Chapitre 1 : Les semi-conducteurs

1. Introduction: conducteurs et semi-conducteurs

1.1 Les conducteurs:

~ conductivité qui décroît avec la température T (augmentation des collisions)

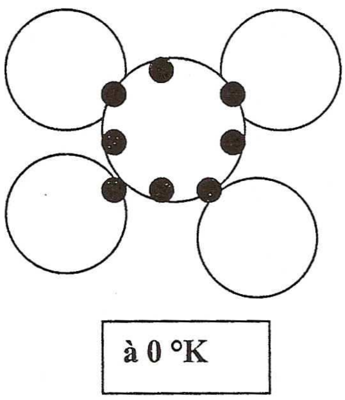
~ densité élevée de porteurs libres (de charge), exemple: métaux du groupe I

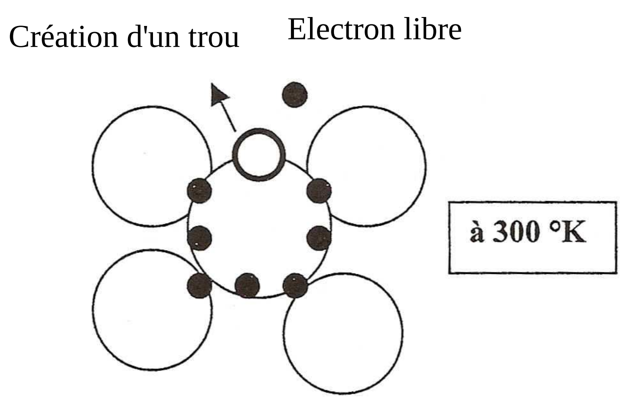
1.2 Les semi-conducteurs intrinsèques (parfaits):

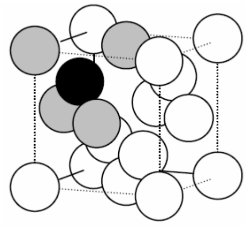
~ isolants à 0 K et faiblement conducteurs à 300 K

~ conductivité qui augmente avec la température T (augmentation du nombre d'électrons libres)

⇒ Si, Ge : éléments du groupe **IV** (tétravalent – 4 liens covalent)

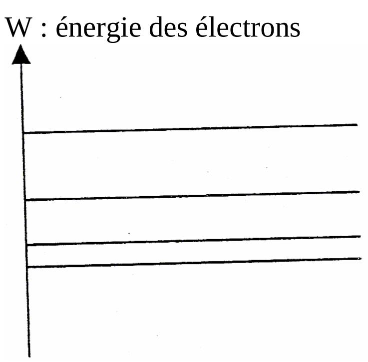




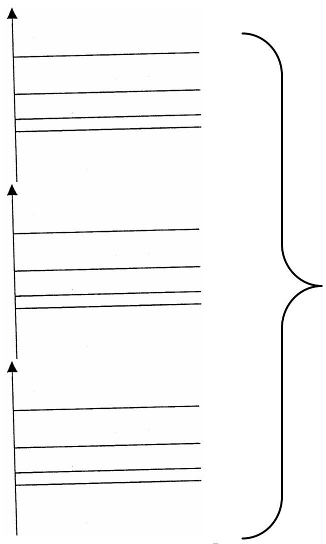


2. Introduction: structure de bande des semi-conducteurs intrinsèques

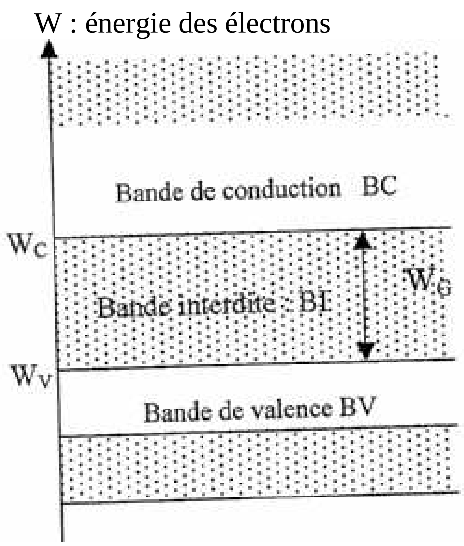
2.1 Le modèle de bande



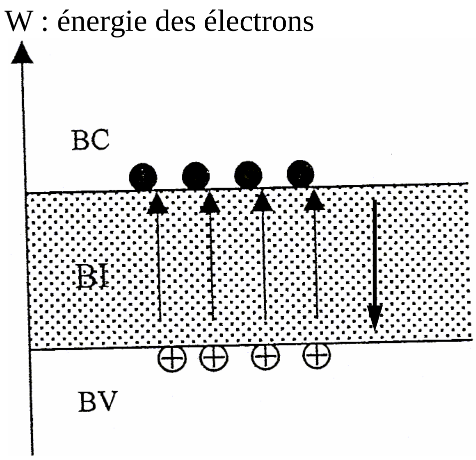
Niveaux d'énergie pour un seul atome



N atomes : couplage entre les niveaux d'énergie



2.2 Les phénomènes de génération-recombinaison



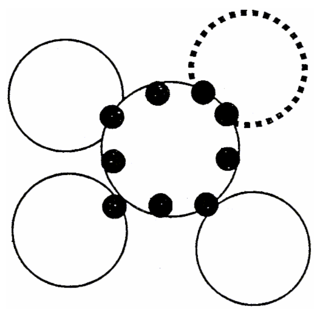
Création (génération) et destruction (recombinaison) de paire électron/trou lors du passage d'un électron de la BV à la BC ou réciproquement.

● électrons

⊕ trous

3. Semi-conducteurs extrinsèques et semi-conducteurs composés

3.1 Principe du dopage



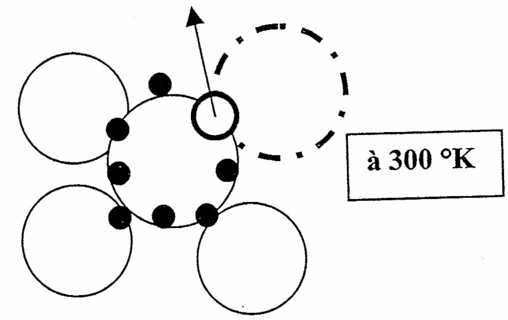
1 Atome du groupe V →
1 électron de plus dans la BC

Atomes du groupe V : As, Bi, P
sont des atomes donneurs

↓

N_D donneurs à T= 300K →
N_D électrons dans la BC

Manque un électron :
Création d'un trou dans la BV



1 Atome du groupe III →
1 trou de plus dans la BV

Atomes du groupe III : B, Al, In
sont des atomes accepteurs

↓

N_A accepteurs à T= 300K →
N_A trous dans la BV

3.2 Les composés semi-conducteurs

Principe: à 300 K la couche externe est saturée

~ composés III-V: AsGa, lnSb
~ composés II-VI: CdS, ZnS, CdSe, ZnSe, ...

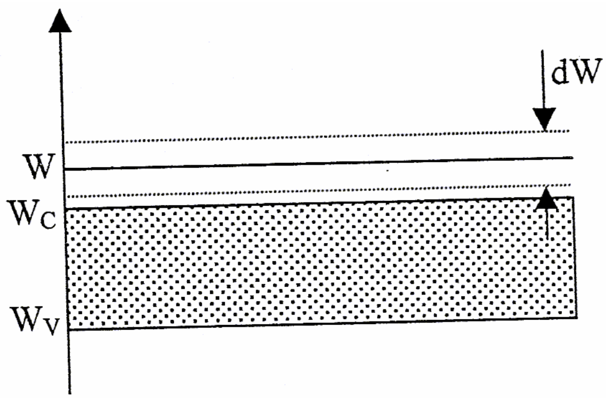
Propriétés du Silicium et de l'arséniure de gallium:

Paramètre:	Ge	Si	GaAs
Largeur de la BI W_G (eV)	0,66	1,12	1,42
Densité intrinsèque n_i (cm^{-3})	$2{,}4\ 10^{13}$	$1{,}45\ 10^{10}$	$1{,}79\ 10^{6}$
Densité d'états utiles dans la BC pour les électrons N_C (cm^{-3})	$1\ 10^{19}$	$2{,}7\ 10^{19}$	$0{,}04\ 10^{19}$
Densité d'états utiles dans la BV pour les trous P_V (cm^{-3})	$0{,}5\ 10^{19}$	$1{,}1\ 10^{19}$	$1{,}3\ 10^{19}$
resistivité intrinsèque $\rho_i = l/\sigma_i$ (Ω cm)	47	$65\ 10^{3}$	$38\ 10^{7}$
Mobilité électron μ_n (cm^2/Vs)	3900	1500	8500
Mobilité trou μ_p (cm^2/Vs)	1900	450	400
Constante diélectrique relative ε_r	16	11,9	13,1

4. Densités n d'électrons, p de trous et position du niveau de Fermi

4.1 Densité d'états d'énergie disponibles pour les électrons et les trous, Fonction de Fermi

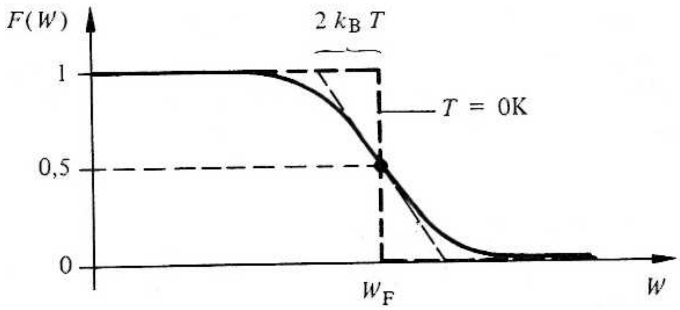
W : énergie des électrons



dn = Z(W) F(W) dW

Z(W) : densité d'états disponibles sur niveau W de la BC

Même type d'équations pour les trous de la BV



La fonction de Fermi-Dirac

$$F(W) = \frac{1}{1 + \exp(\{W - W_F\} / k_B T)}$$

F(W) représente la probabilité pour un électron d'occuper un niveau W

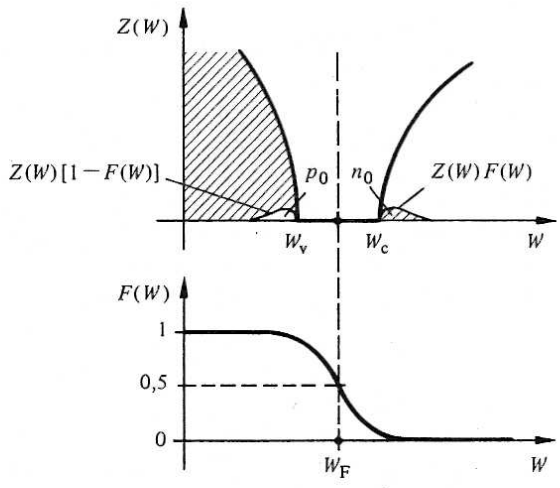
Electron dans la BC pour semi-conducteur non dégénéré :

(i.e. $W - W_F >> k_B$ T)

$F(W) \approx \exp(-\{W - W_F\}/k_B T)]$

Cas des trous dans la BV :

Probabilité $F^*(W) = 1 - F(W) \approx \exp(\{W - W_F\}/k_B T)$



4.2 Densité de porteurs (trous et électrons)

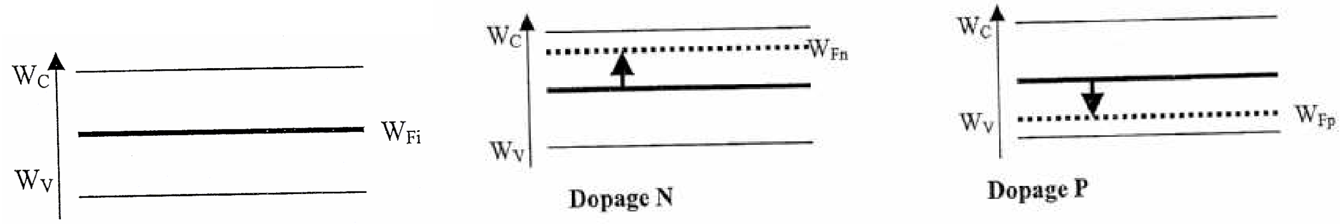
~ pour un semi-conducteur intrinsèque on a $p_i = n_i$ avec la loi d'action de masse $p.n = n_i^2$

~ pour un semi-conducteur extrinsèque la loi d'action de masse est toujours valable mais les porteurs différents de ceux apportés par le dopant sont très minoritaires (p<<n ou n<<p)

4.3 Position du niveau de Fermi (voir TD 1)

~ pour tout semi-conducteur non dégénéré à l'équilibre on montre que:
$n = N_C \exp(-\{W_C - W_F\}/ k_BT)$ et $p = P_V \exp(\{W_V - W_F\} / k_BT)$
➔on montre alors que :
~ pour un semi-conducteur intrinsèque: $W_{Fi} = (W_C+W_V)/2$ (W_{Fi} est au centre de la B.I.)

~ pour un semi-conducteur extrinsèque type N: $W_{Fn} = W_c - k_BT \ln(N_C/N_D)$
~ pour un semi-conducteur extrinsèque type P : $W_{Fp} = W_V + k_BT \ln(P_V / N_A)$



Intrinsèque

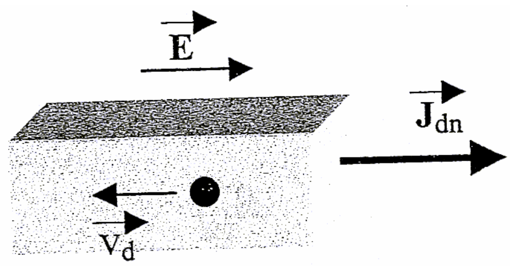
5. Transport dans les semi-conducteurs

Dans un semi-conducteur l'accroissement des charges libres peut avoir trois origines : le phénomène de génération-recombinaison (négligé), l'arrivée de charge due à un champ électrique ou à la diffusion.

5.1 Effet d'un champ électrique et courant de dérive

exemple: courant dû aux électrons de la BC

Expression de la densité de courant de dérive $\mathbf{J_d}$



~ un électron contribue de $-e.v_d$ à la densité de courant

~ densité de courant : vecteur

- norme = |charge| traversant l'unité de surface pendant l'unité de temps
- sens : pour les électrons voir figure

~ densité de courant de dérive pour les électrons $\mathbf{J_{dn}}$:

$\mathbf{J_{dn}} = -e.n.\mathbf{v_{dn}}$ soit $\mathbf{J_{dn}} = e.n.\mu_n.\mathbf{E}$

~ on montre de même que la densité de courant de dérive dû aux trous $\mathbf{J_{dp}}$ s'écrit:

$\mathbf{J_{dp}} = +e.p.\mathbf{v_{dp}}$ soit $\mathbf{J_{dp}} = e.p.\mu_p.\mathbf{E}$

~ densité totale de courant de dérive : $\mathbf{J_d} = (e.n.\mu_n + e.p.\mu_p)\ \mathbf{E}$

5.2 Conductivité

La conductivité d'un semi-conducteur est donc $\sigma = e.n.\mu_n + e.p.\mu_p$ (eq.5)
semi-conducteur intrinsèque: $n = p = n_i$ et conductivité intrinsèque $\sigma_i = e.n_i.(\mu_n+\mu_p)$

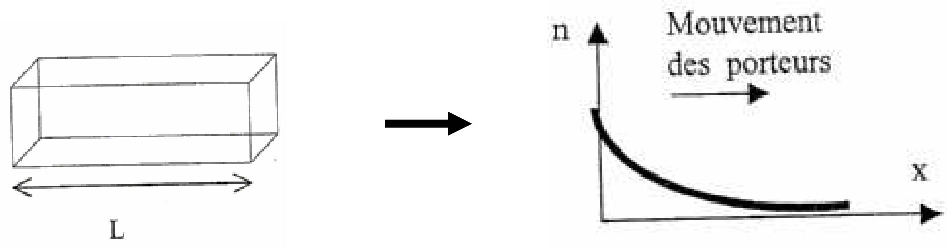
semi-conducteur dopé n^+ : $p << p_i$ et $n \approx N_D$ donc $\sigma_n = e.N_D.\mu_n$

semi-conducteur dopé p^+ : $n<<n_i$ et $p \approx N_A$ donc $\sigma_p = e.N_A.\mu_p$

5.3 Effet d'un gradient de concentration et courant de diffusion

exemple: courant dû aux électrons de la BC

Eclairement
⇒
Energie hv



Origine du courant de diffusion

Dans un gradient de concentration le mouvement des porteurs s'effectue des régions à haute concentration vers les régions à basse concentration

Expression de la densité de courant de diffusion

→ Le flux d'électrons traversant la surface en x=L est
$\phi_n = - D_n.[dn/dx]$ où D_n est la constante de diffusion (prend des valeurs positives)
donc la densité de courant de diffusion s'écrit: $\mathbf{J_{dif,n}} = e.D_n.[dn/dx]\ .\mathbf{e_x}$ où e_x est le vecteur unitaire porté par l'axe x.

→ Le flux de trous traversant la surface en x=L est
$\phi_p = - D_p.[dp/dx]$
donc la densité de courant de diffusion s'écrit: $\mathbf{J_{dif,p}} = -e.D_p.[dp/dx]\ .\mathbf{e_x}$ où $\mathbf{e_x}$ est le vecteur unitaire porté par l'axe x.

5.4 Expressions des densités totales de courant

~ La densité totale de courant d'électrons due aux actions simultanées d'un champ électrique et d'un gradient de concentration s'écrit:

$J_n(x) = J_{dn} + J_{difn} = e.n(x).\mu_n E_x + e.Dn.[dn/dx]$ (eq.7)

~ Similairement, le courant de trous est tel que:

$J_p(x) = J_{dp} + J_{difp} = e.p(x).\ \mu_p E_x - e.Dp.(dp/dx)$ (eq.8)

5.4 Relations d'Einstein

Dans un semi-conducteur à l'équilibre thermodynamique les densités totales de courant sont nulles.
$e.n(x).\mu_n E_x + e.Dn.[dn/dx] = 0$
Or si on a un gradient de concentration on observe simultanément diffusion de porteur due au gradient de concentration et dérive des porteurs dans le champ interne Eint qui provient du potentiel interne Vint.
On a en fait : $Eint = -[dVint(x)/dx] = 1/e\ [dW_C(x)/dx] = 1/e\ [dW_C(x)/dn]\ [dn/dx]$
En utilisant les résultats de 4.3 on peut alors établir les relations d'Einstein qui lient les constantes de diffusion aux mobilités :
$D_n / \mu_n = D_p / \mu_p = k_B T / e$ (eqs.10)