



IP PARIS



Physique des semi-conducteurs

Cédric Ware

cedric.ware@telecom-paris.fr

Printemps 2024



Cheminement et méthodologie

- Objectif : décrire le comportement électrique de matériaux semi-conducteurs et composants (opto-)électroniques

Cheminement et méthodologie

- Objectif : décrire le comportement électrique de matériaux semi-conducteurs et composants (opto-)électroniques
- Outil : physique quantique (cours précédents)
 - ▶ Pour décrire les états d'un électron dans le matériau
 - ▶ Point important : valeurs de l'énergie (quantifiées en bandes permises)

Cheminement et méthodologie

- Objectif : décrire le comportement électrique de matériaux semi-conducteurs et composants (opto-)électroniques
- Outil : physique quantique (cours précédents)
 - ▶ Pour décrire les états d'un électron dans le matériau
 - ▶ Point important : valeurs de l'énergie (quantifiées en bandes permises)
- Outil : physique statistique (résultats uniquement)
 - ▶ Raisonnement statistique sur beaucoup de particules
 - ▶ Pour décrire le comportement à l'équilibre (le plus probable)
 - ▶ Résultat : distribution de Fermi-Dirac, niveau de Fermi

Cheminement et méthodologie

- Objectif : décrire le comportement électrique de matériaux semi-conducteurs et composants (opto-)électroniques
- Outil : physique quantique (cours précédents)
 - ▶ Pour décrire les états d'un électron dans le matériau
 - ▶ Point important : valeurs de l'énergie (quantifiées en bandes permises)
- Outil : physique statistique (résultats uniquement)
 - ▶ Raisonnement statistique sur beaucoup de particules
 - ▶ Pour décrire le comportement à l'équilibre (le plus probable)
 - ▶ Résultat : distribution de Fermi-Dirac, niveau de Fermi
- Au final : méthode du diagramme de bandes
 - ▶ Donne la densité de porteurs permettant le courant électrique
 - ▶ Permet d'expliquer le comportement électrique des composants à partir des bandes d'énergie et du niveau de Fermi

Plan

Modélisation des électrons dans un cristal

Parenthèse cristallographique : empilement d'atomes ?

Un électron dans un cristal : bandes d'énergie

Beaucoup d'électrons dans un cristal : statistique de Fermi-Dirac

Électrons dans un cristal et conductivité électrique

Diagramme de bandes

Isolant ou conducteur ?

Semi-conducteurs

Porteurs : électrons et trous

Dopage

Loi d'action de masse, densité de porteurs

Composants électroniques : juxtaposition de dopages

Exemple : la jonction P-N

Comportement hors d'équilibre : la diode

Méthode du diagramme de bandes

Autres composants

Plan

Modélisation des électrons dans un cristal

Parenthèse cristallographique : empilement d'atomes ?

Un électron dans un cristal : bandes d'énergie

Beaucoup d'électrons dans un cristal : statistique de Fermi-Dirac

Électrons dans un cristal et conductivité électrique

Diagramme de bandes

Isolant ou conducteur ?

Semi-conducteurs

Porteurs : électrons et trous

Dopage

Loi d'action de masse, densité de porteurs

Composants électroniques : juxtaposition de dopages

Exemple : la jonction P-N

Comportement hors d'équilibre : la diode

Méthode du diagramme de bandes

Autres composants

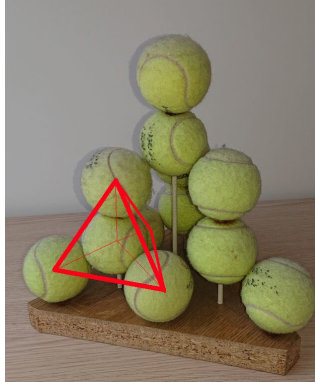
Cristal de silicium : structure diamant

Valence du silicium = 4 \Rightarrow plus proches voisins = tétraèdre



Cristal de silicium : structure diamant

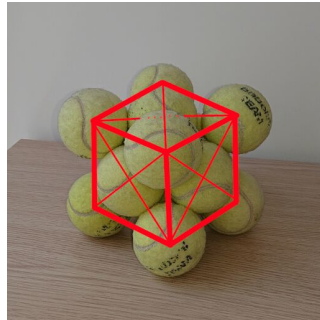
Valence du silicium = 4 \Rightarrow plus proches voisins = tétraèdre



Autre cristal : cubique face centrée

Empilement compact \rightarrow certains métaux.

Alliages type GaAs = 2 CFC imbriqués (structure blende)



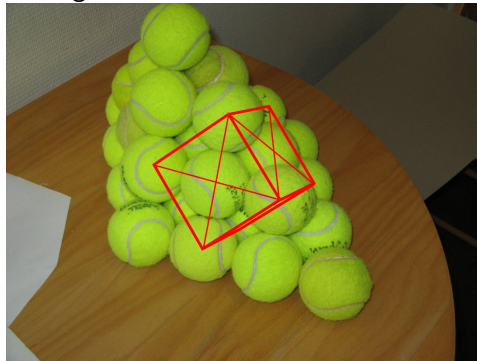
Autre cristal : cubique face centrée

CFC = empilement compact, le même qu'un étalage de fruits



Autre cristal : cubique face centrée

CFC = empilement compact, le même qu'un étalage de fruits



Autre cristal : cubique face centrée

CFC = empilement compact, **malgré le trou au centre du cube**



Notre modèle d'un cristal : puits de potentiel périodique

Et donc, un électron dans tout ça ?

- Cristal = empilement d'atomes 3D (on prendra 1D pour simplifier)
 - Atome = puits de potentiel fini
- ⇒ Cristal = puits de potentiel périodique

Notre modèle d'un cristal : puits de potentiel périodique

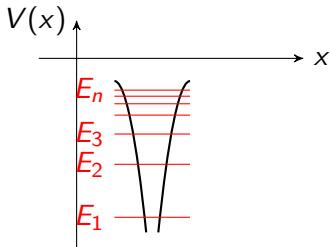
Et donc, un électron dans tout ça ?

- Cristal = empilement d'atomes 3D (on prendra 1D pour simplifier)
 - Atome = puits de potentiel fini
 - ⇒ Cristal = puits de potentiel périodique
- État d'un électron dans un puits de potentiel périodique ?

Notre modèle d'un cristal : puits de potentiel périodique

Et donc, un électron dans tout ça ?

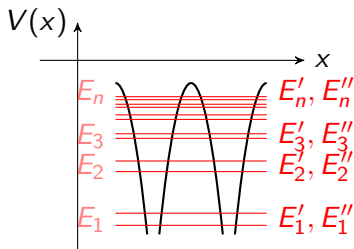
- Cristal = empilement d'atomes 3D (on prendra 1D pour simplifier)
 - Atome = puits de potentiel fini
- ⇒ Cristal = puits de potentiel périodique
- État d'un électron dans un puits de potentiel périodique ?
 - 1 puits : E quantifiée



Notre modèle d'un cristal : puits de potentiel périodique

Et donc, un électron dans tout ça ?

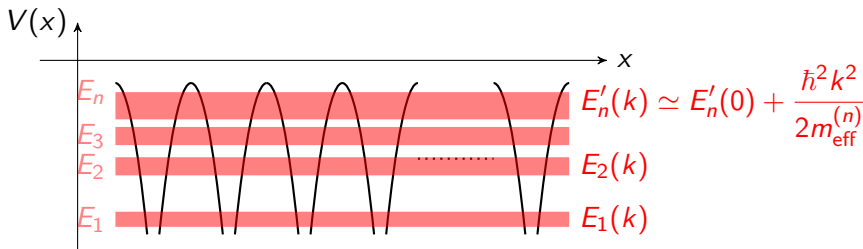
- Cristal = empilement d'atomes 3D (on prendra 1D pour simplifier)
 - Atome = puits de potentiel fini
- ⇒ Cristal = puits de potentiel périodique
- État d'un électron dans un puits de potentiel périodique ?
 - 1 puits : E quantifiée
 - 2 puits : idem, les niveaux se dédoublent, états stationnaires délocalisés



Notre modèle d'un cristal : puits de potentiel périodique

Et donc, un électron dans tout ça ?

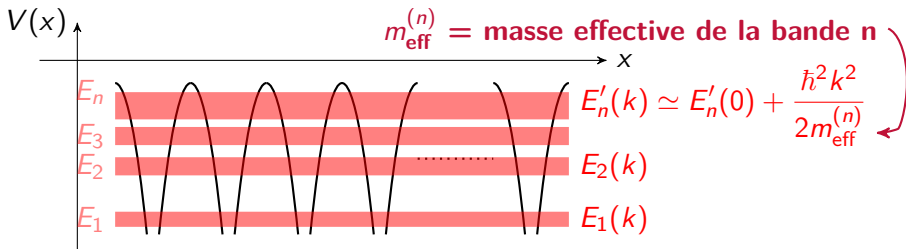
- Cristal = empilement d'atomes 3D (on prendra 1D pour simplifier)
 - Atome = puits de potentiel fini
- ⇒ Cristal = puits de potentiel périodique
- État d'un électron dans un puits de potentiel périodique ?
 - 1 puits : E quantifiée
 - 2 puits : idem, les niveaux se dédoublent, états stationnaires délocalisés
 - $N \gg 1$ puits : **bandes d'énergie**, fonction d'onde $\sim u_k(x)e^{ikx}$
(onde plane avec perturbation u_k de même période que le cristal)



Notre modèle d'un cristal : puits de potentiel périodique

Et donc, un électron dans tout ça ?

- Cristal = empilement d'atomes 3D (on prendra 1D pour simplifier)
 - Atome = puits de potentiel fini
- ⇒ Cristal = puits de potentiel périodique
- État d'un électron dans un puits de potentiel périodique ?
 - 1 puits : E quantifiée
 - 2 puits : idem, les niveaux se dédoublent, états stationnaires délocalisés
 - $N \gg 1$ puits : **bandes d'énergie**, fonction d'onde $\sim u_k(x)e^{ikx}$
(onde plane avec perturbation u_k de même période que le cristal)



Électron dans un cristal

- Valeur énergie \in bandes d'énergies permises (séparées par des bandes interdites)
 - Quantification quasi insensible
 - (Nombre d'états par bande \approx nombre d'atomes)

Électron dans un cristal

- Valeur énergie \in bandes d'énergies permises (séparées par des bandes interdites)
 - Quantification quasi insensible
 - (Nombre d'états par bande \approx nombre d'atomes)
- Dans une bande permise :
 - États stationnaires délocalisés, fonctions d'ondes ressemblent \rightarrow ondes planes
 - $E \simeq E_n + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_{\text{eff}}} = \frac{\langle p \rangle^2}{2m_{\text{eff}}}$ (à rapprocher du classique $E_c = \frac{p^2}{2m}$)

Électron dans un cristal

- Valeur énergie \in bandes d'énergies permises (séparées par des bandes interdites)
 - ▶ Quantification quasi insensible
 - ▶ (Nombre d'états par bande \approx nombre d'atomes)
- Dans une bande permise :
 - ▶ États stationnaires délocalisés, fonctions d'ondes ressemblent \rightarrow ondes planes
 - ▶ $E \simeq E_n + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_{\text{eff}}} = \frac{\langle p \rangle^2}{2m_{\text{eff}}}$ (à rapprocher du classique $E_c = \frac{p^2}{2m}$) \Rightarrow tout se passe comme si l'électron est libre...
 - ▶ ... avec une masse effective m_{eff} !
- (On n'a pas encore tenu compte des interactions avec les autres électrons, cf. la suite)

Beaucoup d'électrons : physique statistique

- Beaucoup d'atomes et d'électrons ($\sim 10^{28}$ par m^3)
 - ▶ Nombre d'Avogadro (12 g de carbone-12) : $\mathcal{N}_A \simeq 6 \cdot 10^{23}$ atomes
 - ▶ Silicium : $2,3 \text{ t/m}^3 \rightarrow 5 \cdot 10^{28}$ atomes par m^3
 - ▶ Air de l'amphi : $2000 \text{ m}^3 \rightarrow 2,4 \cdot 10^3 \text{ kg} \rightarrow 5 \cdot 10^{28}$ molécules

Beaucoup d'électrons : physique statistique

- Beaucoup d'atomes et d'électrons ($\sim 10^{28}$ par m^3)
 - ▶ Nombre d'Avogadro (12 g de carbone-12) : $\mathcal{N}_A \simeq 6 \cdot 10^{23}$ atomes
 - ▶ Silicium : $2,3 \text{ t/m}^3 \rightarrow 5 \cdot 10^{28}$ atomes par m^3
 - ▶ Air de l'amphi : $2000 \text{ m}^3 \rightarrow 2,4 \cdot 10^3 \text{ kg} \rightarrow 5 \cdot 10^{28}$ molécules
- ⇒ Impossible de les considérer individuellement
- ⇒ Statistiques en fonction de paramètres macroscopiques (p. ex. T)
 - ▶ (Attention, il y aura aussi des probabilités, mais ce n'est pas la même chose qu'une mesure, le contexte est différent !)

Beaucoup d'électrons : physique statistique

- Beaucoup d'atomes et d'électrons ($\sim 10^{28}$ par m^3)
 - ▶ Nombre d'Avogadro (12 g de carbone-12) : $\mathcal{N}_A \simeq 6 \cdot 10^{23}$ atomes
 - ▶ Silicium : $2,3 \text{ t/m}^3 \rightarrow 5 \cdot 10^{28}$ atomes par m^3
 - ▶ Air de l'amphi : $2000 \text{ m}^3 \rightarrow 2,4 \cdot 10^3 \text{ kg} \rightarrow 5 \cdot 10^{28}$ molécules

⇒ Impossible de les considérer individuellement

⇒ Statistiques en fonction de paramètres macroscopiques (p. ex. T)

 - ▶ (Attention, il y aura aussi des probabilités, mais ce n'est pas la même chose qu'une mesure, le contexte est différent !)
- Un point de repère intéressant (le plus probable) : l'équilibre
 - ▶ Vous avez sans doute rencontré cette notion en chimie ou en thermodynamique
 - ▶ Y avez-vous pensé dans un simple jeu de loto ?

Équilibre et tirage aléatoire

- Tirage du loto : 6 nombres parmi 49, $C_{49}^6 \approx 1,4 \cdot 10^7$ combinaisons

Équilibre et tirage aléatoire

- Tirage du loto : 6 nombres parmi 49, $C_{49}^6 \approx 1,4 \cdot 10^7$ combinaisons
 - ▶ 1, 2, 3, 4, 5, 6 : une chance sur 14 millions

Équilibre et tirage aléatoire

- Tirage du loto : 6 nombres parmi 49, $C_{49}^6 \approx 1,4 \cdot 10^7$ combinaisons
 - ▶ 1, 2, 3, 4, 5, 6 : une chance sur 14 millions
 - ▶ 1, 8, 20, 34, 36, 42 : une chance sur 14 millions aussi

Équilibre et tirage aléatoire

- Tirage du loto : 6 nombres parmi 49, $C_{49}^6 \approx 1,4 \cdot 10^7$ combinaisons
 - ▶ 1, 2, 3, 4, 5, 6 : une chance sur 14 millions
 - ▶ 1, 8, 20, 34, 36, 42 : une chance sur 14 millions aussi
 - ▶ ... mais beaucoup plus de tirages « ressemblent » au second !

Équilibre et tirage aléatoire

- Tirage du loto : 6 nombres parmi 49, $C_{49}^6 \approx 1,4 \cdot 10^7$ combinaisons
 - ▶ 1, 2, 3, 4, 5, 6 : une chance sur 14 millions
 - ▶ 1, 8, 20, 34, 36, 42 : une chance sur 14 millions aussi
 - ▶ ... mais beaucoup plus de tirages « ressemblent » au second !
- Équilibre, max(entropie), 2^e principe...
 - ▶ Rien de mystérieux, juste la **configuration la plus probable**
 - ▶ À quel point plus probable ? Doit-on se soucier des autres ?

Équilibre et tirage aléatoire

- Tirage du loto : 6 nombres parmi 49, $C_{49}^6 \approx 1,4 \cdot 10^7$ combinaisons
 - ▶ 1, 2, 3, 4, 5, 6 : une chance sur 14 millions
 - ▶ 1, 8, 20, 34, 36, 42 : une chance sur 14 millions aussi
 - ▶ ... mais beaucoup plus de tirages « ressemblent » au second !
- Équilibre, max(entropie), 2^e principe...
 - ▶ Rien de mystérieux, juste la configuration la plus probable
 - ▶ À quel point plus probable ? Doit-on se soucier des autres ?
- De façon abstraite, on montre : fluctuations statistiques relatives $\sim 1/\sqrt{\text{nombre de particules}}$
 - ▶ Si $N \sim 10^{28}$, fluctuations 10^{-14} autour de la configuration la plus probable

⇒ Ne considérons que celle-ci !

Équilibre et tirage aléatoire

- Tirage du loto : 6 nombres parmi 49, $C_{49}^6 \approx 1,4 \cdot 10^7$ combinaisons
 - ▶ 1, 2, 3, 4, 5, 6 : une chance sur 14 millions
 - ▶ 1, 8, 20, 34, 36, 42 : une chance sur 14 millions aussi
 - ▶ ... mais beaucoup plus de tirages « ressemblent » au second !
- Équilibre, max(entropie), 2^e principe...
 - ▶ Rien de mystérieux, juste la configuration la plus probable
 - ▶ À quel point plus probable ? Doit-on se soucier des autres ?
- De façon abstraite, on montre : fluctuations statistiques relatives $\sim 1/\sqrt{\text{nombre de particules}}$
 - ▶ Si $N \sim 10^{28}$, fluctuations 10^{-14} autour de la configuration la plus probable
⇒ Ne considérons que celle-ci !
- ... et concrètement, par rapport au loto ?

Arriver spontanément hors d'équilibre ou gagner au loto ?

Est-il plus probable de gagner le gros lot à **tous les tirages du loto** pendant T années (3 tirages par an $\Rightarrow 150T$ tirages); ou d'observer à **un moment** toutes les molécules d'oxygène (10^{28} , indépendantes) dans une moitié de l'amphi (hors d'équilibre) ?

Arriver spontanément hors d'équilibre ou gagner au loto ?

Est-il plus probable de gagner le gros lot à **tous les tirages du loto** pendant T années (3 tirages par an $\Rightarrow 150T$ tirages); ou d'observer à **un moment** toutes les molécules d'oxygène (10^{28} , indépendantes) dans une moitié de l'amphi (hors d'équilibre) ?

- $p_{\text{loto}} = (1,4 \cdot 10^7)^{-1}$ par tirage
- $p_{\text{tous les lotos}}(T) = (1,4 \cdot 10^7)^{-150T} \simeq 10^{-1000T}$
(décroît exponentiellement)

Arriver spontanément hors d'équilibre ou gagner au loto ?

Est-il plus probable de gagner le gros lot à **tous les tirages du loto** pendant T années (3 tirages par an $\Rightarrow 150T$ tirages) ; ou d'observer à **un moment** toutes les molécules d'oxygène (10^{28} , indépendantes) dans une moitié de l'amphi (hors d'équilibre) ?

■ $p_{\text{loto}} = (1,4 \cdot 10^7)^{-1}$ par tirage

■ $p_{\text{tous les lotos}}(T) = (1,4 \cdot 10^7)^{-150T} \simeq 10^{-1000T}$
(décroît exponentiellement)

■ $p_{\text{hors éq}} = (1/2)^{10^{28}} \simeq 10^{-3 \cdot 10^{27}}$ par « tirage »

Arriver spontanément hors d'équilibre ou gagner au loto ?

Est-il plus probable de gagner le gros lot à **tous les tirages du loto** pendant T années (3 tirages par an $\Rightarrow 150T$ tirages); ou d'observer à **un moment** toutes les molécules d'oxygène (10^{28} , indépendantes) dans une moitié de l'amphi (hors d'équilibre) ?

- $p_{\text{loto}} = (1,4 \cdot 10^7)^{-1}$ par tirage

- $p_{\text{tous les lotos}}(T) = (1,4 \cdot 10^7)^{-150T} \simeq 10^{-1000T}$
(décroît exponentiellement)

- $p_{\text{hors éq}} = (1/2)^{10^{28}} \simeq 10^{-3 \cdot 10^{27}}$ par « tirage »

- Prenons 1 « tirage » $\approx 1/30^{\text{e}}$ de seconde, temps que les molécules parcourent la pièce $\Rightarrow 10^9$ tirages par an

Arriver spontanément hors d'équilibre ou gagner au loto ?

Est-il plus probable de gagner le gros lot à **tous les tirages du loto** pendant T années (3 tirages par an $\Rightarrow 150T$ tirages); ou d'observer à **un moment** toutes les molécules d'oxygène (10^{28} , indépendantes) dans une moitié de l'amphi (hors d'équilibre) ?

- $p_{\text{loto}} = (1,4 \cdot 10^7)^{-1}$ par tirage

- $p_{\text{tous les lotos}}(T) = (1,4 \cdot 10^7)^{-150T} \simeq 10^{-1000T}$
(décroît exponentiellement)

- $p_{\text{hors éq}} = (1/2)^{10^{28}} \simeq 10^{-3 \cdot 10^{27}}$ par « tirage »

- Prenons 1 « tirage » $\approx 1/30^{\text{e}}$ de seconde, temps que les molécules parcourent la pièce $\Rightarrow 10^9$ tirages par an

- Probabilité de l'observer 1 fois sur T années :
 $p_{\text{hors éq}}(T) \simeq 10^{-3 \cdot 10^{27}} \times 10^9 T$
(croît linéairement)

Arriver spontanément hors d'équilibre ou gagner au loto ?

Est-il plus probable de gagner le gros lot à **tous les tirages du loto** pendant T années (3 tirages par an $\Rightarrow 150T$ tirages) ; ou d'observer à **un moment** toutes les molécules d'oxygène (10^{28} , indépendantes) dans une moitié de l'amphi (hors d'équilibre) ?

- $p_{\text{loto}} = (1,4 \cdot 10^7)^{-1}$ par tirage

- $p_{\text{tous les lotos}}(T) = (1,4 \cdot 10^7)^{-150T} \simeq 10^{-1000T}$
(décroît exponentiellement)

- $p_{\text{hors éq}} = (1/2)^{10^{28}} \simeq 10^{-3 \cdot 10^{27}}$ par « tirage »

- Prenons 1 « tirage » $\approx 1/30^{\text{e}}$ de seconde, temps que les molécules parcourent la pièce $\Rightarrow 10^9$ tirages par an

- Probabilité de l'observer 1 fois sur T années :
 $p_{\text{hors éq}}(T) \simeq 10^{-3 \cdot 10^{27}} \times 10^9 T$
(croît linéairement)

- Combien d'années faut-il attendre pour que les p se croisent ?

Arriver spontanément hors d'équilibre ou gagner au loto ?

Est-il plus probable de gagner le gros lot à **tous les tirages du loto** pendant T années (3 tirages par an $\Rightarrow 150T$ tirages); ou d'observer à **un moment** toutes les molécules d'oxygène (10^{28} , indépendantes) dans une moitié de l'amphi (hors d'équilibre) ?

- $p_{\text{loto}} = (1,4 \cdot 10^7)^{-1}$ par tirage

- $p_{\text{tous les lotos}}(T) = (1,4 \cdot 10^7)^{-150T} \simeq 10^{-1000T}$ (décroît exponentiellement)

- $p_{\text{hors éq}} = (1/2)^{10^{28}} \simeq 10^{-3 \cdot 10^{27}}$ par « tirage »

- Prenons 1 « tirage » $\approx 1/30^{\text{e}}$ de seconde, temps que les molécules parcourent la pièce $\Rightarrow 10^9$ tirages par an

- Probabilité de l'observer 1 fois sur T années :
 $p_{\text{hors éq}}(T) \simeq 10^{-3 \cdot 10^{27}} \times 10^9 T$ (croît linéairement)

- Combien d'années faut-il attendre pour que les p se croisent ?

- ▶ Égalité des $\log(p) \Rightarrow T \approx 3 \cdot 10^{24}$ ans

- ▶ (Âge de l'univers $\approx 10^{10}$ ans)

- ▶ Avant T , il y a **plus de chances de gagner tous les tirages du loto !**

Cas des électrons à l'équilibre dans un cristal

- On garde les mêmes états stationnaires (interactions négligeables)
 - ▶ Chaque état (d'énergie E) occupé par 0 ou 1 électron (principe d'exclusion de Pauli, valable pour tous les fermions)
 - ▶ À l'équilibre, on regarde statistiquement : soit $f(E, \dots)$ l'occupation moyenne

Cas des électrons à l'équilibre dans un cristal

- On garde les mêmes états stationnaires (interactions négligeables)
 - ▶ Chaque état (d'énergie E) occupé par 0 ou 1 électron (principe d'exclusion de Pauli, valable pour tous les fermions)
 - ▶ À l'équilibre, on regarde statistiquement : soit $f(E, \dots)$ l'occupation moyenne
- On montre : $f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - \mu}{k_B T}\right)}$ (distribution statistique de Fermi-Dirac)
 - ▶ Compris entre 0 et 1
 - ▶ Ne dépend que de E et de paramètres macroscopiques
 - ▶ $k_B T$ = énergie d'agitation thermique $\simeq 25 \cdot 10^{-3}$ eV à $T = 300$ K (définition de la température)
 - ▶ μ = potentiel chimique (en pratique : $\mu \simeq E_F = \lim_{T \rightarrow 0}(\mu) =$ niveau de Fermi)

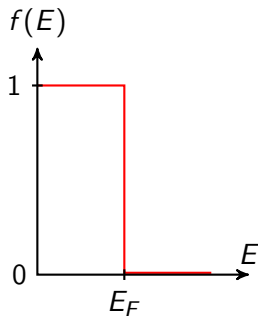
Cas des électrons à l'équilibre dans un cristal

- On garde les mêmes états stationnaires (interactions négligeables)
 - ▶ Chaque état (d'énergie E) occupé par 0 ou 1 électron (principe d'exclusion de Pauli, valable pour tous les fermions)
 - ▶ À l'équilibre, on regarde statistiquement : soit $f(E, \dots)$ l'occupation moyenne
- On montre : $f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - \mu}{k_B T}\right)}$ (distribution statistique de Fermi-Dirac)
 - ▶ Compris entre 0 et 1
 - ▶ Ne dépend que de E et de paramètres macroscopiques
 - ▶ $k_B T$ = énergie d'agitation thermique $\simeq 25 \cdot 10^{-3}$ eV à $T = 300$ K (définition de la température)
 - ▶ μ = potentiel chimique (en pratique : $\mu \simeq E_F = \lim_{T \rightarrow 0}(\mu) =$ niveau de Fermi)
- $f(E)$ est pour chaque état (pas pour chaque niveau E)
 - ▶ Pour compter les électrons d'énergie $\sim E$, on devra aussi compter les états, cf. la suite

Statistique de Fermi-Dirac : allure

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right)}$$

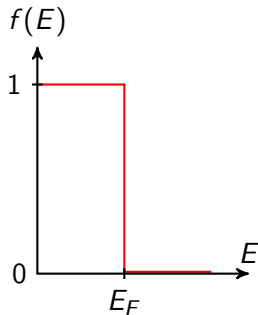
À $T = 0$ K :



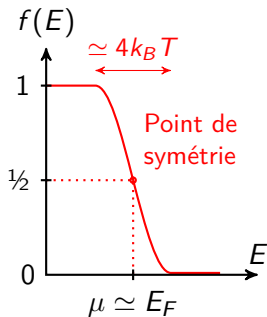
Statistique de Fermi-Dirac : allure

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right)}$$

À $T = 0$ K :



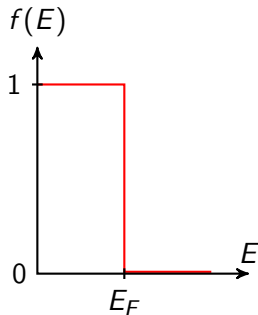
À $T > 0$ K :



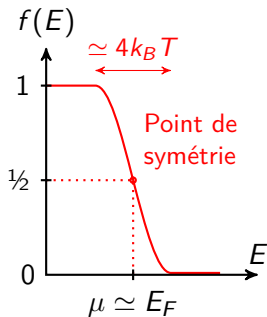
Statistique de Fermi-Dirac : allure

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right)}$$

À $T = 0$ K :



À $T > 0$ K :



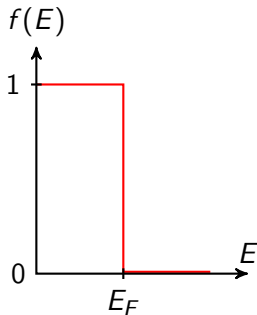
3 régimes d'approximation :

- Globalement : la marche d'escalier (comme si $T = 0$)
- Au-dessus de E_F :
- En-dessous de E_F :

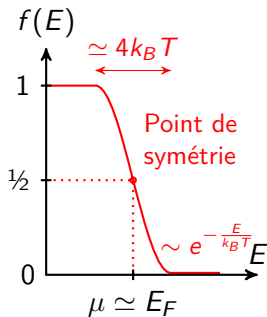
Statistique de Fermi-Dirac : allure

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right)}$$

À $T = 0$ K :



À $T > 0$ K :



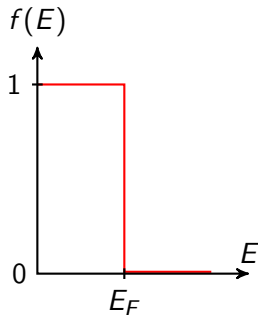
3 régimes d'approximation :

- Globalement : la marche d'escalier (comme si $T = 0$)
- Au-dessus de E_F :
 $f(E) \simeq \exp\left(-\frac{E - E_F}{k_B T}\right)$
Maxwell-Boltzmann = classique !
- En-dessous de E_F :

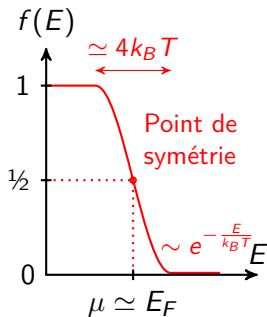
Statistique de Fermi-Dirac : allure

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right)}$$

À $T = 0$ K :



À $T > 0$ K :

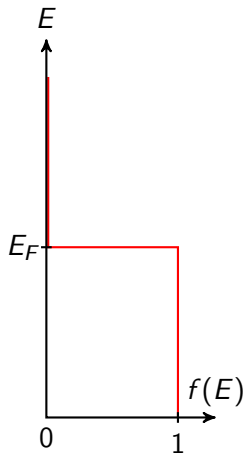


3 régimes d'approximation :

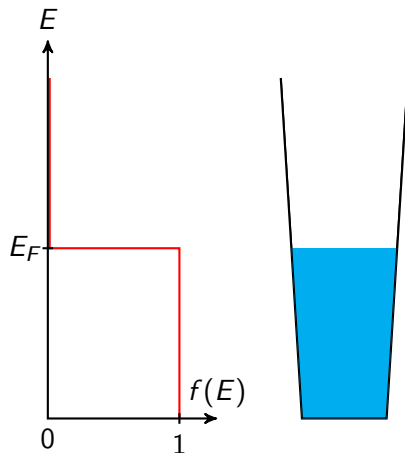
- Globalement : la marche d'escalier (comme si $T = 0$)
- Au-dessus de E_F :
 $f(E) \simeq \exp\left(-\frac{E - E_F}{k_B T}\right)$
Maxwell-Boltzmann = classique !
- En-dessous de E_F :
 $f(E) \simeq 1 - \exp\left(+\frac{E - E_F}{k_B T}\right)$
Les « trous » sont classiques !

Statistique de Fermi-Dirac : remplissage

■ Interprétation de Fermi-Dirac ?

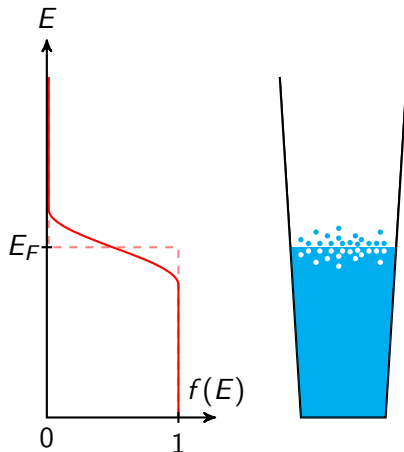


Statistique de Fermi-Dirac : remplissage



- Interprétation de Fermi-Dirac ?
- Remplissage d'un verre d'eau
 - L'eau va au fond jusqu'à épuisement du stock
 - E_F = surface, les états en-dessous sont remplis
 - Plus il y a d'électrons, plus E_F monte (comme l'eau dans le verre)

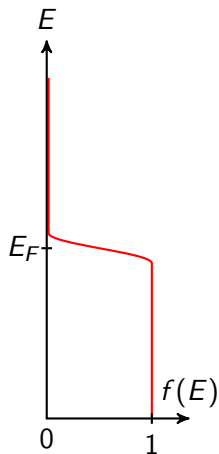
Statistique de Fermi-Dirac : remplissage



- Interprétation de Fermi-Dirac ?
- Remplissage d'un verre d'eau
 - ▶ L'eau va au fond jusqu'à épuisement du stock
 - ▶ E_F = surface, les états en-dessous sont remplis
 - ▶ Plus il y a d'électrons, plus E_F monte (comme l'eau dans le verre)
- Agitation thermique ?
 - ▶ $T = 0$: eau plate
 - ▶ $T > 0$: eau gazeuse, il y a des bulles sous la surface et des gouttelettes au-dessus

Statistique de Fermi-Dirac et bandes d'énergie

... ou comment compter les électrons

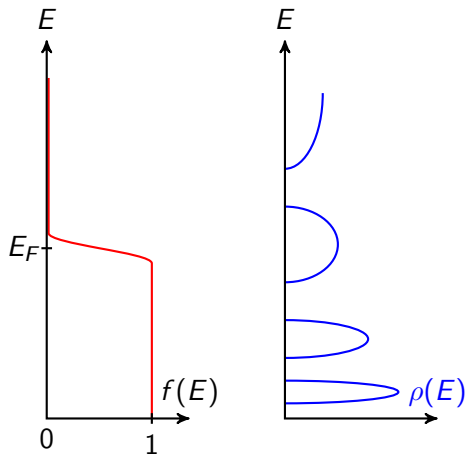


■ Et les bandes d'énergie ?

- ▶ $f(E)$ = occupation d'un état d'énergie E , encore faut-il qu'il existe (i. e. que la valeur de E soit possible)
- ▶ Combien y a-t-il vraiment d'électrons ayant $E \in [E_1; E_2]$?

Statistique de Fermi-Dirac et bandes d'énergie

... ou comment compter les électrons



■ Et les bandes d'énergie ?

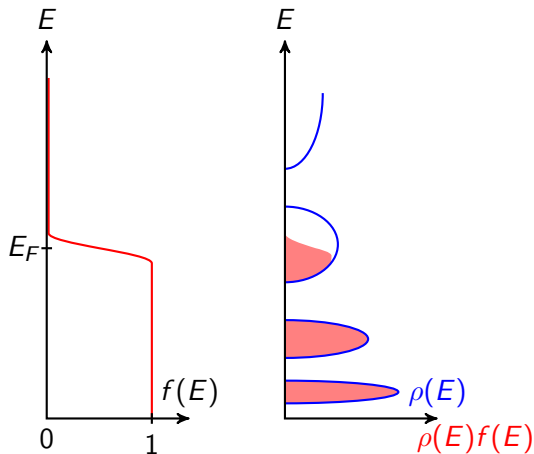
- ▶ $f(E)$ = occupation d'un état d'énergie E , encore faut-il qu'il existe (i. e. que la valeur de E soit possible)
- ▶ Combien y a-t-il vraiment d'électrons ayant $E \in [E_1; E_2]$?

■ Définition : **densité d'états** $\rho(E)$ telle que le nombre d'états d'énergie $\in [E; E + \delta E]$ soit $= \rho(E)\delta E$

- ▶ bandes interdites : $\rho(E) = 0$
- ▶ bandes permises : $\rho(E) > 0$

Statistique de Fermi-Dirac et bandes d'énergie

... ou comment compter les électrons



■ Et les bandes d'énergie ?

- ▶ $f(E)$ = occupation d'un état d'énergie E , encore faut-il qu'il existe (i. e. que la valeur de E soit possible)
- ▶ Combien y a-t-il vraiment d'électrons ayant $E \in [E_1; E_2]$?

■ Définition : **densité d'états** $\rho(E)$ telle que le nombre d'états d'énergie $\in [E; E + \delta E[$ soit $= \rho(E)\delta E$

- ▶ bandes interdites : $\rho(E) = 0$
- ▶ bandes permises : $\rho(E) > 0$

■ Il suffit alors d'intégrer sur E :

$$\int_{E_1}^{E_2} f(E)\rho(E)dE$$



Plan

Modélisation des électrons dans un cristal

Parenthèse cristallographique : empilement d'atomes ?

Un électron dans un cristal : bandes d'énergie

Beaucoup d'électrons dans un cristal : statistique de Fermi-Dirac

Électrons dans un cristal et conductivité électrique

Diagramme de bandes

Isolant ou conducteur ?

Semi-conducteurs

Porteurs : électrons et trous

Dopage

Loi d'action de masse, densité de porteurs

Composants électroniques : juxtaposition de dopages

Exemple : la jonction P-N

Comportement hors d'équilibre : la diode

Méthode du diagramme de bandes

Autres composants

Remplissage des bandes et conduction électrique

- Quelles sont les bandes qui participent à la conduction du matériau ?
 - ▶ les bandes pleines ?
 - ▶ les bandes vides ?
 - ▶ les bandes partiellement remplies ?

Remplissage des bandes et conduction électrique

- Quelles sont les bandes qui participent à la conduction du matériau ?
 - ▶ ~~les bandes pleines ?~~
 - ▶ ~~les bandes vides ?~~
 - ▶ les bandes partiellement remplies

Remplissage des bandes et conduction électrique

- Quelles sont les bandes qui participent à la conduction du matériau ?
 - ~~les bandes pleines ?~~
 - ~~les bandes vides ?~~
 - les bandes partiellement remplies
- Distribution de Fermi-Dirac → remplissage des bandes par le bas

Remplissage des bandes et conduction électrique

- Quelles sont les bandes qui participent à la conduction du matériau ?
 - ~~les bandes pleines ?~~
 - ~~les bandes vides ?~~
 - **les bandes partiellement remplies**
- Distribution de Fermi-Dirac → remplissage des bandes par le bas
- Que se passe-t-il pour la dernière bande qui contient des électrons ?
 - pleine ?
 - partiellement remplie ?
 - **C'est la question cruciale !**

Isolant ou conducteur ?

- Si la dernière bande qui contient des électrons est pleine à 0 K : **isolant ou semi-conducteur**
- Si la dernière bande est partiellement remplie à 0 K : **conducteur**

Isolant ou conducteur ?

- Si la dernière bande qui contient des électrons est pleine à 0 K : **isolant ou semi-conducteur**
- Si la dernière bande est partiellement remplie à 0 K : **conducteur**

Qu'est-ce qu'un semi-conducteur ? :

écart énergétique entre la dernière bande permise pleine et la première bande permise vide :

- Est-il « grand » ?
- Est-il « possible » pour un électron de le franchir ?
- D'où l'énergie pourrait-elle venir ?



Plan

Modélisation des électrons dans un cristal

Parenthèse cristallographique : empilement d'atomes ?

Un électron dans un cristal : bandes d'énergie

Beaucoup d'électrons dans un cristal : statistique de Fermi-Dirac

Électrons dans un cristal et conductivité électrique

Diagramme de bandes

Isolant ou conducteur ?

Semi-conducteurs

Porteurs : électrons et trous

Dopage

Loi d'action de masse, densité de porteurs

Composants électroniques : juxtaposition de dopages

Exemple : la jonction P-N

Comportement hors d'équilibre : la diode

Méthode du diagramme de bandes

Autres composants

Semi-conducteur : vocabulaire et notations

- Première bande permise vide à 0 K : **bande de conduction** (BC)
- Dernière bande permise pleine à 0 K : **bande de valence** (BV)
- Bande interdite qui les sépare : **gap**

Semi-conducteur : vocabulaire et notations

- Première bande permise vide à 0 K : **bande de conduction** (BC)
 - Énergie du bas de la bande de conduction E_c
 - Densité d'électrons dans la bande de conduction n
- Dernière bande permise pleine à 0 K : **bande de valence** (BV)
- Bande interdite qui les sépare : **gap**

Semi-conducteur : vocabulaire et notations

- Première bande permise vide à 0 K : **bande de conduction** (BC)
 - Énergie du bas de la bande de conduction E_c
 - Densité d'électrons dans la bande de conduction n
- Dernière bande permise pleine à 0 K : **bande de valence** (BV)
 - Énergie du haut de la bande de valence E_v
 - Densité de « trous » (états inoccupés) dans la bande de valence p
- Bande interdite qui les sépare : **gap**

Semi-conducteur : vocabulaire et notations

- Première bande permise vide à 0 K : **bande de conduction** (BC)
 - Énergie du bas de la bande de conduction E_c
 - Densité d'électrons dans la bande de conduction n
- Dernière bande permise pleine à 0 K : **bande de valence** (BV)
 - Énergie du haut de la bande de valence E_v
 - Densité de « trous » (états inoccupés) dans la bande de valence p
- Bande interdite qui les sépare : **gap**
 - Largeur du gap $E_g = E_c - E_v$

Porteurs : électrons et trous

Excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction :

- la bande de conduction n'est plus vide : elle participe à la conduction
 - ▶ électron de la bande de conduction = porteur de charge négative $-q$

Excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction :

- la bande de conduction n'est plus vide : elle participe à la conduction
 - ▶ électron de la bande de conduction = porteur de charge négative $-q$
- la bande de valence n'est plus pleine : elle participe à la conduction
 - ▶ électron absent de la bande de valence = **trou** = porteur d'une charge positive $+q$

Porteurs : électrons et trous

Excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction :

- la bande de conduction n'est plus vide : elle participe à la conduction
 - ▶ électron de la bande de conduction = porteur de charge négative $-q$
- la bande de valence n'est plus pleine : elle participe à la conduction
 - ▶ électron absent de la bande de valence = **trou** = porteur d'une charge positive $+q$

⇒ excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction = création de deux porteurs libres : **création d'une paire électron/trou**

Une autre question cruciale

- Dans un diagramme de bandes avec une bande de valence et une bande de conduction séparées par une bande interdite, où est le niveau de Fermi ?
 - ▶ dans la bande de valence ?
 - ▶ dans la bande de conduction ?

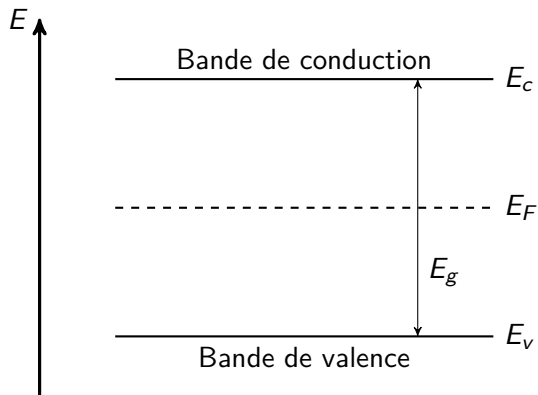
Une autre question cruciale

- Dans un diagramme de bandes avec une bande de valence et une bande de conduction séparées par une bande interdite, où est le niveau de Fermi ?
 - ▶ dans la bande de valence ?
 - ▶ dans la bande de conduction ?
 - ▶ (Indice / rappel : $f(E)$ a une symétrie autour du point $(E_F, \frac{1}{2})$)

Une autre question cruciale

- Dans un diagramme de bandes avec une bande de valence et une bande de conduction séparées par une bande interdite, où est le niveau de Fermi ?
 - ▶ ~~dans la bande de valence ?~~
 - ▶ ~~dans la bande de conduction ?~~
 - ▶ (Indice / rappel : $f(E)$ a une symétrie autour du point $(E_F, \frac{1}{2})$)
 - ▶ dans la bande interdite !

Diagramme de bandes



Pour un semi-conducteur donné, comment évaluer la densité de porteurs à température ambiante ?

De quoi pourrait dépendre la probabilité de création d'une paire électron-trou ?

- de la température T
- du gap E_g du semiconducteur considéré

Oui, mais cela en dépend comment ?

Quelques données

Semiconducteur	Gap (eV)	Densité de paires électron-trous n_i (m^{-3})
Si	1,12	10^{16}
Ge	0,66	10^{19}
AsGa	1,42	10^{12}

Quelques données

Semiconducteur	Gap (eV)	Densité de paires électron-trous n_i (m^{-3})
Si	1,12	10^{16}
Ge	0,66	10^{19}
AsGa	1,42	10^{12}

On démontrera plus loin que $n_i \propto \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$

Quelques données

Semiconducteur	Gap (eV)	Densité de paires électron-trous n_i (m^{-3})
Si	1,12	10^{16}
Ge	0,66	10^{19}
AsGa	1,42	10^{12}

On démontrera plus loin que $n_i \propto \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$

A quoi pourrait-on comparer ces densités de porteurs n_i ?

Sont-elles comparables à celles d'un métal ?

Quelques données

Semiconducteur	Gap (eV)	Densité de paires électron-trous n_i (m^{-3})
Si	1,12	10^{16}
Ge	0,66	10^{19}
AsGa	1,42	10^{12}

On démontrera plus loin que $n_i \propto \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$

A quoi pourrait-on comparer ces densités de porteurs n_i ?

Sont-elles comparables à celles d'un métal ?

Calcul d'ordre de grandeur de la densité de porteurs dans un métal

- \simeq nombre d'états dans la dernière bande (partiellement remplie)
- \simeq nombre d'atomes dans l'échantillon

$\simeq 10^{28} m^{-3}$ pour une maille de quelques Å



Dopage d'un semi-conducteur

Comment contrôler la densité de porteurs ?

En remplaçant des atomes de semiconducteur par des impuretés ou **dopants** qui n'ont pas la même valence.

Dopage d'un semi-conducteur

Comment contrôler la densité de porteurs ?

En remplaçant des atomes de semiconducteur par des impuretés ou **dopants** qui n'ont pas la même valence.

Comment les choisir ?

Exemple de semiconducteur : le silicium

- Configuration de la couche externe : $3s^2 3p^2$
- Valence : 4

Dopage d'un semi-conducteur

Comment contrôler la densité de porteurs ?

En remplaçant des atomes de semiconducteur par des impuretés ou **dopants** qui n'ont pas la même valence.

Comment les choisir ?

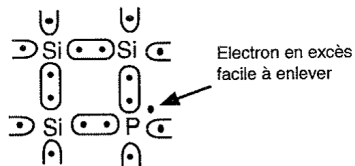
Exemple de semiconducteur : le silicium

- Configuration de la couche externe : $3s^2 3p^2$
- Valence : 4

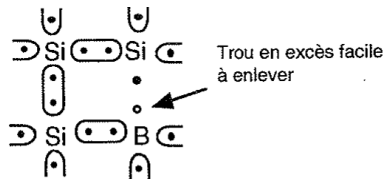
Examinons ses voisins dans la classification périodique :

B 3 5 Bore	C 4 6 Carbone	N 5 7 Azote
Al 3 13 Aluminium	Si 4 14 Silicium	P 5 15 Phosphore
Ga 3 31 Gallium	Ge 4 32 Germanium	As 5 33 Arsenic

Rôle de la valence des dopants

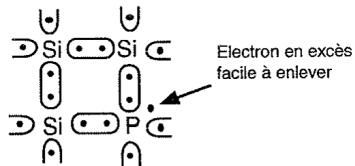


Dopage de type N

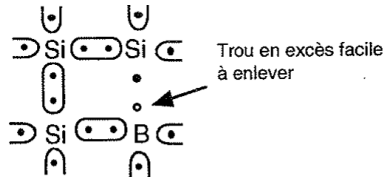


Dopage de type P

Rôle de la valence des dopants



Dopage de type N



Dopage de type P

- électron en excès, facile à enlever ?
- trou en excès, facile à enlever ?

Exemple de semiconducteur : le silicium (tétravalent)

- Dopage N : dopant pentavalent : 1 électron par atome de dopant « est en plus » : il ne peut pas participer à une liaison chimique avec un atome de silicium voisin ;

Exemple de semiconducteur : le silicium (tétravalent)

- Dopage N : dopant pentavalent : 1 électron par atome de dopant « est en plus » : il ne peut pas participer à une liaison chimique avec un atome de silicium voisin ;
- Dopage P : dopant trivalent : « il manque » 1 électron par atome de dopant pour former les liaisons chimiques avec les atomes de silicium voisins ;

A expliquer par rapport à la configuration des bandes d'énergie

Rôle de la valence des dopants

■ Dopage N :

- l'énergie à fournir à cet électron supplémentaire pour qu'il aille dans la bande de conduction est beaucoup plus faible que celle qu'il faut fournir à un électron qui participe à une liaison chimique

Rôle de la valence des dopants

■ Dopage N :

- ▶ l'énergie à fournir à cet électron supplémentaire pour qu'il aille dans la bande de conduction est beaucoup plus faible que celle qu'il faut fournir à un électron qui participe à une liaison chimique
- ▶ l'atome de dopant est donc facilement ionisé en « libérant » cet électron : on parle d'un **atome donneur**

Rôle de la valence des dopants

■ Dopage N :

- ▶ l'énergie à fournir à cet électron supplémentaire pour qu'il aille dans la bande de conduction est beaucoup plus faible que celle qu'il faut fournir à un électron qui participe à une liaison chimique
- ▶ l'atome de dopant est donc facilement ionisé en « libérant » cet électron : on parle d'un **atome donneur**

■ Dopage P :

- ▶ il faut fournir très peu d'énergie à un électron de la bande de valence pour qu'il vienne remplacer l'électron manquant en laissant un trou dans la bande de valence.

Rôle de la valence des dopants

■ Dopage N :

- ▶ l'énergie à fournir à cet électron supplémentaire pour qu'il aille dans la bande de conduction est beaucoup plus faible que celle qu'il faut fournir à un électron qui participe à une liaison chimique
- ▶ l'atome de dopant est donc facilement ionisé en « libérant » cet électron : on parle d'un **atome donneur**

■ Dopage P :

- ▶ il faut fournir très peu d'énergie à un électron de la bande de valence pour qu'il vienne remplacer l'électron manquant en laissant un trou dans la bande de valence.
- ▶ l'atome de dopant est donc facilement ionisé en « captant » un électron de la bande de valence : on parle d'un **atome accepteur**



Diagramme de bande d'un semiconducteur dopé

Qu'est-ce qui change dans le diagramme de bande en présence de dopage ?

Diagramme de bande d'un semiconducteur dopé

Qu'est-ce qui change dans le diagramme de bande en présence de dopage ?

Indice

On n'a plus égalité entre les nombres de porteurs dans la bande de valence et dans la bande de conduction

Diagramme de bande d'un semiconducteur dopé

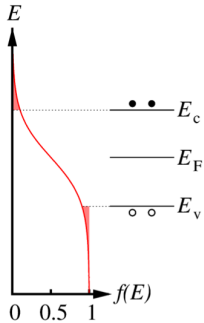
Qu'est-ce qui change dans le diagramme de bande en présence de dopage ?

Indice

On n'a plus égalité entre les nombres de porteurs dans la bande de valence et dans la bande de conduction

Le niveau de Fermi change !

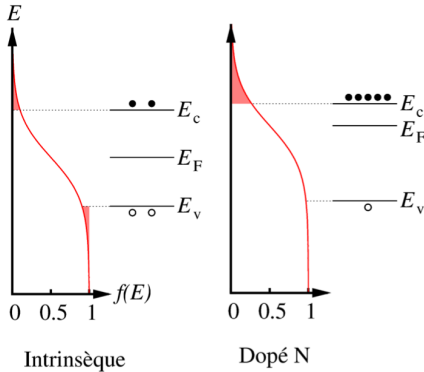
Diagramme de bande d'un semiconducteur dopé



Intrinsèque

Le niveau de Fermi est :

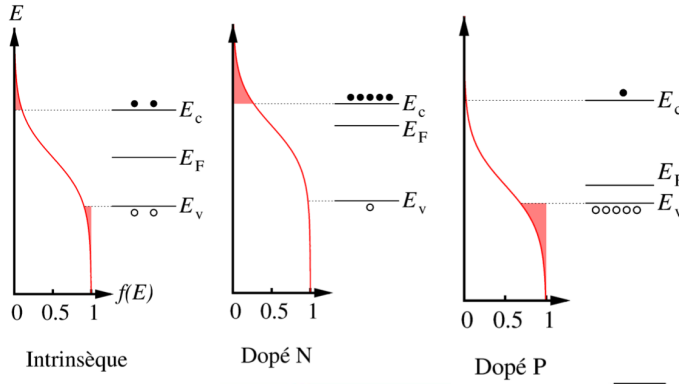
Diagramme de bande d'un semiconducteur dopé



Le niveau de Fermi est :

- plus proche de la bande de conduction en présence de dopage N

Diagramme de bande d'un semiconducteur dopé



Le niveau de Fermi est :

- plus proche de la bande de conduction en présence de dopage N
- plus proche de la bande de valence en présence de dopage P

Calcul : densité d'électrons dans la bande de conduction

- Rappel : pour compter les électrons dans une bande, on intègre $\rho(E)f(E)$ sur l'intervalle d'énergie :

$$n = \int_{E_c}^{\simeq \infty} \rho(E)f(E)dE \quad \text{avec : } f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right)}$$

- ▶ La BC démarre à E_c , s'arrête quelque part...
 - ▶ ... en pratique $f(E)$ décroît exponentiellement
- ⇒ ça revient au même d'intégrer jusqu'à $+\infty$, c'est plus simple

Calcul : densité d'électrons dans la bande de conduction

- Rappel : pour compter les électrons dans une bande, on intègre $\rho(E)f(E)$ sur l'intervalle d'énergie :

$$n = \int_{E_c}^{\infty} \rho(E)f(E)dE \quad \text{avec : } f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right)}$$

- ▶ La BC démarre à E_c , s'arrête quelque part...
- ▶ ... en pratique $f(E)$ décroît exponentiellement

⇒ ça revient au même d'intégrer jusqu'à $+\infty$, c'est plus simple

- Dans la bande de conduction, quelle approximation de $f(E)$?
 - ▶ Quelle position de E_F , que peut-on dire de $\frac{E-E_F}{k_B T}$?

Calcul : densité d'électrons dans la bande de conduction

- Rappel : pour compter les électrons dans une bande, on intègre $\rho(E)f(E)$ sur l'intervalle d'énergie :

$$n = \int_{E_c}^{\infty} \rho(E)f(E)dE \quad \text{avec : } f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E-E_F}{k_B T}\right)}$$

- ▶ La BC démarre à E_c , s'arrête quelque part...
- ▶ ... en pratique $f(E)$ décroît exponentiellement

⇒ ça revient au même d'intégrer jusqu'à $+\infty$, c'est plus simple

- Dans la bande de conduction, quelle approximation de $f(E)$?
 - ▶ Quelle position de E_F , que peut-on dire de $\frac{E-E_F}{k_B T}$? $\gg 1$
 - ▶ Maxwell-Boltzmann : $f(E) \simeq \exp\left(\frac{E_F-E}{k_B T}\right)$

Calcul : densité d'électrons dans la bande de conduction

$$n = \int_{E_c}^{\infty} \rho(E) \exp\left(\frac{E_F - E}{k_B T}\right) dE$$
$$n = \exp\left(\frac{E_F - E_c}{k_B T}\right) \int_{E_c}^{\infty} \rho(E) \exp\left(\frac{E_c - E}{k_B T}\right) dE$$

Calcul : densité d'électrons dans la bande de conduction

$$n = \int_{E_c}^{\infty} \rho(E) \exp\left(\frac{E_F - E}{k_B T}\right) dE$$
$$n = \exp\left(\frac{E_F - E_c}{k_B T}\right) \int_{E_c}^{\infty} \rho(E) \exp\left(\frac{E_c - E}{k_B T}\right) dE$$

Soit $N_C = \int_{E_c}^{\infty} \rho(E) \exp\left(\frac{E_c - E}{k_B T}\right) dE$ une grandeur caractéristique de la bande de conduction du semi-conducteur considéré

Densité d'électrons dans la bande de conduction

$$\text{On a donc : } n = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_c}{k_B T}\right)$$

Calcul : densité de trous dans la bande de valence

- Rappel : trou dans la BV = état inoccupé, absence d'électron dans cet état
 - Comment les compter ?

Calcul : densité de trous dans la bande de valence

- Rappel : trou dans la BV = état inoccupé, absence d'électron dans cet état
 - Comment les compter ?
 - Comme les électrons mais avec $1 - f(E)$!

$$p = \int_{-\infty}^{E_v} \rho(E)(1 - f(E))dE$$

Calcul : densité de trous dans la bande de valence

- Rappel : trou dans la BV = état inoccupé, absence d'électron dans cet état
 - Comment les compter ?
 - Comme les électrons mais avec $1 - f(E)$!

$$p = \int_{\simeq -\infty}^{E_v} \rho(E)(1 - f(E))dE$$

- Dans la bande de valence, quelle approximation de $1 - f(E)$?
 - Quelle position de E_F , que peut-on dire de $\frac{E - E_F}{k_B T}$?

Calcul : densité de trous dans la bande de valence

- Rappel : trou dans la BV = état inoccupé, absence d'électron dans cet état
 - ▶ Comment les compter ?
 - ▶ Comme les électrons mais avec $1 - f(E)$!

$$p = \int_{\simeq -\infty}^{E_v} \rho(E)(1 - f(E))dE$$

- Dans la bande de valence, quelle approximation de $1 - f(E)$?
 - ▶ Quelle position de E_F , que peut-on dire de $\frac{E - E_F}{k_B T}$?
 - ▶ Valeur absolue $\gg 1$, mais signe < 0 car $E < E_v < E_F$
 - ▶ Maxwell-Boltzmann inversé : $1 - f(E) \simeq \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right)$

Calcul : densité de trous dans la bande de valence

$$\begin{aligned} p &= \int_{-\infty}^{E_v} \rho(E) \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right) dE \\ &= \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right) \int_{-\infty}^{E_v} \rho(E) \exp\left(\frac{E - E_v}{k_B T}\right) dE \end{aligned}$$

Calcul : densité de trous dans la bande de valence

$$\begin{aligned} p &= \int_{-\infty}^{E_v} \rho(E) \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right) dE \\ &= \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right) \int_{-\infty}^{E_v} \rho(E) \exp\left(\frac{E - E_v}{k_B T}\right) dE \end{aligned}$$

Soit $N_V = \int_{-\infty}^{E_v} \rho(E) \exp\left(\frac{E - E_v}{k_B T}\right) dE$ une grandeur caractéristique de la bande de valence du semi-conducteur considéré

Densité de trous dans la bande de valence

$$\text{On a donc : } p = N_V \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right)$$

Loi d'action de masse

Calcul du produit np

$$np = N_C N_V \exp\left(\frac{E_v - E_c}{k_B T}\right) = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right)$$

Ne dépend pas de la position du niveau de Fermi !

Loi d'action de masse

Calcul du produit np

$$np = N_C N_V \exp\left(\frac{E_v - E_c}{k_B T}\right) = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right)$$

Ne dépend pas de la position du niveau de Fermi !

⇒ Ne dépend pas du dopage !

Loi d'action de masse

Calcul du produit np

$$np = N_C N_V \exp\left(\frac{E_v - E_c}{k_B T}\right) = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right)$$

Ne dépend pas de la position du niveau de Fermi !

⇒ Ne dépend pas du dopage !

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

Calcul de la position du niveau de Fermi

$$p = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{k_B T}\right)$$

$$n = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_C}{k_B T}\right)$$

Calcul de la position du niveau de Fermi

$$p = N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{k_B T}\right)$$

$$n = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_C}{k_B T}\right)$$

d'où

$$E_F = E_V - k_B T \ln \frac{p}{N_V}$$

$$E_F = E_C + k_B T \ln \frac{n}{N_C}$$

Calcul de la position du niveau de Fermi

$$p = N_V \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right)$$

$$n = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_c}{k_B T}\right)$$

d'où

$$E_F = E_v - k_B T \ln \frac{p}{N_V}$$

$$E_F = E_c + k_B T \ln \frac{n}{N_C}$$

Pour un semiconducteur intrinsèque $n = p = n_i$

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{k_B T}{2} \ln \frac{N_V}{N_C}$$

Calcul de la position du niveau de Fermi

$$p = N_V \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right)$$

$$n = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_c}{k_B T}\right)$$

d'où

$$E_F = E_v - k_B T \ln \frac{p}{N_V}$$

$$E_F = E_c + k_B T \ln \frac{n}{N_C}$$

Pour un semiconducteur intrinsèque $n = p = n_i$

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{k_B T}{2} \ln \frac{N_V}{N_C}$$

Le niveau de Fermi est pratiquement au milieu de la bande interdite !

Calcul de la position du niveau de Fermi dans un semi-conducteur dopé

- Dopage N, densité de dopants N_D

$$n = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_c}{k_B T}\right) = N_D$$

$$p = N_V \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right) = \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$\text{d'où } E_F = E_c + k_B T \ln \frac{N_D}{N_C}$$

Calcul de la position du niveau de Fermi dans un semi-conducteur dopé

- Dopage N, densité de dopants N_D

$$n = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_c}{k_B T}\right) = N_D$$

$$p = N_V \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right) = \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$\text{d'où } E_F = E_c + k_B T \ln \frac{N_D}{N_C}$$

- Dopage P, densité de dopants N_A

$$p = N_V \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right) = N_A$$

$$n = N_C \exp\left(\frac{E_F - E_c}{k_B T}\right) = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$\text{d'où } E_F = E_v - k_B T \ln \frac{N_A}{N_V}$$

Mouvements de porteurs

On s'intéresse à la dynamique des porteurs :

$\vec{v} = \mu \vec{E}$ où μ est la mobilité, \vec{v} la vitesse et \vec{E} le champ électrique

Modèle de Drude

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*}$$

où q est la charge élémentaire, τ le temps moyen entre deux collisions et m^* la masse effective de la particule.

Remarque : dans un semiconducteur, la mobilité des électrons est supérieure à celle des trous (dans le silicium, la mobilité des électrons est 3 fois plus forte que celle des trous).



Mouvements de porteurs

Deux grandes contributions aux mouvements de porteurs :

Mouvements de porteurs

Deux grandes contributions aux mouvements de porteurs :

- La conduction (dérive dans un champ électrique) :

$$\vec{J}_{c,n} = -qn\mu_n\vec{E}$$

$$\vec{J}_{c,p} = qp\mu_p\vec{E}$$

où \vec{J} est la densité de courant n la densité d'électrons et p la densité de trous

Mouvements de porteurs

Deux grandes contributions aux mouvements de porteurs :

- La conduction (dérive dans un champ électrique) :

$$\vec{J}_{c,n} = -qn\mu_n\vec{E}$$

$$\vec{J}_{c,p} = qp\mu_p\vec{E}$$

où \vec{J} est la densité de courant n la densité d'électrons et p la densité de trous

- La diffusion (phénomène thermique) :

$$\vec{J}_{d,n} = qD_n\text{grad}n$$

$$\vec{J}_{d,p} = -qD_p\text{grad}p$$

$$\text{où } D = \frac{\mu k_B T}{q}$$



Conclusion de cette partie

Nous avons tous les outils :

- diagramme de bande
- densités de porteurs
- courants

pour comprendre le comportement d'un composant semi-conducteur.

Conclusion de cette partie

Nous avons tous les outils :

- diagramme de bande
- densités de porteurs
- courants

pour comprendre le comportement d'un composant semi-conducteur.

Quelles seront les conditions /équations pour exprimer l'équilibre ?

Conclusion de cette partie

Nous avons tous les outils :

- diagramme de bande
- densités de porteurs
- courants

pour comprendre le comportement d'un composant semi-conducteur.

Quelles seront les conditions /équations pour exprimer l'équilibre ?

- alignement des niveaux de Fermi quand il y a échange de particules
- nullité des courants

Conclusion de cette partie

Nous avons tous les outils :

- diagramme de bande
- densités de porteurs
- courants

pour comprendre le comportement d'un composant semi-conducteur.

Quelles seront les conditions /équations pour exprimer l'équilibre ?

- alignement des niveaux de Fermi quand il y a échange de particules
- nullité des courants

Ne pas oublier la neutralité électrique !

Plan

Modélisation des électrons dans un cristal

Parenthèse cristallographique : empilement d'atomes ?

Un électron dans un cristal : bandes d'énergie

Beaucoup d'électrons dans un cristal : statistique de Fermi-Dirac

Électrons dans un cristal et conductivité électrique

Diagramme de bandes

Isolant ou conducteur ?

Semi-conducteurs

Porteurs : électrons et trous

Dopage

Loi d'action de masse, densité de porteurs

Composants électroniques : juxtaposition de dopages

Exemple : la jonction P-N

Comportement hors d'équilibre : la diode

Méthode du diagramme de bandes

Autres composants



Composants électroniques

- Qu'est-ce qu'un composant électronique ?

Composants électroniques

- Qu'est-ce qu'un composant électronique ?
 - ▶ Essentiellement, silicium dopé
 - ▶ Différentes zones de dopages différents
 - ▶ Accessoirement : électrodes métal, zones isolantes SiO_2 ...

Composants électroniques

- Qu'est-ce qu'un composant électronique ?
 - ▶ Essentiellement, silicium dopé
 - ▶ Différentes zones de dopages différents
 - ▶ Accessoirement : électrodes métal, zones isolantes SiO_2 ...
- Comment modéliser ?
 - ▶ Les différentes zones sont suffisamment larges pour appliquer les modèles vus ci-dessus indépendamment à l'intérieur de chaque zone (Exception : puits quantiques. Voir la suite en 2A/3A.)
 - ▶ Que se passe-t-il aux interfaces entre les zones ?

Composants électroniques

- Qu'est-ce qu'un composant électronique ?
 - ▶ Essentiellement, silicium dopé
 - ▶ Différentes zones de dopages différents
 - ▶ Accessoirement : électrodes métal, zones isolantes SiO_2 ...
- Comment modéliser ?
 - ▶ Les différentes zones sont suffisamment larges pour appliquer les modèles vus ci-dessus indépendamment à l'intérieur de chaque zone (Exception : puits quantiques. Voir la suite en 2A/3A.)
 - ▶ Que se passe-t-il aux interfaces entre les zones ?
- Les électrons (et les trous) « sont classiques » (à condition d'utiliser la masse effective).
 - ▶ se déplacent librement aux endroits accessibles
 - ▶ du moment qu'ils ont l'énergie nécessaire
 - ▶ diffusent selon le gradient de densité
 - ▶ suivent le potentiel / champ électrique

Composants électroniques (suite)

- Que se passe-t-il aux interfaces entre les zones ?
 - Densités différentes d'électrons et trous \Rightarrow diffusion

Composants électroniques (suite)

- Que se passe-t-il aux interfaces entre les zones ?
 - ▶ Densités différentes d'électrons et trous \Rightarrow diffusion
- Déplacements de porteurs \Rightarrow déplacement de charges
 - ▶ Rappel : un semi-conducteur, même dopé, est neutre
 - ▶ Électrons et trous : porteurs (mobiles)
 - ▶ Dopants ionisés : charges fixes, équilibrées par les charges des porteurs
 - ▶ Déplacements de porteurs \Rightarrow création de zones chargées

Composants électroniques (suite)

- Electrostatique : zones chargées \Rightarrow potentiel électrique

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon}$$
$$\vec{E}(x) = -\text{grad} V(x)$$

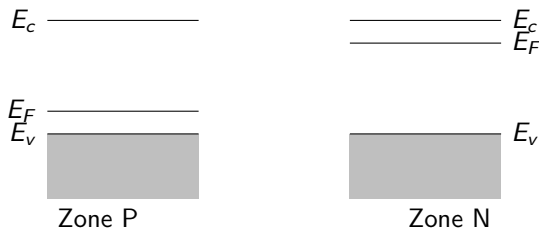
où ϵ est la constante diélectrique du matériau

- $-qV$ s'ajoute à l'énergie potentielle provenant des atomes
- \Rightarrow décale tous les niveaux d'énergie
- \Rightarrow décalage des bandes

\Rightarrow Outil principal = diagramme de bandes

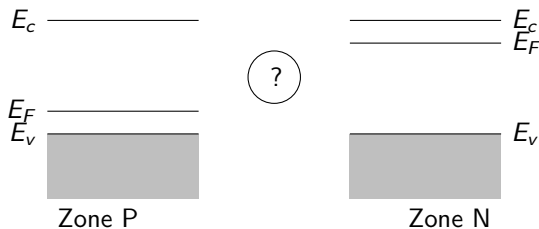
Exemple de composant : jonction P-N

- Juxtaposition simple : une zone dopée P + une dopée N
 - ▶ Dopants accepteurs côté P, densité $N_A \gg n_i$
 - ▶ Dopants donneurs côté N, densité $N_D \gg n_i$
 - ▶ des porteurs mobiles qui peuvent circuler entre les deux zones



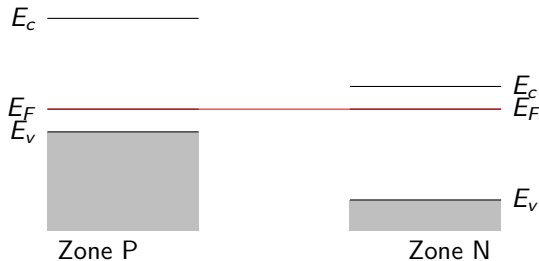
Exemple de composant : jonction P-N

- Juxtaposition simple : une zone dopée P + une dopée N
 - ▶ Dopants accepteurs côté P, densité $N_A \gg n_i$
 - ▶ Dopants donneurs côté N, densité $N_D \gg n_i$
 - ▶ des porteurs mobiles qui peuvent circuler entre les deux zones
- Comment raccorder les diagrammes de bandes ?



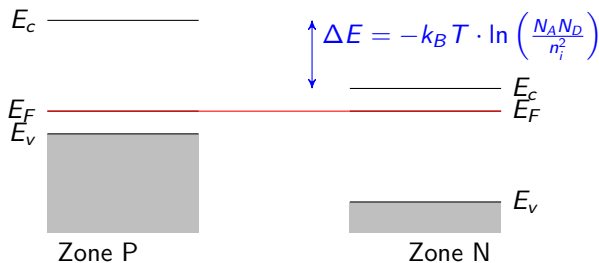
Exemple de composant : jonction P-N

- Juxtaposition simple : une zone dopée P + une dopée N
 - Dopants accepteurs côté P, densité $N_A \gg n_i$
 - Dopants donneurs côté N, densité $N_D \gg n_i$
 - des porteurs mobiles qui peuvent circuler entre les deux zones
- Comment raccorder les diagrammes de bandes ?
 - Matériau à l'équilibre : E_F identique



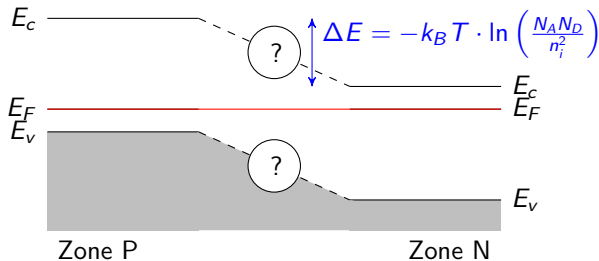
Exemple de composant : jonction P-N

- Juxtaposition simple : une zone dopée P + une dopée N
 - Dopants accepteurs côté P, densité $N_A \gg n_i$
 - Dopants donneurs côté N, densité $N_D \gg n_i$
 - des porteurs mobiles qui peuvent circuler entre les deux zones
- Comment raccorder les diagrammes de bandes ?
 - Matériau à l'équilibre : E_F identique

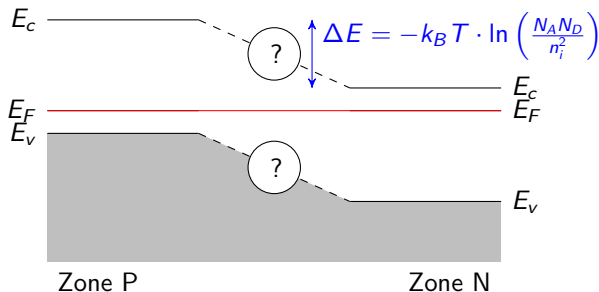


Exemple de composant : jonction P-N

- Juxtaposition simple : une zone dopée P + une dopée N
 - ▶ Dopants accepteurs côté P, densité $N_A \gg n_i$
 - ▶ Dopants donneurs côté N, densité $N_D \gg n_i$
 - ▶ des porteurs mobiles qui peuvent circuler entre les deux zones
- Comment raccorder les diagrammes de bandes ?
 - ▶ Matériau à l'équilibre : E_F identique
 - ▶ Et à la jonction ?



Densité de charges dans la zone de transition



Hypothèse : les densités de porteurs libres n et p diminuent de façon abrupte

- Justification : dès que E_c et E_v s'éloignent de E_F , $\exp\left(\frac{E_F - E_c}{k_B T}\right)$ et $\exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right)$ « décrochent »
- Donc, sur tout le raccordement : $p \ll N_A$ et $n \ll N_D$
- (Les électrons et trous ont diffusé et se sont annihilés)

Densité de charges dans la zone de transition

$p \ll N_A$ et $n \ll N_D$:

pratiquement plus de porteurs libres dans cette zone mais il reste les dopants ionisés

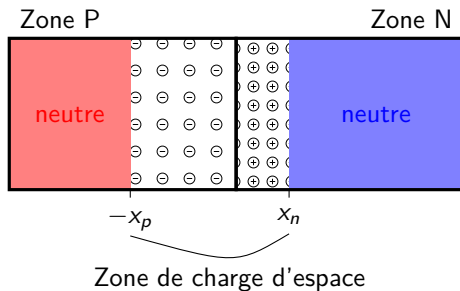
- Rappel : un semi-conducteur, même dopé, est neutre
- Si n et p ont chuté, les ions de dopants forment une zone chargée

Densité de charges dans la zone de transition

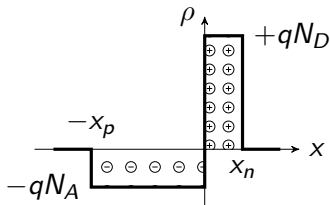
$p \ll N_A$ et $n \ll N_D$:

pratiquement plus de porteurs libres dans cette zone mais il reste les dopants ionisés

- Rappel : un semi-conducteur, même dopé, est neutre
- Si n et p ont chuté, les ions de dopants forment une zone chargée



Charges, champ, et potentiel électrique



Neutralité :
 $qN_A x_p = qN_D x_n$

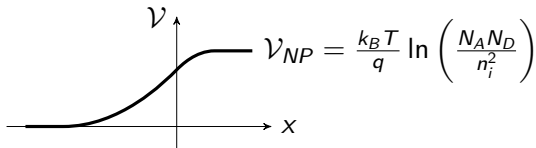
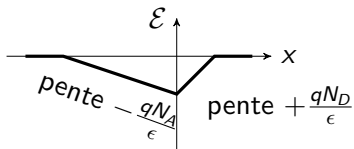
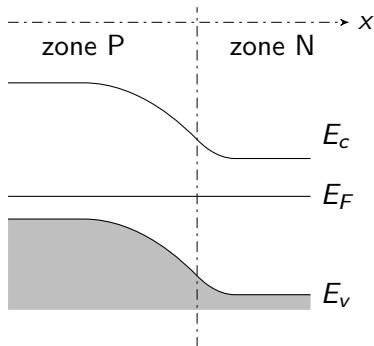


Diagramme de bandes de la jonction P-N

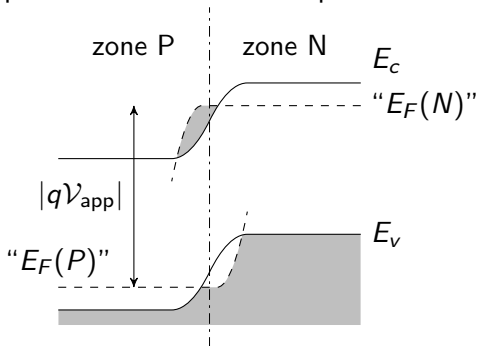


Bilan de courant dans la jonction P-N

- Deux phénomènes physiques qui génèrent un courant :
 - ▶ Diffusion : électrons et trous migrent d'une zone à l'autre
 - ▶ Conduction : on a créé un champ électrique \Rightarrow déplacement des porteurs
 - ▶ À l'équilibre les deux se compensent

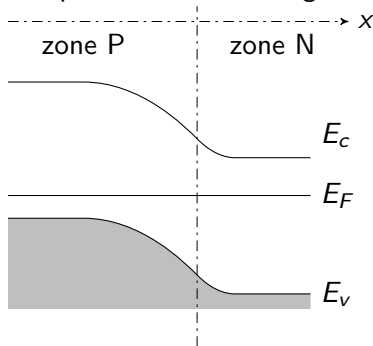
Comportement électrique de la jonction P-N

- On applique une tension \mathcal{V}_{app}
 - ▶ Problème : si le courant passe, on est hors d'équilibre
 - ▶ \Rightarrow stricto sensu, Fermi-Dirac ne s'applique plus !
 - ▶ On considère qu'on est localement à l'équilibre loin de la jonction



Comportement électrique de la jonction P-N

- On applique une tension \mathcal{V}_{app}
 - Si elle est positive, elle fait « descendre » les bandes du côté P par rapport au côté N, ce qui favorise le passage de courant
 - Si elle est négative, elle fait monter les bandes du côté P par rapport au côté N, ce qui augmente la barrière de potentiel, la zone de transition chargée mais dépeuplée de ses porteurs libres s'élargit et le composant est isolant.



Mouvements de porteurs

- Dans chaque matériau, à partir de la connaissance du dopage, identifier les porteurs majoritaires et positionner E_F
 - ▶ par rapport à E_c et E_v s'il s'agit d'un semiconducteur
 - ▶ par rapport à un niveau de référence, s'il s'agit d'un métal (p. ex. énergie du vide = énergie pour faire sortir l'électron du matériau)

Méthode du diagramme de bandes

Mouvements de porteurs

- Dans chaque matériau, à partir de la connaissance du dopage, identifier les porteurs majoritaires et positionner E_F
 - ▶ par rapport à E_c et E_v s'il s'agit d'un semiconducteur
 - ▶ par rapport à un niveau de référence, s'il s'agit d'un métal (p. ex. énergie du vide = énergie pour faire sortir l'électron du matériau)
- Aux interfaces : s'il y a possibilité de circulation de porteurs (contact électrique), l'équilibre se traduit par l'alignement des E_F :

Méthode du diagramme de bandes

Mouvements de porteurs

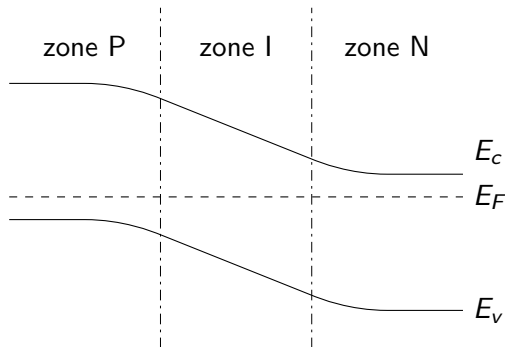
- Dans chaque matériau, à partir de la connaissance du dopage, identifier les porteurs majoritaires et positionner E_F
 - ▶ par rapport à E_c et E_v s'il s'agit d'un semiconducteur
 - ▶ par rapport à un niveau de référence, s'il s'agit d'un métal (p. ex. énergie du vide = énergie pour faire sortir l'électron du matériau)
- Aux interfaces : s'il y a possibilité de circulation de porteurs (contact électrique), l'équilibre se traduit par l'alignement des E_F :
Décrire les mouvements de porteurs qui vont permettre d'arriver à l'équilibre et leurs conséquences sur la répartition des charges dans le composant

Méthode du diagramme de bandes

Déterminer dans les différentes zones la densité de charge $\rho(x)$ pour en déduire l'allure du potentiel $\mathcal{V}(x)$

- Si une zone contient des porteurs, elle est conductrice donc équipotentielle
- Si une zone est dépeuplée de ses porteurs, on peut avoir une charge fixe ρ des dopants ionisés
 - ▶ Si dans une zone $\rho = 0$, $\mathcal{V} = \text{linéaire}$
 - ▶ Si dans une zone ρ est uniforme, $\mathcal{V} = \text{parabolique}$
- Les raccords des bandes d'énergie électroniques dans les zones de transition ont la forme de $-q\mathcal{V}(x)$

Diagramme de bandes de la jonction P-I-N



Transistor MOS

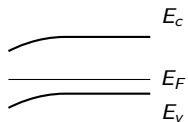
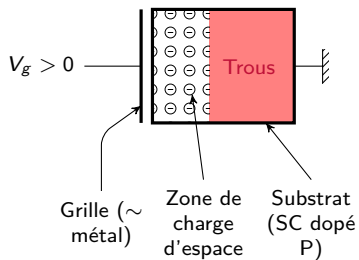


Diagramme de bandes

Transistor MOS

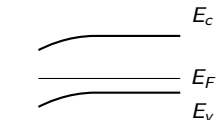
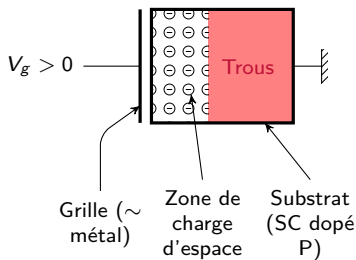


Diagramme de bandes

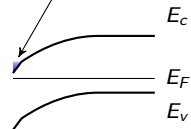
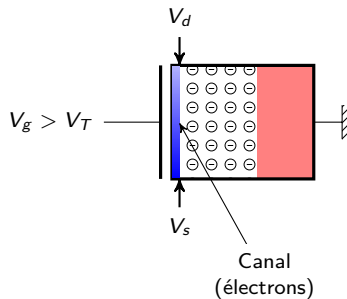


Diagramme de bandes

À l'aide de tous les outils mis en place ici, au-delà de la diode PN, on peut modéliser d'autres composants (cf. TD) :

- le transistor MOS
- la diode PIN (typique → photodétecteur)
- la diode laser