0 \frac{S}{d} = 3.9 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{10^{-6}}{1000 \cdot 10^{-10}} = 345.15 \cdot 10^{-12} F = 345.15 pF$$

### Exo.4

Calcul de la tension de bande plate



$$V_{FB} = (\phi_m - \phi_s) - Q_{ss}/C_i - Q_{ox}/C_i \approx (\phi_m - \phi_s) - Q_{ss}/C_i \text{ (pour un oxyde parfait)}$$

$$\phi_s = \chi + (E_C - E_{FS})$$

$$n = N_D = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{FN}}{k_B T}\right) \Rightarrow E_C - E_{FN} = kT \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right)$$

$$E_C - E_{FN} = 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \ln(2 \cdot 10^{19}/10^{15}) = 0.26 \text{ eV}$$

$$\phi_s = \chi + (E_C - E_{FS}) = 4.1 + 0.26 = 4.36 \text{ eV}$$

$$C_i = \epsilon_i \epsilon_0 / d = 3.9 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} / 10^{-7} = 34.5 \cdot 10^{-5} \text{ F/m}^2 \approx 35 \cdot 10^{-9} \text{ F/cm}^2$$

$$V_{FB} = (4.3 - 4.36) - (5 \cdot 10^{10} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}) / (35 \cdot 10^{-9}) = -0.06 - 0.23 = -0.29 \text{ eV}$$

## Exo.5

### 5.1. L'épaisseur de l'oxyde

$$C_I = \epsilon_0 \epsilon_I \frac{S}{t_{ox}} = \epsilon_0 \epsilon_I \frac{LZ}{t_{ox}} \Rightarrow t_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_I LZ}{C_I} = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 2010^{-6} \cdot 10010^{-6}}{3 \cdot 10^{-12}} \approx 236 \text{ \AA}$$

### 5.2. La tension de seuil pour une tension de substrat de -2 V.

$$V_T = V_{FB} + 2\Psi_B + \frac{1}{C_I} \sqrt{2qN_A \epsilon_0 \epsilon_{sc} [-V_{BS} + 2\Psi_B]}$$

$$\Psi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1.6 \cdot 10^{-19}} \ln\left(\frac{10^{20}}{1.45 \cdot 10^{16}}\right) \approx 0.22 \text{ V}$$

$$V_T = -0.2 + 2 \cdot 0.22 + \frac{\sqrt{2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{22} \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \cdot [2 + 2 \cdot 0.22]}}{\left(\frac{3 \cdot 10^{-12}}{(20 \cdot 100 \cdot 10^{-12})}\right)} = -0.2 + 2 \cdot 0.22 + 0.60 = 0.85 \text{ V}$$

### 5.3. La transconductance pour le point de fonctionnement : grille +5 V, drain 0V, substrat -2V.

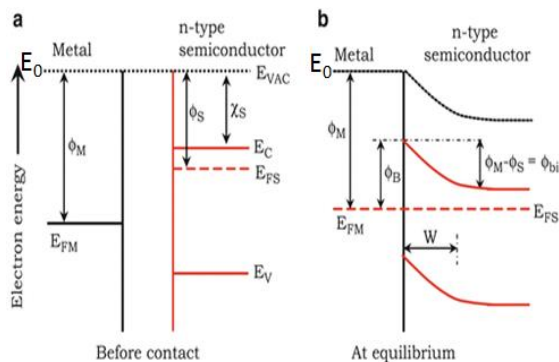
$$g_m = \frac{Z \mu_n C_I}{L} (V_{GS} - V_T) = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 0.08 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-12}}{100 \cdot 20 \cdot 10^{-12}}}{20 \cdot 10^{-6}} (5 - 0.85) = 2.7 \cdot 10^{-3} \text{ A/V}$$

## Exo.6

### 6.1 La tension de pincement

$$V_p = (eN_D a^2) / (2\epsilon_0 \epsilon_{sc}) = [1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{21} \cdot (0.6 \cdot 10^{-6})^2] / [2 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 12.9] = 0.5 \text{ V}$$

### 6.2. La tension de diffusion de la diode Schottky



$$V_{di} = \phi_{Bi} = \phi_m - \phi_{sc}$$

$$\phi_m = 4.8 \text{ eV}$$

$$\phi_{sc} = \chi + \delta E_n = \chi + k_B T \cdot \ln(N_C / N_D) = 4.07 + [1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \ln(4.7 \cdot 10^{17} / 2 \cdot 10^{15})] / 1.6 \cdot 10^{-19} = 4.07 + 0.14 = 4.21 \text{ eV} \Rightarrow$$

$$V_{di} = 4.8 - 4.21 = 0.59 \text{ eV}$$

## Exo7 :

### 7.1 La tension de pincement

$$V_p = (eN_D a^2) / (2\epsilon_0 \epsilon_{sc}) = [1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{21} \cdot (0.5 \cdot 10^{-6})^2] / [2 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 12.9] = 0.35 \text{ V}$$

### 7.2. La transconductance à canal court

$$g_0 = ZeN_D a \mu_0 / L = [50 \cdot 10^{-6} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{21} \cdot 0.5 \cdot 10^{-6} \cdot 0.45] / 10^{-6} = 0.0036 \text{ A/V}$$

### 7.3. La transconductance à canal long

$$g_{ms} = \frac{Z \mu_0}{L} (2\epsilon \epsilon N_d)^{1/2} (V_p^{1/2} - (V_{di} - V_g)^{1/2})$$

$$V_{di} = \phi_{bi} - \delta E_n = 0.8 - 0.14 = 0.66 \text{ V}$$

$$g_{ms} = [(50 \cdot 10^{-6} \cdot 0.45) / 10^{-6}] [2 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 12.9 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{21}]^{1/2} [0.35^{1/2} - (0.66 - 0.5)^{1/2}] = 0.0012 \text{ A.V}^{-1}$$

### 7.4. La capacité de grille lorsque la zone de charge d'espace occupe tout le canal.

$$C_{g0} = (\epsilon_0 \epsilon_{sc} L Z) / a = (8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 12.9 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^{-6}) / 0.5 \cdot 10^{-6} = 1.14 \cdot 10^{-14} \text{ F}$$

### 7.5. La fréquence de coupure.

$$f_c = g_{ms} / (2 \pi C_g) = 0.0003 / (2 \cdot 3.14 \cdot 1.14 \cdot 10^{-14}) = 4.24 \cdot 10^9 \text{ HZ}$$