



Filière : SMP -- Semestre : VI

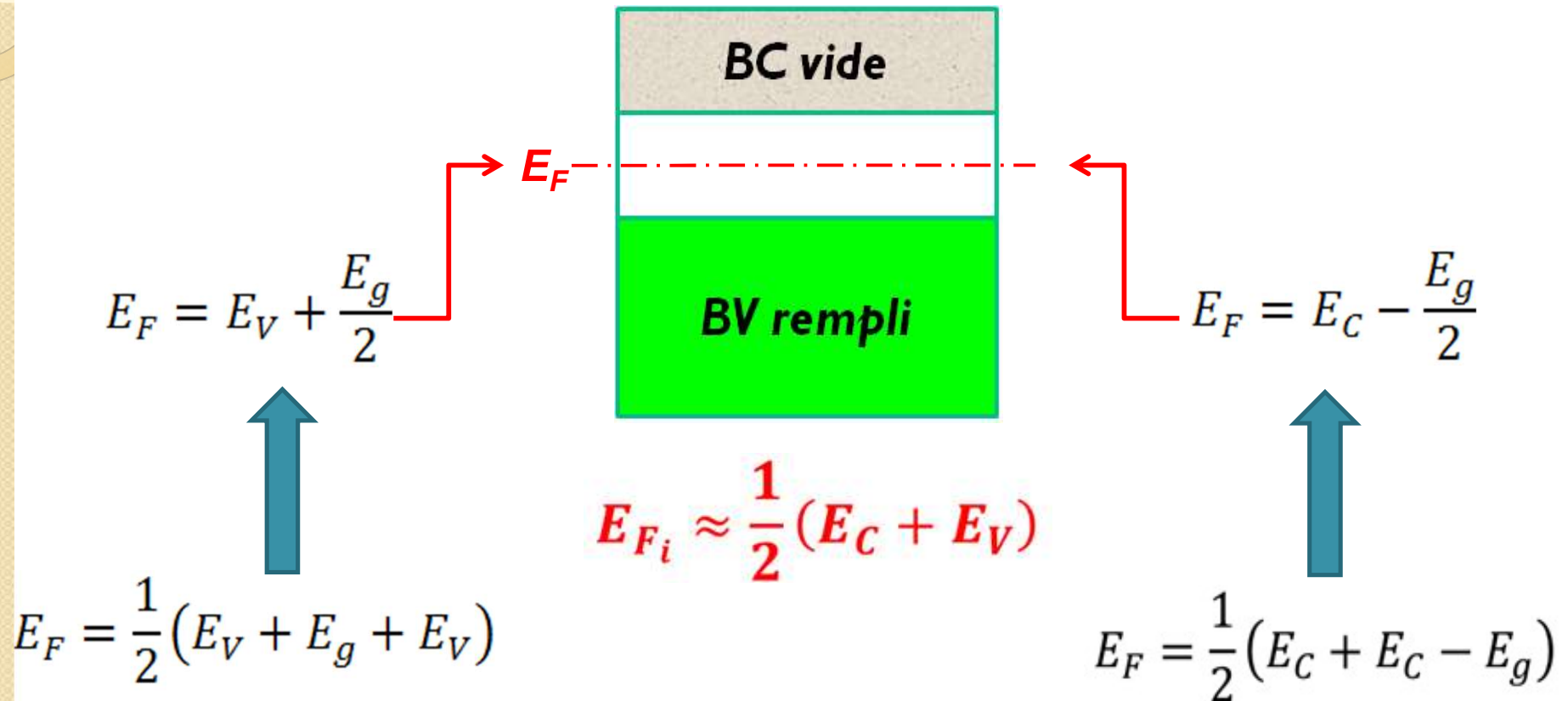
Module : Physique des Matériaux II

Chapitre2 : Application – Physique des Semi-conducteurs

Pr Khechoubi El Mostafa

Année universitaire 2023/2024

Le niveau de Fermi, est donc situé, comme pour un semi conducteur intrinsèque, au voisinage du milieu de la bande interdite



Dans la pratique on choisit l'origine des énergies de telle sorte que

$$E_V = 0 \text{ eV}$$

Semi conducteur N

Dans un semi-conducteur de type **N**, la concentration en donneurs N_d est supérieure à celle d'accepteurs N_a

Les électrons dans ce cas sont appelés les porteurs majoritaires et les trous sont des porteurs minoritaires

$$N_d > N_a$$

$$n > p$$

$$n + N_a = p + N_d$$

$$n \cdot p = n_i^2$$

$$n \cdot (N_d - N_a) = n^2 - n \cdot p$$

$$n^2 - n \cdot (N_d - N_a) - n_i^2 = 0$$

$$n^2 - n.(N_d - N_a) - n_i^2 = 0$$

Solutions de l'équation

Positive

Négative

$$x_1 = \frac{1}{2} \left\{ (N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right\} \quad x_2 = \frac{1}{2} \left\{ (N_d - N_a) - \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right\}$$

Concentration des électrons

Concentration des Trous

$$n = \frac{1}{2} \left\{ (N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right\} \quad p = -\frac{1}{2} \left\{ (N_d - N_a) - \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right\}$$

En pratique les concentrations N_d et N_a sont très élevées (supérieures à n_i)

$$n \approx (N_d - N_a)$$

$$p \approx \frac{n_i^2}{(N_d - N_a)}$$

Semi conducteur **P**

Dans un semi-conducteur de type **P**, la concentration en accepteurs N_a est supérieure à celle donneurs N_d

Les trous dans ce cas sont appelés les porteurs majoritaires et les électrons sont des porteurs minoritaires

$$N_a > N_d \quad p > n$$

De la même manière que précédemment on trouve

$$p \approx (N_a - N_d) \quad n \approx \frac{n_i^2}{(N_a - N_d)}$$

Niveaux de Fermi

La concentration des porteurs de charge dans un semi conducteur est donnée par les relations suivantes :

Semi conducteur **N**

$$n = (N_d - N_a) = n_c \cdot e^{-\left(\frac{E_C - E_{F_n}}{k_B T}\right)}$$



$$E_{F_n} = E_C - k_B T \cdot \ln\left(\frac{n_c}{N_d - N_a}\right)$$

Semi conducteur **P**

$$p = (N_a - N_d) = n_v \cdot e^{\left(\frac{E_V - E_{F_p}}{k_B T}\right)}$$

$$E_{F_p} = E_V + k_B T \cdot \ln\left(\frac{n_v}{N_a - N_d}\right)$$

Dans chaque type de semi conducteur, le niveau de Fermi se rapproche d'autant plus de la bande de porteurs majoritaires que le dopage est important

La position du niveau de Fermi dans le gap se détermine à partir de la condition de neutralité du matériau

$$n_d = n = n_c e^{\frac{E_F - E_C}{k_B T}}$$

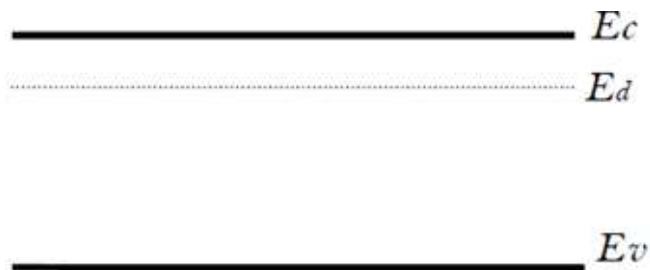
$$n_a = p = n_v e^{\frac{E_V - E_F}{k_B T}}$$

$$E_{F_n} = E_C - k_B T \ln\left(\frac{n_c}{n_d}\right)$$

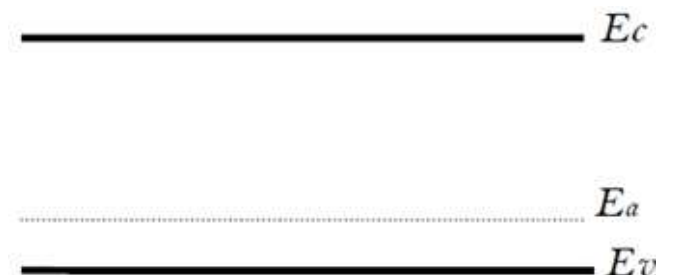
$$E_{F_p} = E_V + k_B T \ln\left(\frac{n_v}{n_a}\right)$$

Le niveau de Fermi est d'autant plus proche du niveau E_C que le dopage est important

Le niveau de Fermi est d'autant plus proche du niveau E_V que le dopage est important



$$\frac{n_c}{n_d} \ll 1$$



$$\frac{n_v}{n_a} \ll 1$$

Dans les deux cas, il est nécessaire de définir la position du niveau de Fermi (E_{Fn} ou E_{Fp}) par rapport au niveau de Fermi intrinsèque : E_{Fi}

Dans un semi conducteur intrinsèque

$$n = p = n_i = n_C \cdot e^{-\left(\frac{E_C - E_{Fi}}{k_B T}\right)} = n_V \cdot e^{\left(\frac{E_V - E_{Fi}}{k_B T}\right)}$$

$$n_C = n_i e^{\frac{E_C - E_{Fi}}{k_B T}}$$

$$n_V = n_i e^{-\frac{E_V - E_{Fi}}{k_B T}}$$

Dans un semi conducteur extrinsèque

$$n = n_C \cdot e^{-\left(\frac{E_C - E_{Fn}}{k_B T}\right)}$$

$$p = n_V \cdot e^{\left(\frac{E_V - E_{Fp}}{k_B T}\right)}$$

$$\frac{n}{n_i} = e^{\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fi}}{k_B T}\right)}$$

$$\frac{p}{n_i} = e^{\left(\frac{E_{Fi} - E_{Fp}}{k_B T}\right)}$$

On définit le paramètre : Φ_{F_i} tel que

$$e \cdot \Phi_{F_i} = E_F - E_{F_i}$$

$$\frac{n}{n_i} = e^{\left(\frac{E_{F_n} - E_{F_i}}{k_B T}\right)}$$

$$\frac{p}{n_i} = e^{\left(\frac{E_{F_i} - E_{F_p}}{k_B T}\right)}$$


Différence entre les niveaux de Fermi des Semi conducteurs dopés et intrinsèque

$$n = n_i \cdot e^{\frac{e\Phi_{F_i}}{k_B T}}$$

$$p = n_i \cdot e^{-\frac{e\Phi_{F_i}}{k_B T}}$$

$$e\Phi_{F_i} = k_B T \ln\left(\frac{n}{n_i}\right)$$

$$e\Phi_{F_i} = -k_B T \ln\left(\frac{p}{n_i}\right)$$


$$e\Phi_{F_i} > 0 \quad \longrightarrow \quad n > n_i \quad \& \quad p < n_i$$

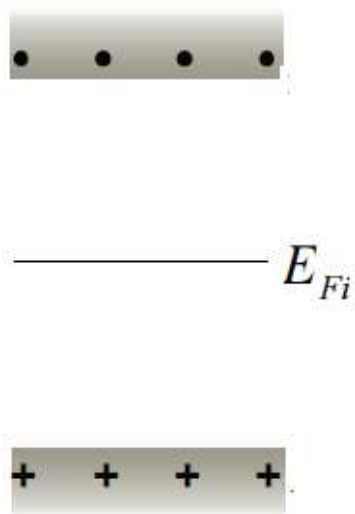
SC de type **N**

$$e\Phi_{F_i} = k_B T \ln \left(\frac{N_d - N_a}{n_i} \right)$$

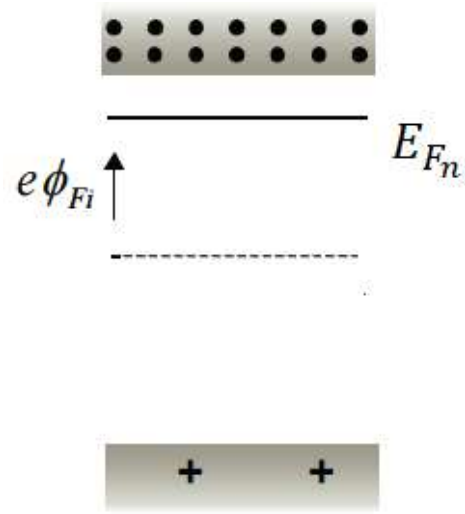
$$e\Phi_{F_i} < 0 \quad \longrightarrow \quad p > n_i \quad \& \quad n < n_i$$

SC de type **P**

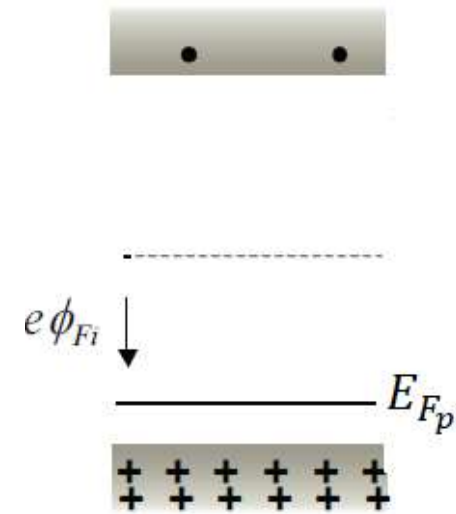
$$e\Phi_{F_i} = k_B T \ln \left(\frac{N_a - N_d}{n_i} \right)$$



Intrinsèque



Type N



Type P

Position du niveau de Fermi dans les différents types de Semi conducteur