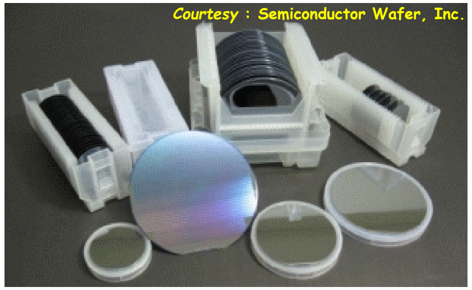
LU3EE200
Techniques et dispositifs pour l'électronique analogique et numérique
Chapitre n°7. Conduction électrique dans les semi-conducteurs



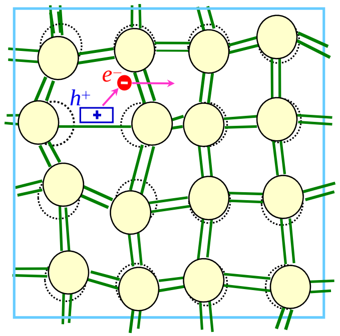
***Wafers* de silicium**

1. Conduction électrique dans le silicium pur (ou intrinsèque)

1.1 Porteurs de charges libres
1.2 Concentrations en porteurs libres
1.3 Transport de charge : courant de dérive
1.4 Transport de charge : courant de diffusion
1.5 Conduction électrique

1.1 Porteurs de charges libres : notion de trou

Réseau cristallin soumis à des vibrations thermiques



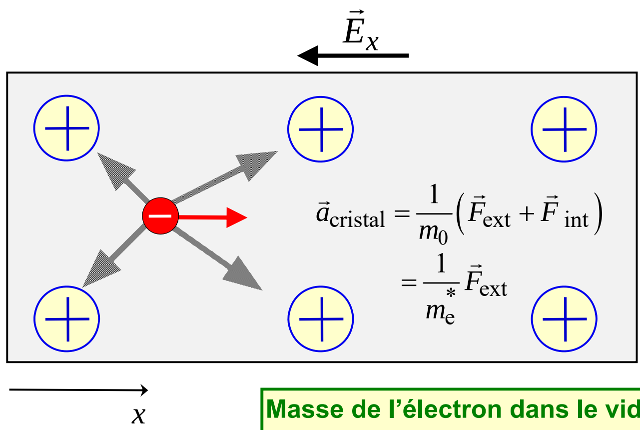
Trou = place libre pour un électron.
Le trou peut être comblé par un électron qui à son tour libère une place occupée : on observe ainsi un **déplacement** du trou dans le cristal.

L'électron est porteur d'une charge (–e).
Le trou est porteur d'une charge (+e).

Rappel : **$e \approx 1{,}602\times10^{-19}$ C**

1.1 Porteurs de charges libres : masse effective

Masse effective des électrons m_e^* et des trous m_h^*



$$\vec{a}_{\text{cristal}} = \frac{1}{m_0}\left(\vec{F}_{\text{ext}} + \vec{F}_{\text{int}}\right) = \frac{1}{m_e^*}\vec{F}_{\text{ext}}$$

Masse de l'électron dans le vide : $m_0 \approx 9{,}1\times10^{-31}$ kg

1. Conduction électrique dans le silicium pur (ou intrinsèque)

1.1 Porteurs de charges libres

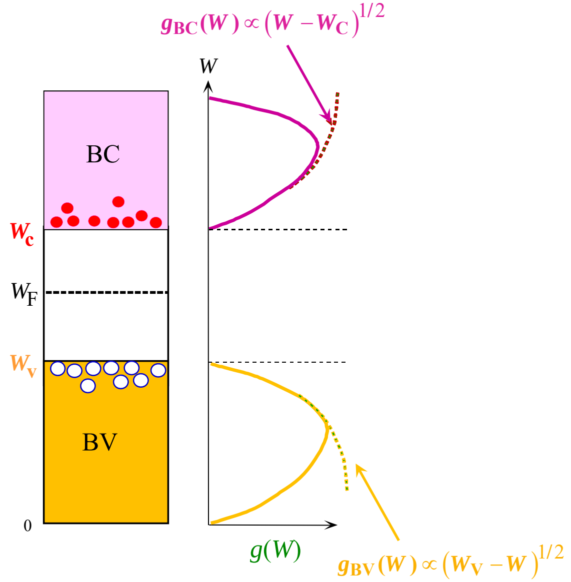
1.2 Concentrations en porteurs libres

1.3 Transport de charge : courant de dérive

1.4 Transport de charge : courant de diffusion

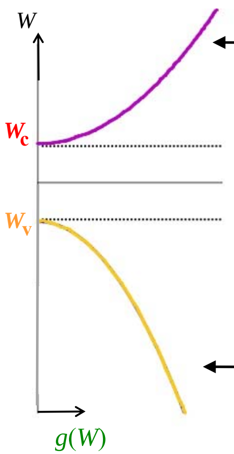
1.5 Conduction électrique

1.2 Concentrations en porteurs libres : densités d'états



1.2 Concentrations en porteurs libres : densités d'états

Densités d'états dans la BC et la BV :



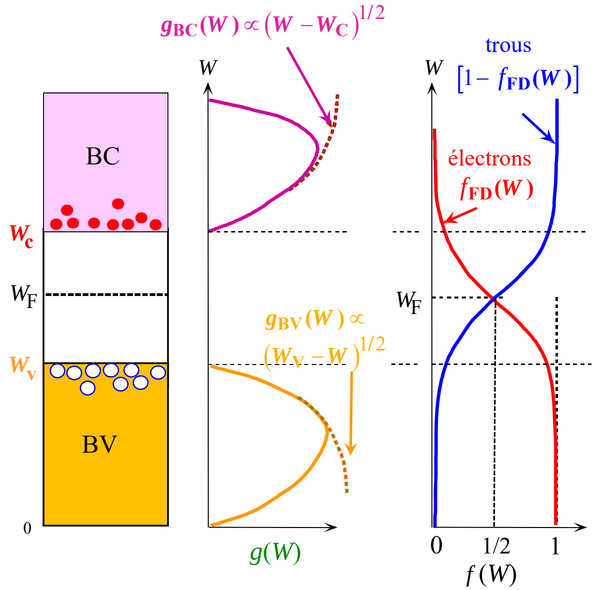
$$g_{BC}(W) = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2}\left(\frac{m_e^*}{\hbar^2}\right)^{3/2}\sqrt{W - W_C}$$

h : constante de Planck ; h ≈ 6,62×10^{-34} J·s

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

$$g_{BV}(W) = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2}\left(\frac{m_h^*}{\hbar^2}\right)^{3/2}\sqrt{W_V - W}$$

1.2 Concentrations en porteurs libres : fonction de Fermi-Dirac

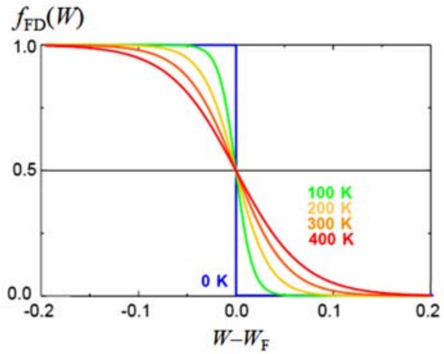


1.2 Concentrations en porteurs libres : fonction de Fermi-Dirac

$$f_{FD}(W)=\frac{1}{1+\exp\left(\frac{W-W_F}{k_BT}\right)}$$

k_B : constante de Boltzmann ; $k_B \approx 1{,}38\times10^{-23}$ J·K^{-1}

- $f_{FD}(W)$: probabilité pour un état d'énergie W d'être occupé par un électron.
- Le **niveau de Fermi W_F** est défini pour $f_{FD}(W=W_F)=½$.
- À 0 K, les électrons occupent les niveaux d'énergie les plus bas, d'où : $\begin{cases} f_{FD}(W<W_F)=1 \\ f_{FD}(W>W_F)=0. \end{cases}$
- À 0 K, W_F est appelé énergie de Fermi.



1.2 Concentrations en porteurs libres : fonction de Fermi-Dirac

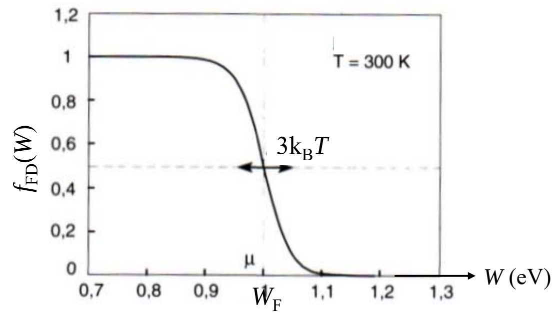
$$f_{FD}(W)=\frac{1}{1+\exp\left(\frac{W-W_F}{k_BT}\right)}$$

Approximation de Boltzmann :

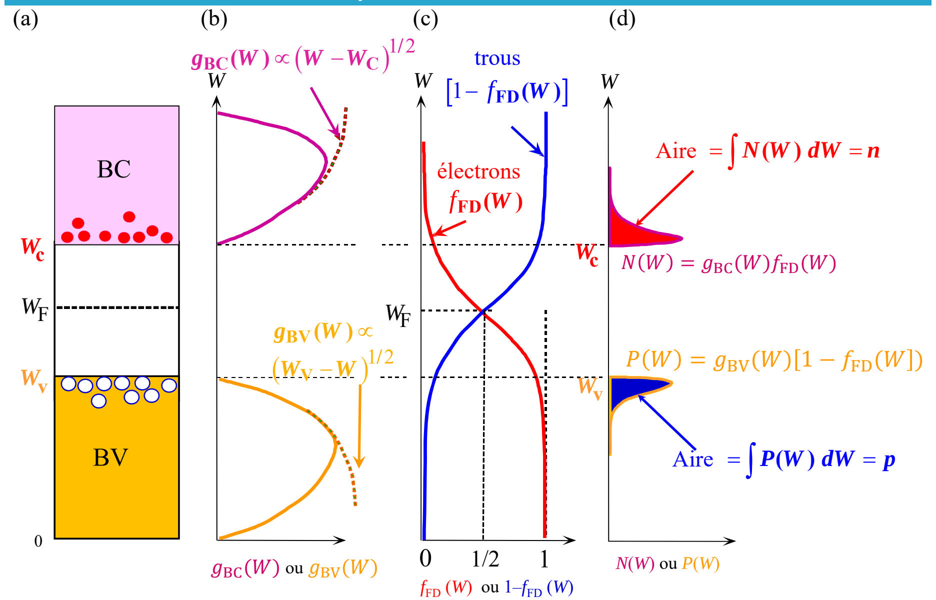
Si $W-W_F \geq 3k_BT$, $f_{FD}(W)=\exp\left(\frac{-(W-W_F)}{k_BT}\right)$

Si $W-W_F \leq 3k_BT$, $f_{FD}(W)=1-\exp\left(\frac{W-W_F}{k_BT}\right)$

À 300 K, k_BT = 26 meV



1.2 Concentrations en porteurs libres



1.2 Concentrations en porteurs libres

- **Concentration n des électrons libres dans la BC :**

$$n=\int_{W_c}^{\infty} N(W)\,dW=\int_{W_c}^{\infty} g_{BC}(W)\,f_{FD}(W)\,dW$$

$N(W)\,dW$: nombre d'électrons dans l'intervalle $[W, W+dW]$;

$g_{BC}(W)$: densité d'états dans la BC = nombre d'états quantiques par unité d'énergie et par unité de volume ;

$f_{FD}(W)$: fonction de Fermi-Dirac = probabilité d'occupation d'un état d'énergie W par un électron.

- **Concentration p des trous libres dans la BV :**

$$p=\int_{-\infty}^{W_v} P(W)\,dW=\int_{-\infty}^{W_v} g_{BV}(W)\,[1-f_{FD}(W)]\,dW$$

$P(W)\,dW$: nombre de trous dans l'intervalle $[W, W+dW]$;

$g_{BV}(W)$: densité d'états dans la BV = nombre d'états quantiques par unité d'énergie et par unité de volume ;

$[1-f_{FD}(W)]$: probabilité d'occupation d'un état d'énergie W par un trou.

1.2 Concentrations en porteurs libres

$$n = N_C \exp\left(-\frac{W_C - W_F}{k_B T}\right) \quad \text{avec } N_C = 2\left(\frac{2\pi\, m_e^*\, k_B T}{h^2}\right)^{3/2}$$

$$p = N_V \exp\left(-\frac{W_F - W_V}{k_B T}\right) \quad \text{avec } N_V = 2\left(\frac{2\pi\, m_h^*\, k_B T}{h^2}\right)^{3/2}$$

N_C et N_V sont les densités d'états dites « effectives »

Unité : m^{-3} (unité usuelle : cm^{-3})

1.3 Semi-conducteur intrinsèque : loi d'action de masse

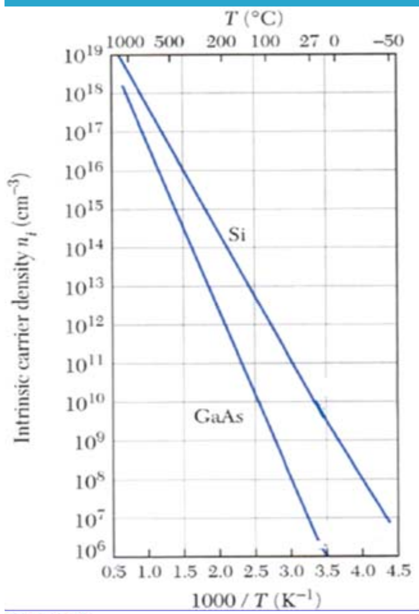
- Un semi-conducteur **intrinsèque** est un cristal semi-conducteur **pur** (**sans impuretés**).
- Son **énergie de *gap*** est : $E_g = W_C - W_V$ Unité SI : J, Unité usuelle : eV
- Il y a **création de paires électron-trou** par activation thermique **de la BV vers la BC**.
- Dans un semi-conducteur **intrinsèque**, il y a donc autant d'électrons libres que de trous libres : $\boxed{n = p = n_i}$
  - n = concentration en électrons libres
  - p = concentration en trous libres
- **Loi d'action de masse :** $\boxed{n\,p = n_i^2}$

$$\boxed{n_i = \sqrt{N_C N_V}\,\exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)}$$

où n_i = concentration intrinsèque
Unité SI : m^{-3}
Unité usuelle : cm^{-3}

$k_B \approx 1{,}38\times10^{-23}$ J·K^{-1} (constante de Boltzmann)

1.3 Semi-conducteur intrinsèque : $n_i\,(T)$



Évolution de la concentration volumique intrinsèque du Si et de GaAs en fonction de la température.

S.M. Sze, 2ème édition, John Wiley & Sons, 2002

1.3 Semi-conducteur intrinsèque : position du niveau de Fermi

$$W_{Fi} = \frac{W_C + W_V}{2} - \frac{1}{2} k_B T \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) = \frac{W_C + W_V}{2} - \frac{3}{4} k_B T \ln\left(\frac{m_e^*}{m_h^*}\right)$$

Affinité électronique

T = 300 K

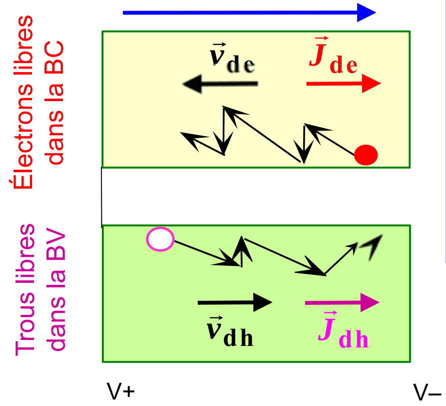
	E_g (eV)	χ (eV)	N_C (cm^{-3})	N_V (cm^{-3})	n_i (cm^{-3})	μ_e (cm²V⁻¹s⁻¹)	μ_h (cm²V⁻¹s⁻¹)	m_e^*/m_0	m_h^*/m_0	ε_r
Ge	**0,66**	4,13	1,04×10^{19}	6×10^{18}	**2,4×10^{13}**	3900	1900	0,56	0,37	16
Si	**1,12**	4,01	2,8×10^{19}	1,04×10^{19}	**1,45×10^{10}**	1350	450	1,08	0,56	11,9
GaAs	**1,42**	4,07	4,7×10^{17}	7×10^{18}	**1,79×10^{6}**	8500	400	0,067	0,45	13,1

1. Conduction électrique dans le silicium pur (ou intrinsèque)

1.1 Porteurs de charges libres
1.2 Concentrations en porteurs libres
1.3 Transport de charge : courant de dérive
1.4 Transport de charge : courant de diffusion
1.5 Conduction électrique

1.3 Dérive des porteurs de charge (1)

$$\vec{E} = -\frac{\Delta V}{\Delta x}\vec{u}_x$$



Dérive (*drift*) = Mouvement des porteurs libres sous l'effet d'un champ électrique extérieur

- Les électrons libres dans la BC se déplacent en **sens opposé** au champ électrique.
- Les trous libres dans la BV se déplacent dans le **même sens** que le champ électrique.
- On associe à la dérive une **densité de courant de dérive $\vec{J}_d$.**

$\vec{v}_{de}$ = vitesse de dérive des électrons libres
$\vec{v}_{dh}$ = vitesse de dérive des trous libres

<u>Rappel</u> : Application d'une tension de polarisation : le champ électrique est orienté dans le sens des potentiels décroissants.

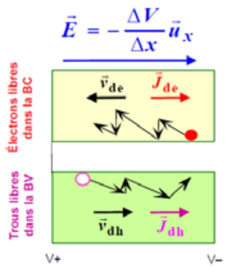
1.3 Dérive des porteurs de charge (2)

$$\begin{cases}\vec{v}_{de} = -\mu_e\vec{E}\\ \vec{v}_{dh} = +\mu_h\vec{E}\end{cases} \Rightarrow \begin{cases}\vec{J}_{de} = n(-e)\vec{v}_{de} = n\ e\ \mu_e\vec{E}\\ \vec{J}_{dh} = +p\ e\ \vec{v}_{dh} = p\ e\ \mu_h\vec{E}\end{cases}$$

$$\Rightarrow \quad \vec{J}_d = \vec{J}_{de} + \vec{J}_{dh} = \sigma\vec{E}$$

où μ est la mobilité des électrons (μ_e) ou des trous (μ_h)
et σ la conductivité : $\sigma = n\ e\ \mu_e + p\ e\ \mu_h > 0$

<u>Unité</u> : mobilité (μ_e ou μ_h) en $m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$
<u>Unité</u> : J_d en $A \cdot m^{-2}$
<u>Unité</u> : conductivité σ en $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$



1. Conduction électrique dans le silicium pur (ou intrinsèque)

1.1 Porteurs de charges libres

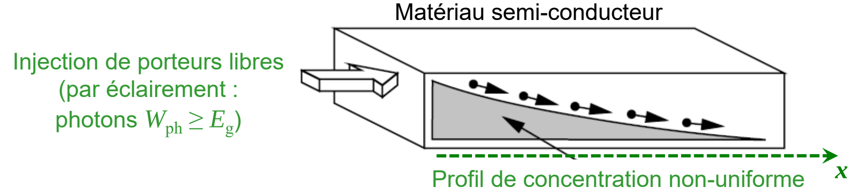
1.2 Concentrations en porteurs libres

1.3 Transport de charge : courant de dérive

1.4 <u>Transport de charge : courant de diffusion</u>

1.5 Conduction électrique

1.4 Diffusion des porteurs de charge



Pour un flux de diffusion d'électrons : $\vec{\Gamma}_e = -D_e \dfrac{dn}{dx}\vec{u}_x$ **où D_e est la constante de diffusion.**

<u>Unité</u> : flux Γ_e en m⁻²·s⁻¹ **<u>Unité</u> : D_e en m²·s⁻¹**

Diffusion = Mouvement des porteurs libres sous l'effet d'un gradient de concentration

- Des porteurs de charge ont été injectés dans le matériau ; on observe un profil de concentration non uniforme.
- Même en l'absence de champ électrique, les porteurs de charge vont se déplacer **de la zone de forte concentration vers la zone de faible concentration**.
- La **diffusion** est un phénomène universel.
- On associe à la diffusion une **densité de courant de diffusion $\vec{J}_{diff}$**.

1.4 Diffusion des porteurs de charge : densité de courant de diffusion

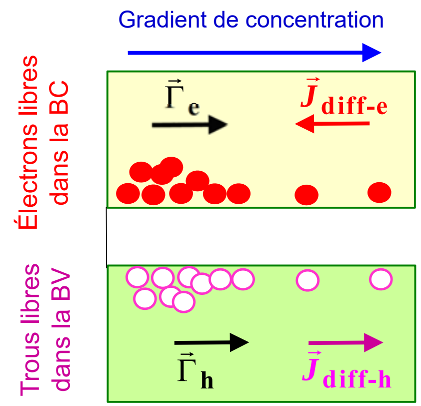
$$\begin{cases} \vec{\Gamma}_e = -D_e \dfrac{dn}{dx}\vec{u}_x \\ \vec{\Gamma}_h = -D_h \dfrac{dp}{dx}\vec{u}_x \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \vec{J}_{diff\text{-}e} = (-e)\vec{\Gamma}_e = e\, D_e \dfrac{dn}{dx}\vec{u}_x \\ \vec{J}_{diff\text{-}h} = +e\,\vec{\Gamma}_h = -e\, D_h \dfrac{dp}{dx}\vec{u}_x \end{cases}$$

$$\Rightarrow \vec{J}_{diff} = \vec{J}_{diff\text{-}e} + \vec{J}_{diff\text{-}h}$$

<u>Unité</u> : J_{diff} en A·m⁻²
<u>Unité</u> : flux (Γ_e ou Γ_h) en m⁻²·s⁻¹
<u>Unité</u> : constante de diffusion (D_e ou D_h) en m²·s⁻¹

- **Les courants de diffusion pour les électrons et les trous circulent en sens opposé.**
- **Ne pas confondre flux de diffusion et courant de diffusion.**

1.4 Diffusion des porteurs de charge : résumé



Important pour les jonctions !

1. Conduction électrique dans le silicium pur (ou intrinsèque)

1.1 Porteurs de charges libres
1.2 Concentrations en porteurs libres
1.3 Transport de charge : courant de dérive
1.4 Transport de charge : courant de diffusion
1.5 Conduction électrique

1.5 Densité de courant total : définition

Soit un semi-conducteur soumis à la fois à un **champ électrique extérieur** et à un **gradient de concentration** : il y a donc transport des charges libres à la fois par **dérive** et **diffusion**.

- **Densité de courant de dérive $\vec{J}_d$ et densité de courant de diffusion $\vec{J}_{diff}$:**

$$\begin{cases} \vec{J}_d = \vec{J}_{de} + \vec{J}_{dh} = e\left(n\,\mu_e + p\,\mu_h\right)\vec{E} \\ \vec{J}_{diff} = \vec{J}_{diff\text{-}e} + \vec{J}_{diff\text{-}h} = e\left(D_e \dfrac{dn}{dx} - D_h \dfrac{dp}{dx}\right)\vec{u}_x \end{cases}$$

- **Densité totale de courant** $\boxed{\vec{J}_{tot} = \vec{J}_d + \vec{J}_{diff}}$

- **Le courant de dérive circule dans le même sens pour les électrons et les trous.**
- **Le courant de diffusion lié aux électrons circule en sens opposé à celui lié aux trous.**

1.5 Densité de courant total : relations d'Einstein

$$\begin{cases} D_e = \dfrac{k_B T}{e}\mu_e \\ D_h = \dfrac{k_B T}{e}\mu_h \end{cases} \quad \text{avec} \quad \frac{k_B T}{e} = V_T = \text{tension thermique}$$

Unité : V

où k_B est la constante de Boltzman.

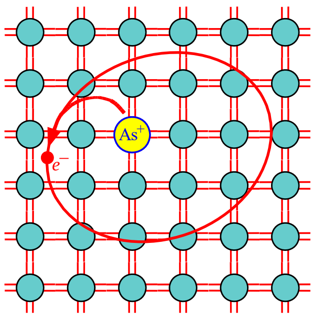
À 300 K, $\dfrac{k_B\,T}{e} \approx 26\text{ mV}$

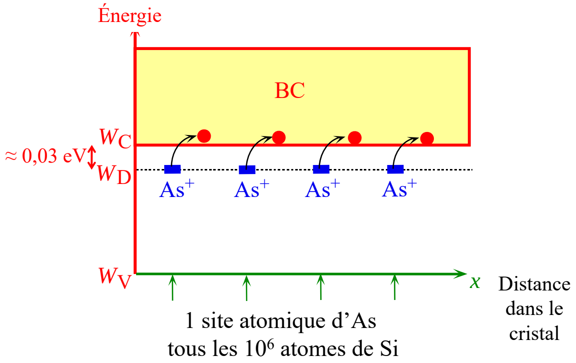
2. Dopage de type N

2.1. Dopage du silicium avec des atomes d'arsenic
2.2. Conductivité
2.3. Déplacement du niveau de Fermi

2.1. Dopage du silicium avec des atomes d'arsenic

Silicium (valence 4) dopé avec de l'arsenic (valence 5)





- **As** (pentavalent) est une impureté de type **donneur** pour Si.
- **P** et **Sb** sont également des impuretés de type donneur pour Si.
- On obtient un **dopage de type N**.

2.2. Conductivité du semi-conducteur dopé N

N_D : concentration en **atomes donneurs** ($N_D >> n_i$)

À **300 K**, tous les atomes donneurs sont **ionisés**.

$$n \approx N_D \quad \text{et} \quad p = \frac{n_i^2}{N_D} << n \quad ; \quad \sigma \approx e\, N_D\, \mu_e$$

- **Porteurs majoritaires : électrons libres dans la bande de conduction.**
- **Porteurs minoritaires : trous libres dans la bande de valence.**

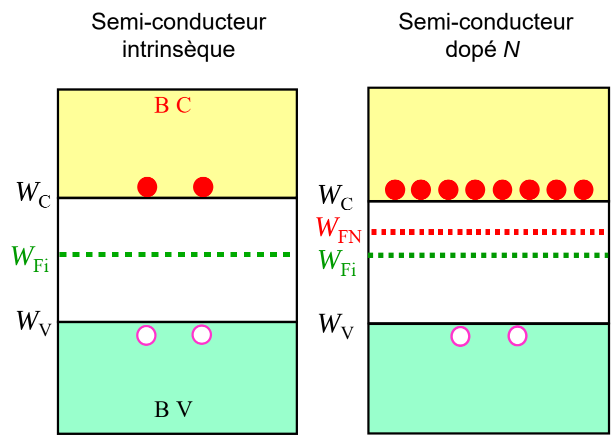
2.3 Déplacement du niveau de Fermi (1/2)

$$\text{Silicium intrinsèque : } n_i = N_C \exp\left(-\frac{W_C - W_{Fi}}{k_B T}\right)$$

$$\text{Silicium dopé N (300 K) : } n \approx N_D = N_C \exp\left(-\frac{W_C - W_{FN}}{k_B T}\right)$$

$$\frac{N_D}{n_i} = \exp\left(-\frac{W_{FN} - W_{Fi}}{k_B T}\right) \Rightarrow W_{FN} - W_{Fi} = k_B T \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

2.3 Déplacement du niveau de Fermi (2/2)



$$W_{FN} = W_{Fi} + k_B T \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

3. Dopage de type P

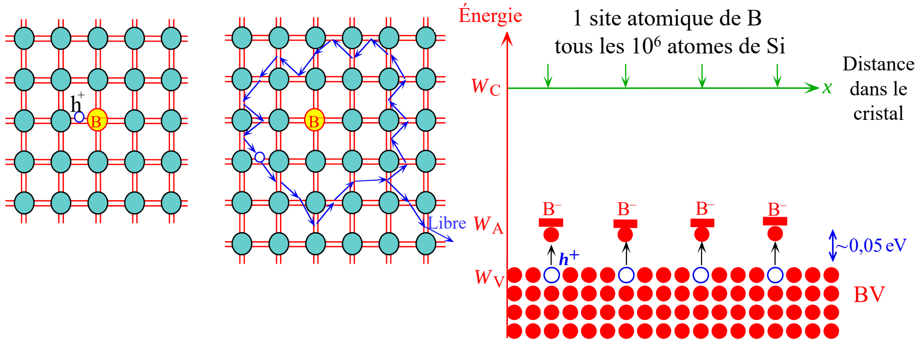
3.1. Dopage du silicium avec des atomes de bore

3.2. Conductivité

3.3. Déplacement du niveau de Fermi

3.1. Dopage du silicium avec des atomes de bore

Silicium (valence 4) dopé avec du bore (valence 3)



- **B** (trivalent) est une impureté de type **accepteur** pour Si.
- **Ga** et **In** sont également des impuretés de type accepteur pour Si.
- On obtient un **dopage de type P**.

3.2. Conductivité du semi-conducteur dopé P

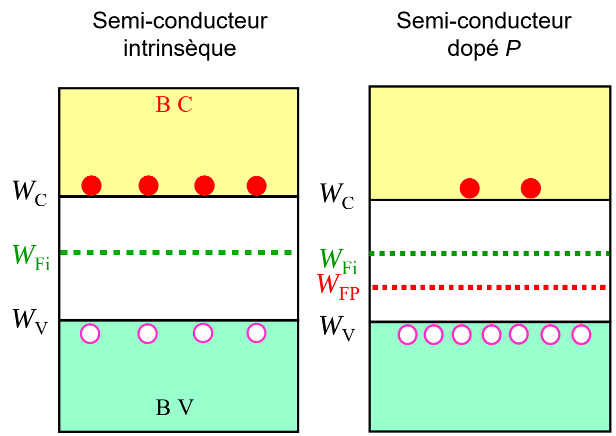
N_A : concentration en **atomes accepteurs** ($N_A >> n_i$)

À **300 K**, tous les atomes accepteurs sont **ionisés**.

$$p \approx N_A \quad \text{et} \quad n = \frac{n_i^2}{N_A} << p \quad ; \quad \sigma \approx e\, N_A\, \mu_h$$

- **Porteurs majoritaires : trous libres dans la bande de valence.**
- **Porteurs minoritaires : électrons libres dans la bande de conduction.**

3.3 Déplacement du niveau de Fermi



$$W_{FP} = W_{Fi} - k_B T \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

4. Dopage compensé

4. Dopage compensé

- On introduit à la fois :
  - ✓ des atomes donneurs (N_D) et
  - ✓ des atomes accepteurs (N_A).
- La compensation peut être :
  - ✓ partielle : le semi-conducteur aura le type de l'impureté dominante, ou
  - ✓ totale : le semi-conducteur est dit intrinsèque par compensation.
- **À 300 K**, tous les atomes donneurs et accepteurs sont ionisés :
  - ✓ les atomes donneurs deviennent des ions positifs ;
  - ✓ les atomes accepteurs deviennent des ions négatifs.
- Équation de la neutralité électrique : $\boxed{n + N_A = p + N_D}$
- Loi d'action de masse : $\boxed{n\,p = n_i^2}$

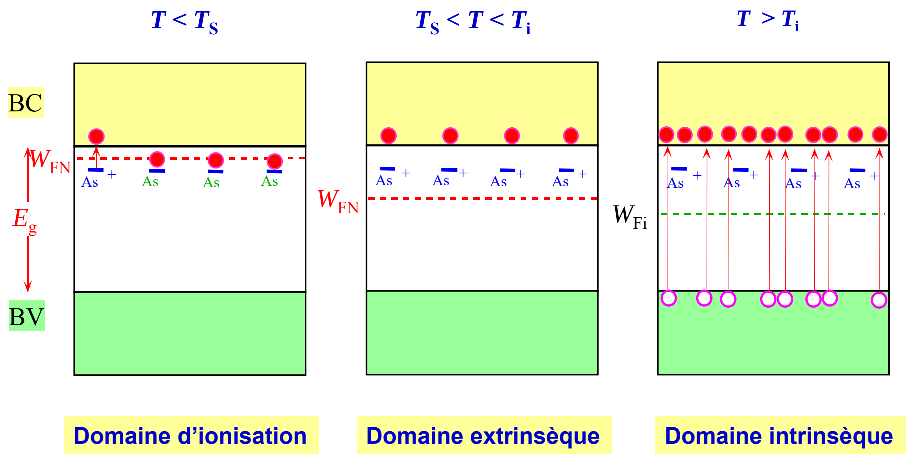
4. Dopage compensé

$$\begin{cases} N_D - N_A >> n_i \text{ (avec } N_D > N_A\text{), d'où} \quad n = \left(N_D - N_A\right) \text{ et } p = \dfrac{n_i^2}{\left(N_D - N_A\right)} \\ N_A - N_D >> n_i \text{ (avec } N_A > N_D\text{), d'où} \quad p = \left(N_A - N_D\right) \text{ et } n = \dfrac{n_i^2}{\left(N_A - N_D\right)} \end{cases}$$

5. Dépendance en température

5.1 Régimes de conduction

Semi-conducteur dopé N



5.2 Concentration en électrons libres dans les divers régimes

Semi-conducteur dopé N

❖ **Domaine d'ionisation :**

$$n = \left(\frac{1}{2} N_C N_V\right)^{1/2} \exp\left(-\Delta W / 2 k_B T\right)$$

❖ **Domaine extrinsèque :**

$$n \approx N_D = N_C \exp\left(-\frac{W_C - W_{FN}}{k_B T}\right)$$

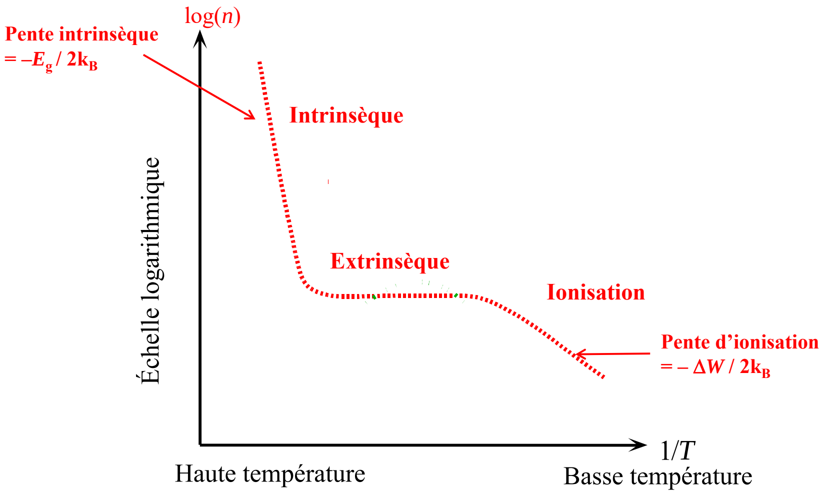
❖ **Domaine intrinsèque :**

$$n\,p = n_i^2 = N_C N_V \exp\left(\frac{-E_g}{k_B T}\right),$$

$$\text{soit } n = \left(N_C N_V\right)^{1/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2 k_B T}\right)$$

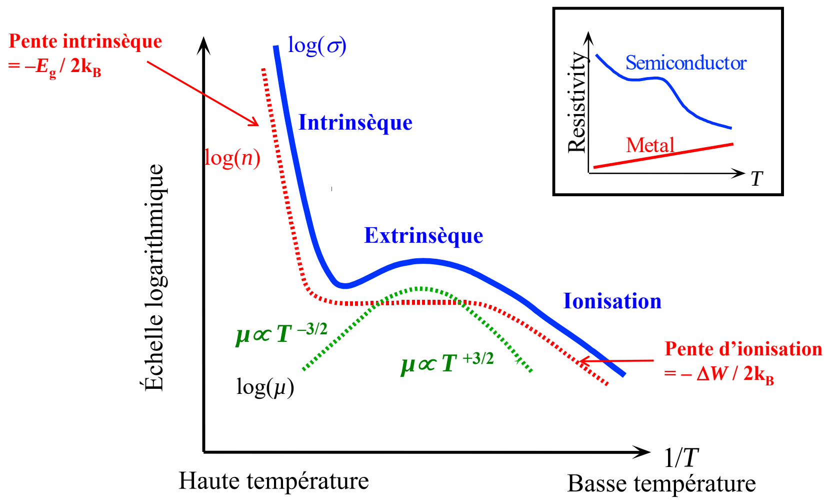
5.3 Dépendance en température de la concentration en électrons libres

Semi-conducteur dopé N



5.4 Dépendance en température de la conductivité et de la mobilité

Semi-conducteur dopé N



5.5 Mobilité en fonction de la concentration en dopants