

Résumé de cours M1 Microélectronique

Module : Physique des composants semi-conducteurs 1

Prof. Abdelhamid BENHAYA

Directeur du Laboratoire d'Electronique Avancée
Responsable Salle Blanche

Département d'Electronique
Faculté de Technologie
Université Batna 2

<https://youtu.be/A76ZXk72bgo>

Domaines d'intérêt:

Technologie des semi-conducteurs
(Matériaux et dispositifs photovoltaïques)

e-mail: a.benhaya@univ-batna2.dz
benhaya_abdelhamid@yahoo.fr

Tel: +213 (0)7 73 87 37 84

BIBLIOGRAPHIE

Langue Anglaise

1. Marius Grundmann, The Physics of Semiconductors, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
2. S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, JOHN WILEY & SONS, 2007.
3. <http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/contents.htm>

Langue Française

1. A. Vapaille et R. Castagné, Dispositifs et circuits semi-conducteurs, Physique et technologie, Dunod, 1987.
2. CHRISTIAN ET HELENE NGÖ, Introduction à la physique des semi-conducteurs, Dunod, 1998.
3. H. MATHIEU, physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Dunod, 2001.
4. <https://www.polytech-lille.fr/cours-atome-circuit-integre/>
5. <http://koeniguer.perso.cegetel.net/ips/ips.html>

Physique des Semi-conducteurs

Plan de l'exposé

1^{ère} Partie:

Semi-conducteurs à l'équilibre

2^{ème} Partie

Semi-conducteurs hors équilibre

1^{ère} Partie

Semi-conducteurs à l'Equilibre

Définition

Un semi-conducteur à l'équilibre thermodynamique, correspond au cas d'un semi-conducteur non soumis à aucune interaction avec son environnement (polarisation électrique, rayonnement,.....).

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Classification des matériaux selon leur résistivité électrique

Selon la résistivité électrique, les matériaux peuvent être classés en trois catégories :

- Les métaux : $\rho \approx 10^{-8} \Omega.m$;
- Les semi-conducteurs : $10^{-5} < \rho < 10^5 \Omega.m$;
- Les isolants : $\rho \geq 10^6 \Omega.m$.

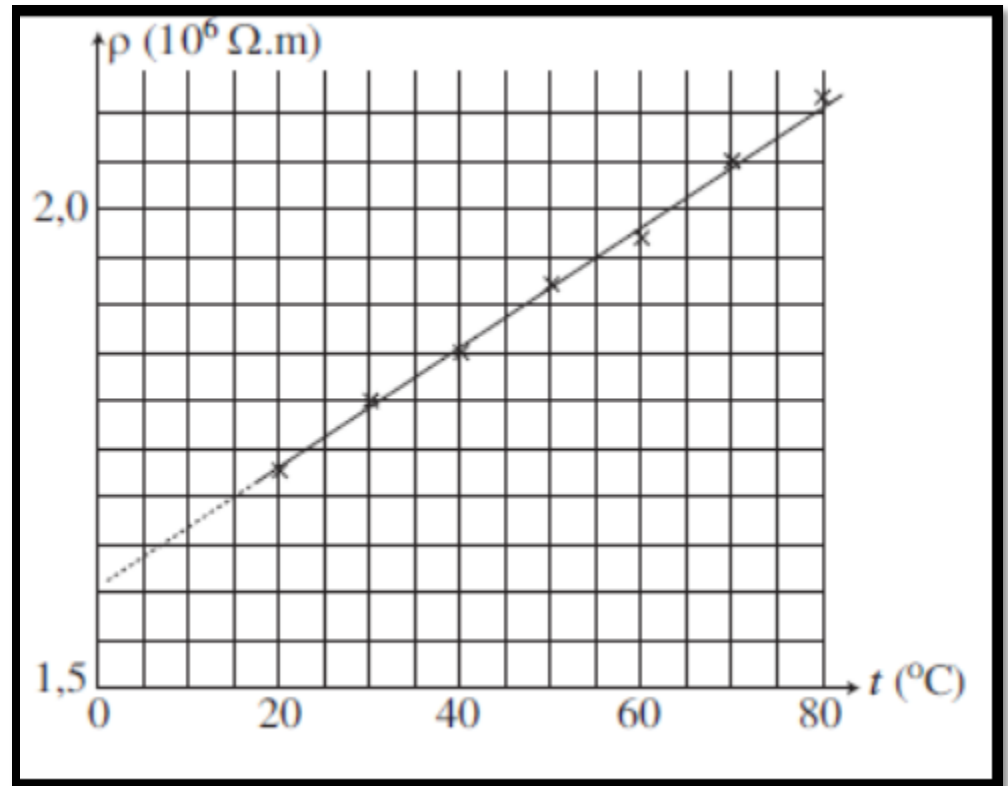
Résistivité de quelques matériaux

Métal	Résistivité à 300 K ($\Omega \cdot m$)
Argent	16×10^{-9}
Cuivre	17×10^{-9}
Or	22×10^{-9}
Aluminium	28×10^{-9}
Platine	111×10^{-9}
Etain	120×10^{-9}
Non métal	Résistivité à 300 K ($\Omega \cdot m$)
Carbone	40×10^{-6}
Isolant	Résistivité ($\Omega \cdot m$)
Eau pure	$1,8 \times 10^5$
Verre	10^{17}
Polystyrène	10^{20}

Courbes d'évolution de la résistivité en fonction de la température

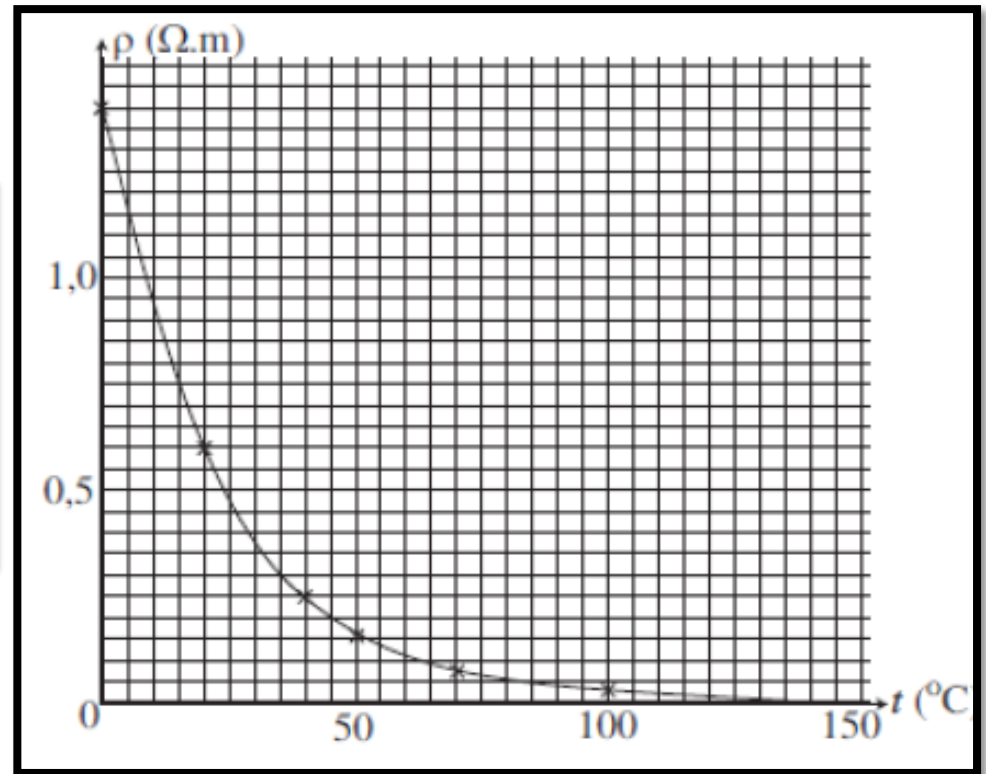
Pour **un métal**,
la résistivité **croît**
linéairement avec
la température

N.B.: Pour **un alliage**, ρ
est **plus forte** que celle
des **métaux** qui
le **constituent**



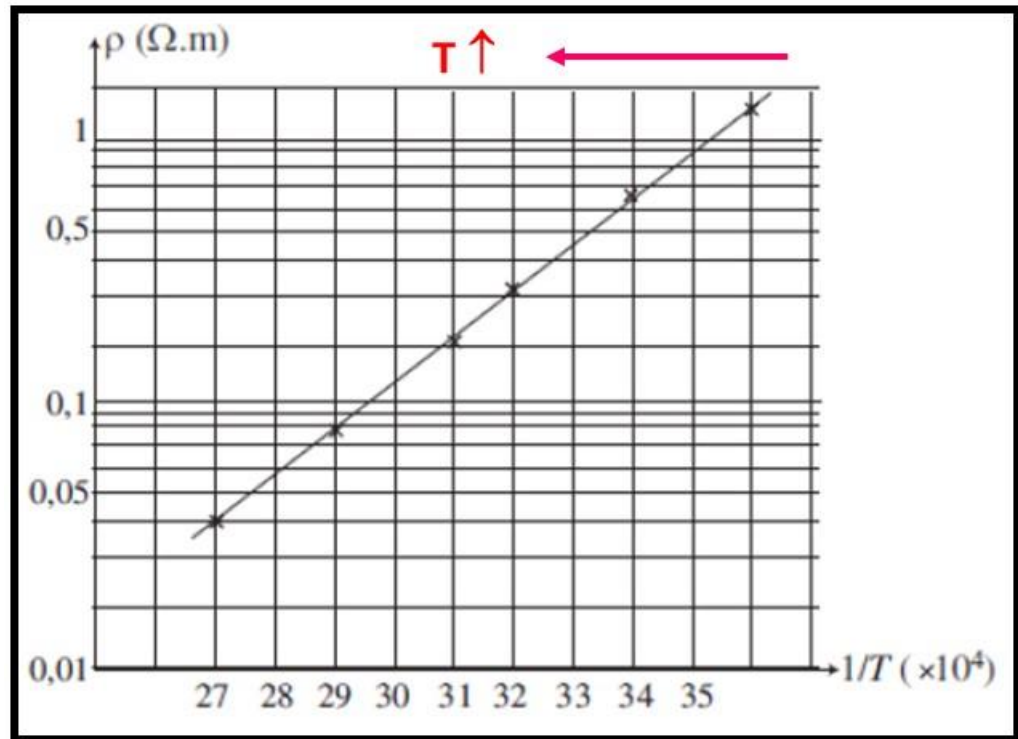
Courbes d'évolution de la résistivité en fonction de la température

Pour **un semi-conducteur**,
la résistivité **décroit** avec
la température



Courbes d'évolution de la résistivité en fonction de la température

Modèle linéaire en
 $\ln(\rho) = a + b/T$
Pour un semi-conducteur



Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Différents types de semi-conducteurs

- **2.1. Semi-conducteur intrinsèque:** C'est le semi-conducteur **non dopé** i.e. sans impuretés et sans défauts.
- **2.2. Semi-conducteur extrinsèque:** C'est le semi-conducteur **dopé** i.e. avec impuretés et défauts.
- **2.3. Semi-conducteur homogène:** C'est le semi-conducteur dont le matériau est **intrinsèque** (cristal parfait sans impuretés ni défauts) ou **extrinsèque homogène** (dopé uniformément).
- **2.4. Semi-conducteur inhomogène:** C'est le semi-conducteur qui **contient des impuretés ou des défauts** ou le semi-conducteur dont **le dopage est non uniforme**.
- **2.5. Semi-conducteur simple:** C'est le semi-conducteur constitué **d'un seul type d'atomes** (Si, Ge, C,...)
- **2.6. Semi-conducteur composé:** C'est le semi-conducteur constitué de plusieurs types d'atomes et on peut avoir des composés : **Binaires** (GaAs, GaP, InSb,...); **Ternaires** ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}, \dots$); **Quaternaires** ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}, \dots$).

Stop!
Rappel



Densité de charge

Pour faciliter la compréhension de la notion de densité d'états, on va rappeler la notion de densité de charge abordée en électrostatique

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Densité de charge

La **densité de charge électrique** désigne la quantité de charge électrique par unité d'espace (longueur, surface ou volume).

Selon que l'on considère un problème à 1, 2 ou 3 dimensions, c'est-à-dire une ligne, une surface ou un volume, on parlera de:

Densité linéique: $\lambda = dq/d\ell$ (C/m)

Densité surfacique: $\sigma = dq/ds$ (C/m²)

Densité volumique: $\rho = dq/dV$ (C/m³)

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Densité d'états

C'est une grandeur très importante dans le domaine des semi-conducteurs, car elle intervient dans le calcul de nombreuses grandeurs physiques, notamment la concentration des porteurs de charge.

- Cette grandeur est définie comme étant le nombre de micro-états par unité de volume (pour un système 3D) et par unité d'énergie ($\text{états.cm}^{-3}.\text{eV}^{-1}$) et elle est notée $\rho(E)$
- On va donner l'expression de cette grandeur pour les électrons libres et on essaiera par la suite de faire l'extension pour les porteurs de charge dont l'énergie est proche du bord des bandes en utilisant la notion de la masse effective.

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Densité d'états (suite)

A chaque maille élémentaire de l'espace direct, correspond une maille élémentaire de l'espace réciproque.

Les volumes des deux mailles sont données par:

$$V_d = \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \times \mathbf{c}$$

$$V_r = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \times \mathbf{C}$$

Comme il y a un point \mathbf{k} (nœud) par maille élémentaire de l'espace réciproque, la densité d'états dans cet espace est donnée par:

$$\nu(\mathbf{k}) = 1/V_r$$

Par conséquent, la densité d'états dans l'espace réciproque par unité de volume du cristal est donnée par:

$$g(\mathbf{k}) = \frac{\nu(\mathbf{k})}{V_d} = \frac{1}{V_d V_r} = \frac{1}{(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \times \mathbf{c})(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \times \mathbf{C})}$$

Ce qui donne, en tenant compte de la double dégénérescence du spin, après avoir effectué les calculs des volumes:

$$g(\mathbf{k}) = \frac{2}{(2\pi)^3}$$

N.B.: Pour un système à n dimensions:

$$g(\mathbf{k}) = \frac{2}{(2\pi)^n}$$

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Expression de la densité d'états pour les électrons libres

Selon que l'on considère un problème à 1, 2 ou 3 dimensions, on a :

1. Système à 3 D.

$$\rho(E) = \frac{\sqrt{2}m^{\frac{3}{2}}}{\pi^2\hbar^3} \sqrt{E} = 4\pi \left(\frac{2m}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{E}$$

2. Système à 2 D.

$$\rho(E) = \frac{m}{\pi\hbar^2} = cst.$$

3. Système à 1 D.

$$\rho(E) = \frac{\sqrt{2m}}{\pi\hbar} \frac{1}{\sqrt{E}}$$

Remarque : Pour les électrons dans un cristal, il faut remplacer dans les expressions précédentes E par $(E_{max}-E)$ au voisinage d'un maximum (E_V) et par $(E-E_{min})$ au voisinage d'un minimum (E_C).

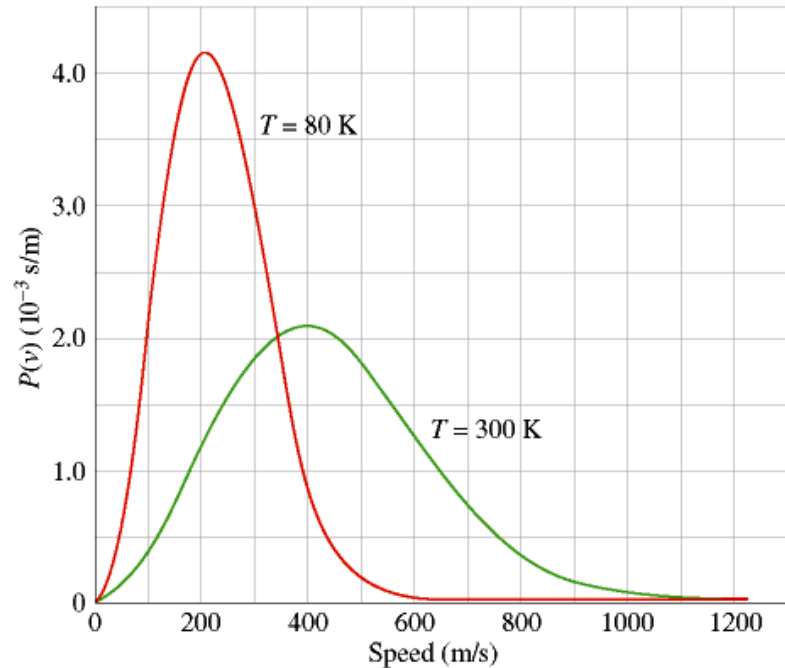
Distribution de Boltzmann

- La distribution de Boltzmann est essentielle pour comprendre les phénomènes moléculaires classiques.
- Elle indique que la probabilité qu'une molécule soit trouvée avec de l'énergie E diminue de façon exponentielle avec l'énergie (c'est-à-dire qu'une seule molécule est très peu susceptible de prendre beaucoup plus que sa part moyenne de l'énergie totale disponible pour toutes les molécules).
- **Mathématiquement**, la distribution de Boltzmann peut être écrite sous la forme.

$$\begin{aligned} f(v_x, v_y, v_z) &= \left[\frac{m}{2\pi kT} \right]^{3/2} e^{-m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) / 2 kT} \\ &= \left[\frac{m}{2\pi kT} \right]^{3/2} e^{-mv^2 / 2 kT} \\ &\text{using } v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \end{aligned}$$

Effet de la température

À des températures plus basses, il y a moins d'énergie disponible, donc les molécules de gaz ont tendance à avoir des collisions plus faibles et à se déplacer à des vitesses qui ne varient pas tant l'une de l'autre. Dans la limite où un gaz idéal est porté à zéro absolu, les molécules cesseraient de se déplacer totalement et seraient donc à vitesse constante.



À des températures plus élevées, les courbes de Maxwell-Boltzmann s'allongent. Il y a plus d'énergie disponible, alors maintenant, il y a beaucoup d'autres collisions énergétiques avec lesquelles propulser une molécule beaucoup plus rapidement que la vitesse moyenne

Notions de base

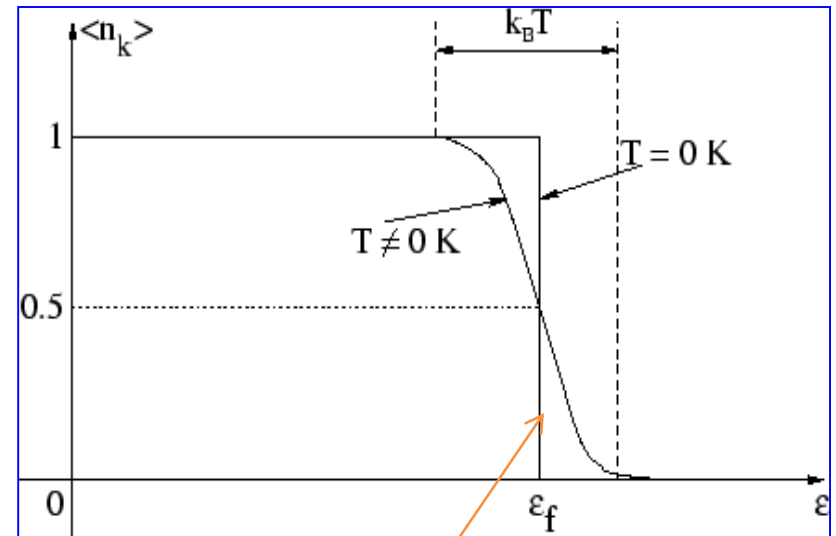
Semi-conducteurs à l'équilibre

Distribution de Fermi-Dirac

La probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie E par un électron vaut:

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

E_F est appelé le niveau de Fermi.



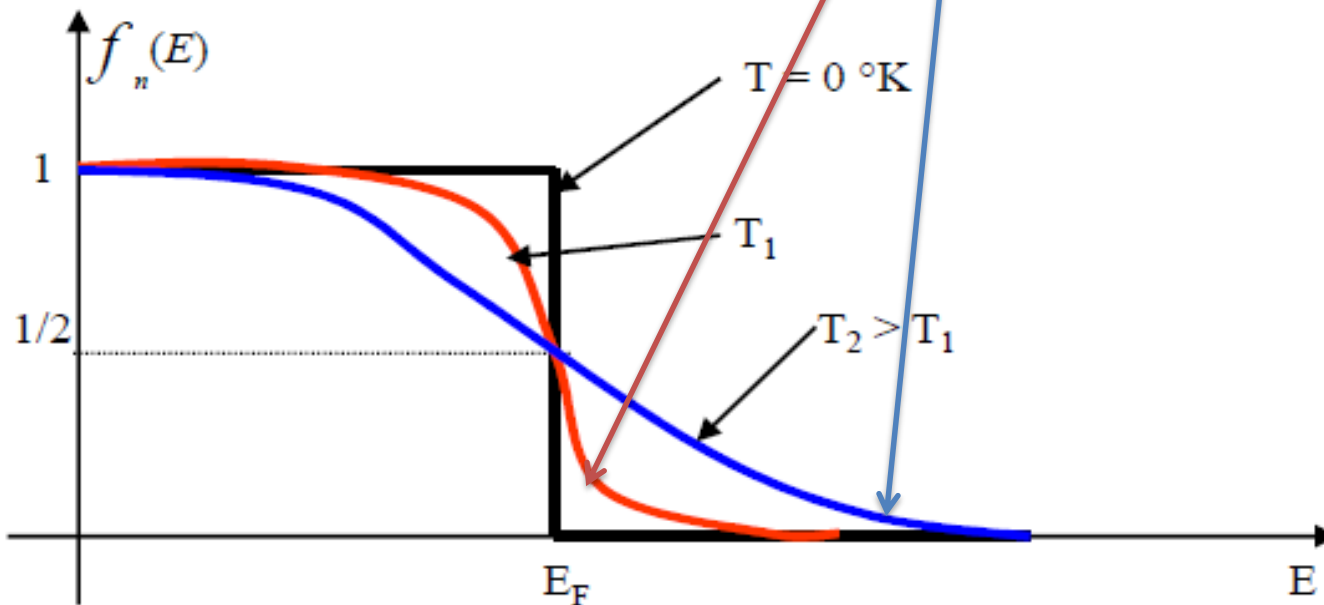
La signification physique de l'énergie de Fermi est qu'elle est la plus grande énergie d'électrons à la température de zéro.

Il ya une frontière entre les états occupés et libres.

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

A des températures non nulles, les électrons peuvent également occuper les états au-dessus de l'énergie de Fermi comme représenté sur la figure



Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Effet de la température

Exemple: Cas du silicium ($E_g=1.12$ eV, $k=8.619 \cdot 10^{-5}$ eV/K)

$$f_n(E_C) = \begin{cases} 3.35 \cdot 10^{-36} & \text{à } 80 \text{ K} \\ 3.92 \cdot 10^{-10} & \text{à } 300 \text{ K} \\ 5.36 \cdot 10^{-07} & \text{à } 450 \text{ K} \end{cases}$$

Ce calcul nous amène à remarquer que, **quelle que soit la température**, le terme $\exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)$ est **très grand** devant **1**. Par conséquent, **on peut simplifier la fonction probabilité** de présence qui devient :

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \approx \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right)$$

Cela veut dire que, **à haute température**, la statistique **de Fermi-Dirac** se ramène à celle de **Boltzmann**.

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Calcul de la concentration des porteurs dans les bandes permises

La présence d'un porteur dans un état énergétique doit satisfaire simultanément deux contraintes:

- probabilité de présence non nulle,
- nombre d'états possibles non nul.

Si nous nous intéressons aux porteurs de la bande de conduction, nous pouvons écrire, autour d'une énergie E :

$$dn = \rho(E) f_n(E) dE$$

$\rho(E)$ représentant la fonction densité d'états.

La concentration d'électrons s'en déduit par une intégration sur la bande de conduction comme suit:

$$n = \int_{E_c}^{\infty} \rho(E) \cdot f_n(E) dE$$

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

La concentration des électrons est donnée par :

$$n = \int_{E_c} \rho(E) f(E) dE = \int_{E_c}^{\infty} \rho(E) f(E) dE$$
$$n = 2 \left(\frac{m_n^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right) = N_C \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right)$$

Avec:

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2}$$

N_C : la densité effective d'états au bord de la bande de conduction.

La concentration des trous est donnée par :

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

$$p = 2 \left(\frac{m_h^* k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{k_B T}\right) = N_V \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_B T}\right)$$

Avec:

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2}$$

N_V : la densité effective d'états au bord de la bande de valence.

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Densités d'états sur les niveaux E_c et E_v

Il est à noter que ces relations sont toutefois des relations approchées, mais qui sont bien suffisantes pour décrire le comportement des dispositifs à semi-conducteurs.

En toute rigueur, la masse affectée aux porteurs (électrons et trous) n'est pas leur masse au repos ($m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg), mais leur masse en mouvement appelée « masse effective ». Cette dernière, qui résulte d'un calcul compliqué, est fonction de l'énergie de la particule, c'est à dire de sa position dans la bande.

Les valeurs moyennes couramment admises pour le silicium (Si) sont:

- $m_n = 1,05 m_0$ pour les électrons;
- $m_h = 0,62 m_0$ pour les trous.

Pour Si, à $T=300$ K, on a:

$$N_c = 2.7 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3},$$

$$N_v = 1.2 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-3}$$

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Semiconducteurs intrinsèque

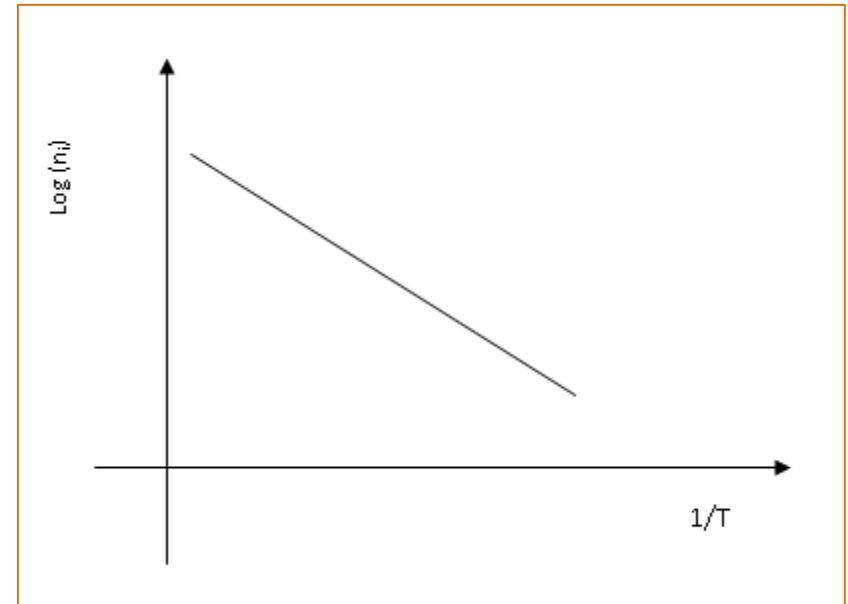
Pour un **semi-conducteur intrinsèque**, le nombre d'électrons n est égal au nombre de trous p .

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

$$n = p = n_i = (N_C N_V)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{E_C - E_V}{2k_B T}\right) = (N_C N_V)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right)$$

A 300 K, la concentration intrinsèque et le gap des semi-conducteurs les plus utilisés sont résumés dans le tableau suivant :

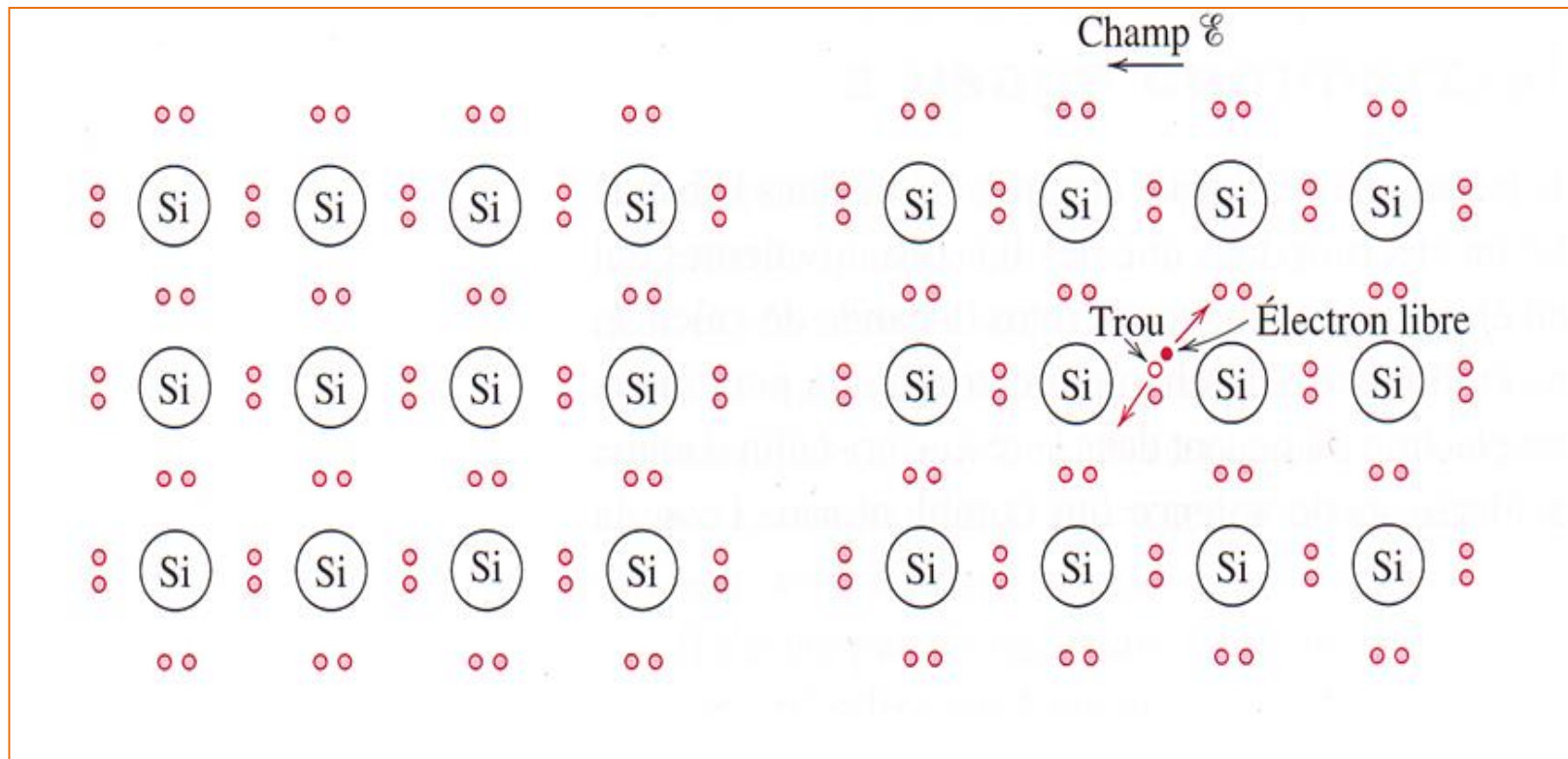
Matériau	Ge	Si	GaAs
$n_i(\text{cm}^{-3})$	10^{13}	10^{10}	10^7
E_g (eV)	0.66	1.12	1.43



Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

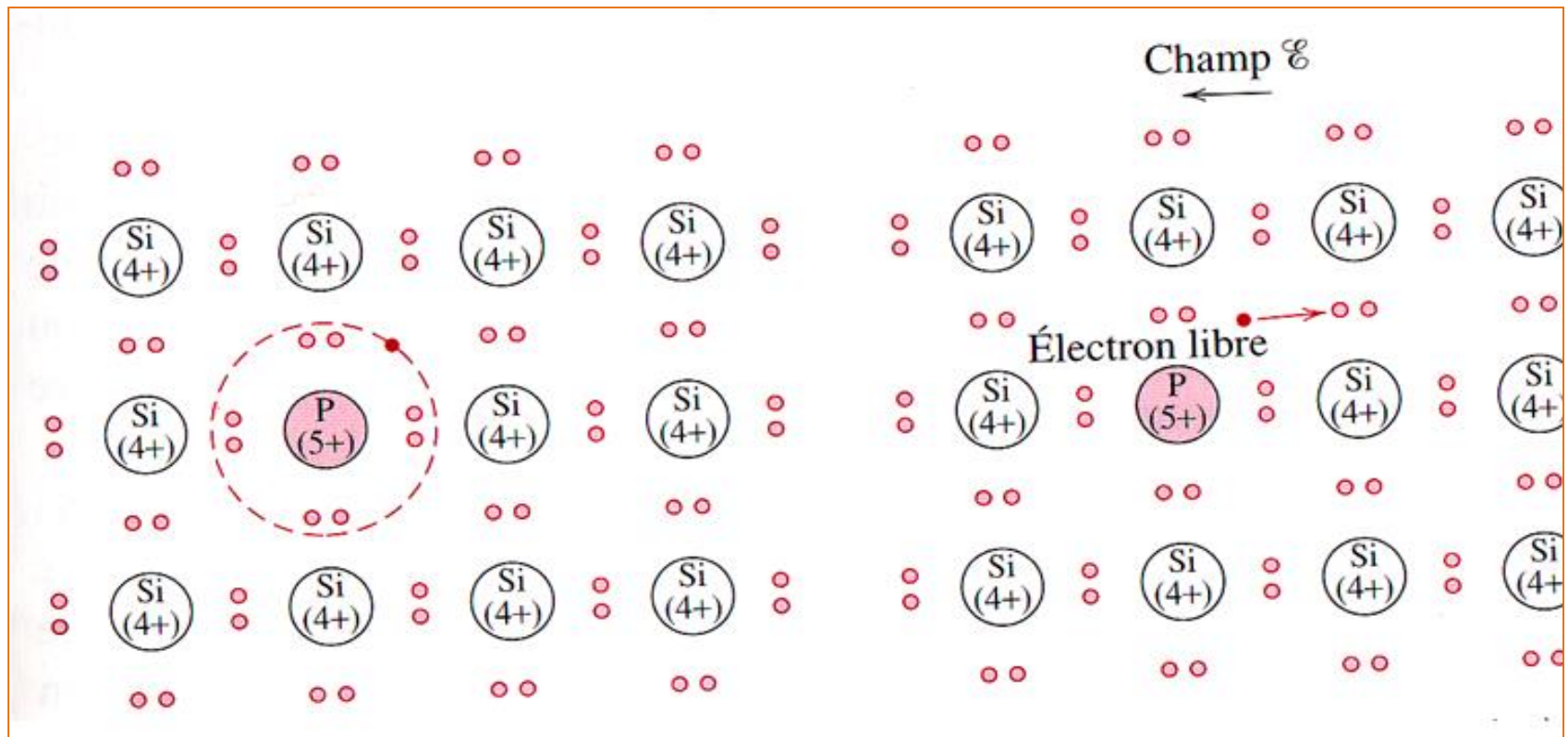
Conduction intrinsèque



Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

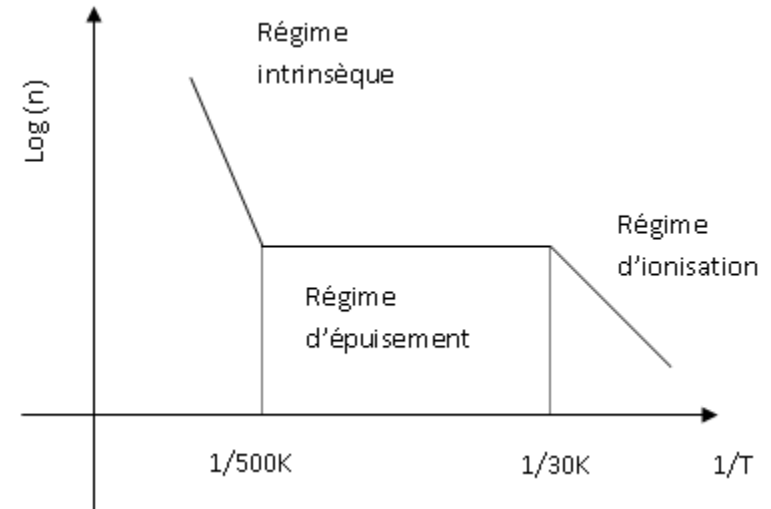
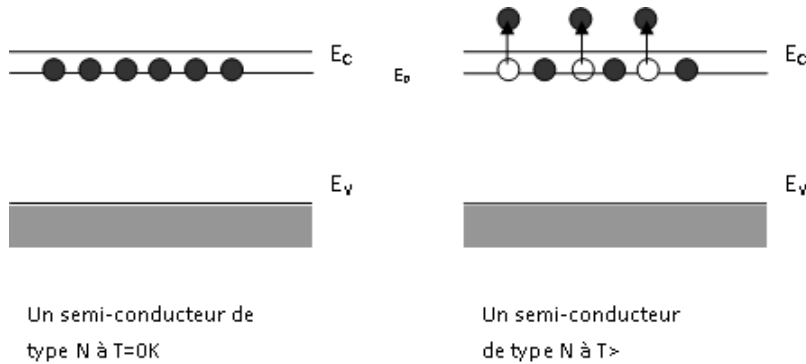
Conduction par électrons



Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Electronique des semi-conducteurs N



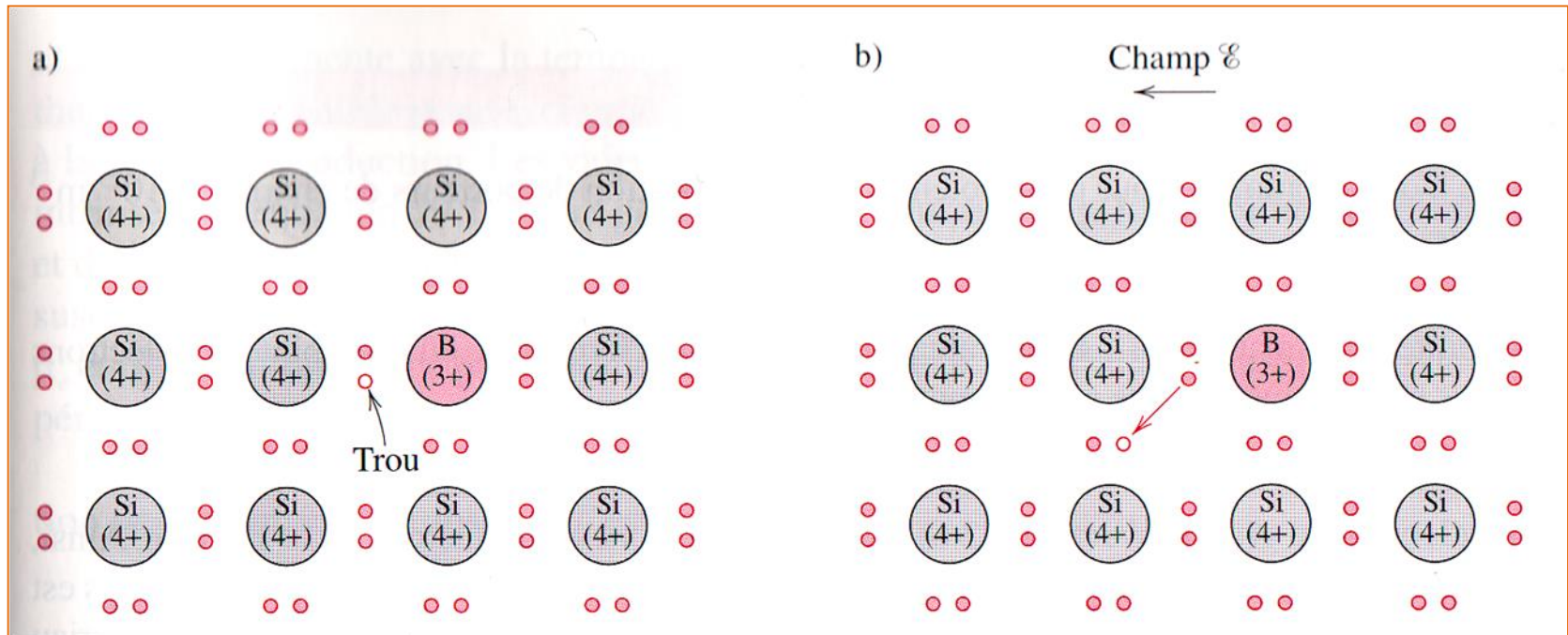
←

T

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

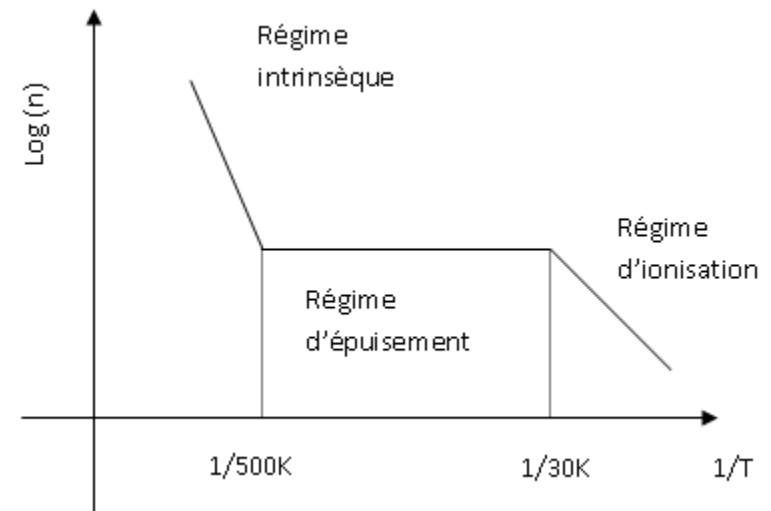
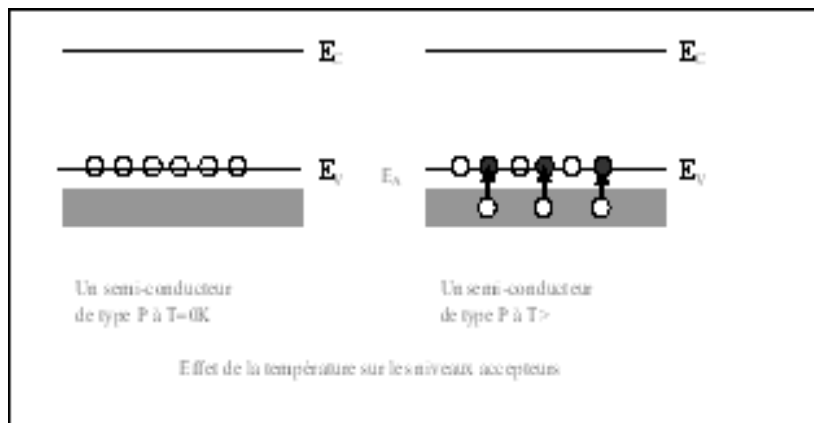
Conduction par trous



Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Electronique des semi-conducteurs P



←
T

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Calcul de l'état d'ionisation des impuretés

- **11.1. Donneurs** : Les atomes de phosphore sont ionisés positivement si le niveau E_D est vide. La probabilité d'ionisation positive sera donc la probabilité de trou sur le niveau E_D donnée par :

$$f_p(E_D) = \frac{N_D^+}{N_D} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_F - E_D}{k_B T}\right)}$$

- **11.2. Accepteurs** : Les atomes de bore sont ionisés négativement si le niveau E_A est plein. La probabilité d'ionisation négative sera donc la probabilité de l'électron sur le niveau E_A donnée par :

$$f_n(E_D) = \frac{N_A^-}{N_A} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_A - E_F}{k_B T}\right)}$$

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Neutralité électrique

Dans un **crystal semi-conducteur**, sauf au voisinage immédiat des **jonctions**, des **hétérojonctions** ou des **surfaces**, il y a **autant de charges positives** que de **charges négatives** ; le matériau **est neutre**.

Les charges positives consistent en :

- **Trous libres** en concentration **p** ;
- **Donneurs ionisés positivement** (ions P⁺) en concentration **N_D⁺**.

Les charges négatives consistent en :

- **Electrons libres** en concentration **n** ;
- **Accepteurs ionisés négativement** (ions B⁻) en concentration **N_A⁻**.

L'équation de neutralité s'écrit donc

$$n + N_A^- = p + N_D^+$$

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Calcul de la position du niveau de Fermi

1. Matériau intrinsèque

Dans ce cas, $n=p$ et $N_D^+ = N_A^- = 0$.

Par conséquent, l'équation de neutralité s'écrit :

$$n = p$$

Ce qui donne:

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

Par conséquent (comme $N_C \approx N_V$):

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2}$$

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Calcul de la position du niveau de Fermi

2. Matériau N (30-500K)

Pour un matériau n en régime d'épuisement on a :

$$n = N_D^+ \approx N_D$$

Par conséquent :

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

Ce qui donne :

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

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Calcul de la position du niveau de Fermi

3. Matériau p (30-500K)

Pour un matériau p en régime d'épuisement on a :

$$p = N_A^- \approx N_A$$

Par conséquent :

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

Ce qui donne :

$$E_F = E_V + k_B T \log\left(\frac{N_V}{N_A}\right)$$

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Neutralité et compensation dans les semi-conducteurs

Dans le cas d'un semi-conducteurs homogène à l'équilibre thermodynamique et contenant des impuretés de type donneurs, concentration N_D , et accepteurs, concentration N_A , la condition de neutralité électrique est traduite par l'expression:

$$n + N_A^- = p + N_D^+$$

Dans le régime d'épuisement $N_A^- = N_A$ et $N_D^+ = N_D$, et la condition de neutralité devient :

$$n + N_A = p + N_D$$

Comme le semi-conducteur est à l'équilibre thermodynamique, la loi d'action de masse est valable:

$$np = n_i^2$$

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Semi-conducteur compensé

Les impuretés qui restent dans un semi-conducteur sont appelées les impuretés résiduelles.

Ces impuretés peuvent jouer le rôle de donneurs ou d'accepteurs. Si un semi-conducteur contient des impuretés d'un type donné, on peut le doper avec des impuretés de type opposé afin de compenser l'effet des impuretés résiduelles.

Dans une telle situation, on a $N_A = N_D$ et $n = p = n_i$ et le semi-conducteur est dit compensé.

Le comportement d'un semi-conducteur compensé est similaire à celui d'un semi-conducteur intrinsèque (E_F est au voisinage du milieu du gap, sa conductivité est faible).

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Rapport de compensation dans les semi-conducteurs de type N

Comme il est impossible d'avoir un semi-conducteur pur, i.e. un semi-conducteur pour lequel $N_D=N_A=0$, on définit des rapports de compensation.

Dans ce cas $N_D > N_A$ et $p \ll N_D$. Si on se place dans le régime d'épuisement, la condition de neutralité devient :

$$n + N_A = p + N_D \approx N_D$$

A l'équilibre, la loi d'action de masse est valide, ce qui donne:

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_D - N_A}$$

Rapport de compensation

Le rapport de compensation pour un semi-conducteur de type N est donné par :

$$R_{cn} = \frac{\sum \text{donneurs} - \sum \text{accepteurs}}{\sum \text{donneurs}} = \frac{N_D - N_A}{N_D}$$

Niveau de fermi

$$E_F^n = E_C - k_B T \log \left(\frac{N_C}{N_D - N_A} \right)$$

Remarque : Dans ce cas, les électrons sont appelés porteurs majoritaires et les trous sont les porteurs minoritaires.

Notions de base

Semi-conducteurs à l'équilibre

Rapport de compensation dans les semi-conducteur de type P

Comme il est impossible d'avoir un semi-conducteur pur, i.e. un semi-conducteur pour lequel $N_D=N_A=0$, on définit des rapports de compensation.

Dans ce cas $N_A > N_D$ et $n \ll N_A$. Si on se place dans le régime d'épuisement, la condition de neutralité devient :

$$N_A \approx p + N_D$$

A l'équilibre, la loi d'action de masse est valide, ce qui donne:

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{n_i^2}{N_A - N_D}$$

Rapport de compensation

Le rapport de compensation pour un semi-conducteur de type N est donné par :

$$Rc_p = \frac{\sum \text{accepteurs} - \sum \text{donneurs}}{\sum \text{accepteurs}} = \frac{N_A - N_D}{N_A}$$

Niveau de fermi

$$E_F^P = E_V + k_B T \text{Log} \left(\frac{N_V}{N_A - N_D} \right)$$

Remarque : Dans ce cas, les trous sont appelés porteurs majoritaires et les électrons sont les porteurs minoritaires.

2^{ème} Partie

Semi-conducteurs Hors Equilibre

Définition

Un semi-conducteur travaille en dehors de l'équilibre thermodynamique s'il est soumis à une interaction avec son environnement, un rayonnement par exemple.

Notions de base

Semi-conducteurs hors équilibre

Régimes de conduction

Selon l'intensité du champ appliqué au matériau semi-conducteur, on peut avoir l'un des deux régimes suivants :

- **Régime ohmique** : Lorsque le champ électrique est faible, le comportement des porteurs de charge obéit à la loi d'Ohm ;
- **Régime d'électrons chauds** : Si le champ électrique est intense, les porteurs de charge acquièrent une énergie cinétique importante (supérieure à celle qu'ils auraient si leur température était égale à celle du réseau). Dans le cas où les électrons sont les porteurs majoritaires, ce régime est appelé régime à électrons chauds.

En outre, la nature du champ électrique peut induire l'un des deux régimes suivants :

- **Régime permanent** : Si le champ appliqué est constant, le courant électrique qui résulte est aussi constant et on est en présence d'un régime permanent.
- **Régime variable** : Si le champ appliqué varie avec le temps, le courant électrique l'est aussi et on est alors en présence d'un régime variable.
- **Remarque** : Le régime permanent est précédé d'un régime transitoire de faible durée dans les métaux et les semi-conducteurs.

Notions de base

Semi-conducteurs hors équilibre

Mécanisme de la conductivité

Si les porteurs libres sont soumis à une **force constante**, ils auraient un **mouvement uniformément accéléré** et leur **vitesse croîtrait** avec le temps **sans limite**.

Cependant, l'existence d'une **vitesse limite** implique **l'existence d'un mécanisme de dissipation de l'énergie** que le champ électrique communique aux porteurs de charge.

Ce mécanisme se traduit par **l'interaction des porteurs de charge** avec **le réseau cristallin** et **ses imperfections** (agitation thermiques des atomes et des ions, existence d'impuretés et lacunes ainsi que les dislocations).

Notions de base

Semi-conducteurs hors équilibre

Mobilité des porteurs de charge

La **vitesse limite** atteinte par les porteurs de charge **dans le réseau** est donnée par:

$$\vec{u}_n = -\mu_n \vec{E} \quad \text{pour les électrons}$$

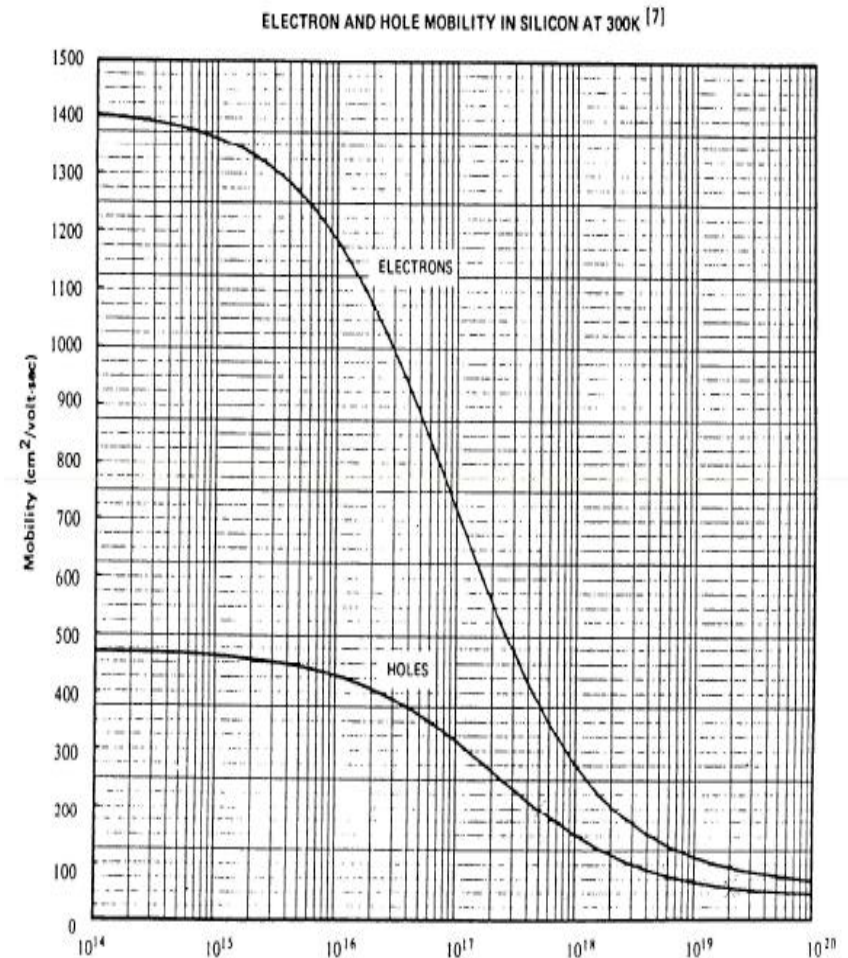
$$\vec{u}_h = \mu_h \vec{E} \quad \text{pour les trous}$$

Ou μ est la **mobilité** des porteurs donnée par:

$$\mu_{n,h} = \frac{e\tau}{m_{n,h}}$$

τ : le **temps moyen des collisions** des porteurs de charge

m et e: la **masse** et la **charge** des porteurs de charge



Notions de base

Semi-conducteurs hors équilibre

Densité de courant

Les courants dans les semi-conducteurs résultent du déplacement des porteurs (électrons et trous) sous l'action d'une force.

N.B.: Densité de courant=Courant/Surface (courant par unité de surface)

L'origine de la force peut être un champ électrique ou un gradient de concentration.

Dans le premier cas, le courant est dit de conduction (dérive) et dans le second cas, le courant est dit de diffusion.

Notions de base

Semi-conducteurs hors équilibre

Courant de conduction

Pour les électrons $q=-e$ et on a :

$$\vec{j}_n = -en \vec{u}_n$$

Pour les trous densité p et pour lesquels $q=e$ on a :

$$\vec{j}_p = ep \vec{u}_p$$

Pour un semi-conducteur en général on a :

$$\vec{j} = \vec{j}_n + \vec{j}_p = -en \vec{u}_n + ep \vec{u}_p$$

qui peut s'écrire encore :

$$\vec{j} = \vec{j}_n + \vec{j}_p = en \mu_n \vec{E} + ep \mu_p \vec{E} = (en \mu_n + ep \mu_p) \vec{E}$$

D'après la loi d'Ohm locale :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

on en déduit :

$$\sigma = (en \mu_n + ep \mu_p)$$

Notions de base

Semi-conducteurs hors équilibre

Courant de diffusion

Ce courant peut s'écrire :

Pour les électrons $q=-e$ et on a :

$$j_{Dn} = e D_n \frac{dn}{dx}$$

Pour les trous $q=e$ et on a :

$$j_{Dp} = -e D_p \frac{dp}{dx}$$

D_n et D_p sont respectivement **les constantes de diffusion** des électrons et trous dont les expressions sont données par:

$$D_n = V_{thn} L_n \quad \text{pour les électrons}$$

$$D_p = V_{thp} L_p \quad \text{pour les trous}$$

Avec V_{th} et L sont respectivement **la vitesse thermique** et le **libre parcours moyen** des porteurs de charge (électrons et trous)

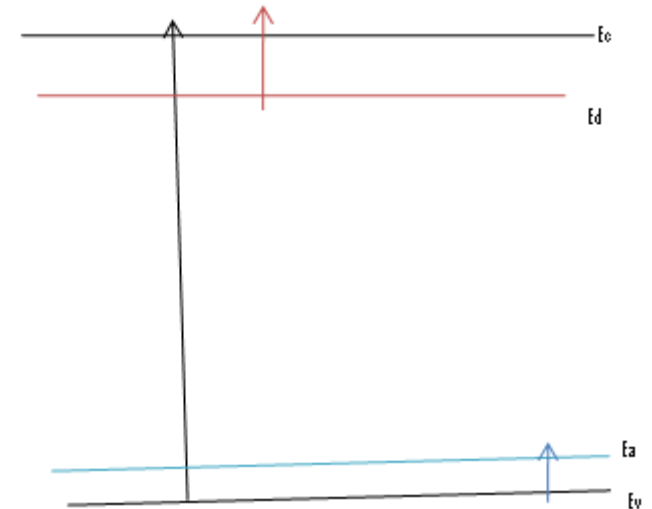
Notions de base

Semi-conducteurs hors équilibre

Transitions électroniques

Si on soumet un matériau semi-conducteur à une **perturbation dure**, on introduit des **transitions électroniques** :

- Soit entre E_V et E_C et on a création de paires électron trou ;
- Soit entre E_D et E_C et on a création d'électrons en excès et des charges positives fixes ;
- Soit entre E_V et E_A et on a création de trous en excès et des charges négatives fixes.



Notions de base

Semi-conducteurs hors équilibre

Création des porteurs en excès

On peut distinguer, **selon l'intensité de la perturbation**, les deux cas suivants :

- **Perturbation douce** : Elle peut être :
 - Un champ électrique faible ($<10^5 \text{V.cm}^{-1}$) ;
 - Un gradient de concentration de porteurs ;
 - Un gradient de température.
 - Ces perturbations **modifient la répartition des porteurs** sur les niveaux de leur bande ($n(E)$ et $p(E)$) **sans variation du nombre total** de porteurs n ou p .
 - **La réponse du matériau** à ces perturbations est un **phénomène de transport** : courant de conduction ou de diffusion, conductibilité thermique, électrique,
- **Perturbation dure** : Elle peut être :
 - Un champ électrique intense ($>10^6 \text{V.cm}^{-1}$) ;
 - Un éclaircissement ;
 - Une irradiation.
 - Ces perturbations **modifient la concentration des porteurs** ; i.e. il y a **création de porteurs en excès**.
 - **La réponse du matériau** à ces perturbations est un **phénomène de recombinaison**.

Notions de base

Semi-conducteurs hors équilibre

Création par paire électron trou

L'énergie nécessaire à la création d'une paire peut être apportée par :

- Un photon ;
- Une particule chargée dont l'énergie est importante (radiation ionisante, porteur chaud) ;
- Un champ électrique intense.

Vitesse de génération

- Un mécanisme de création de porteurs en excès est caractérisé par une vitesse de génération représentant le nombre de porteurs (électrons ou trous) créés par cm^3 et par seconde.
- Pour les électrons, la vitesse de génération est notée G_n et dans le cas des trous, elle est notée G_p avec $[G]=\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1}$.
- **Remarque :** Dans le cas de création par paire on a évidemment $G_n=G_p$.

Notions de base

Semi-conducteurs hors équilibre

Types de recombinaison

- Recombinaison directe (bande à bande)

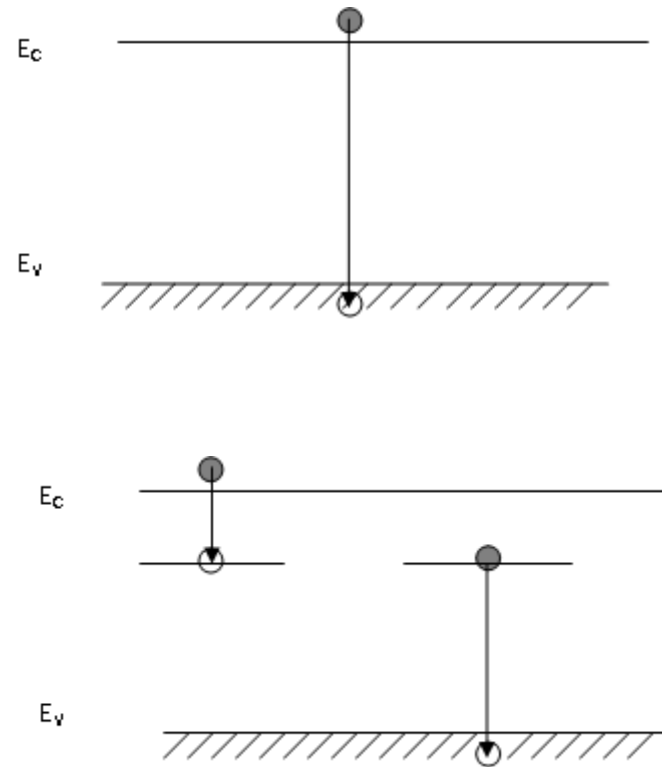
Exemples

- GaAs : Durée de vie $\approx 10^{-8}$ s, $h\nu$ du photon émis se situe dans le domaine IR ($0.8\mu\text{m}$).
- $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ pour $x < 0.4$: $h\nu$ du photon émis se situe dans le domaine visible (rouge).

- Recombinaison indirecte

Exemples :

- Si : Durée de vie pour Si pur $\approx 10^{-3}$ s, transition non radiative. On peut tuer la durée de vie par diffusion d'or ou de platine pour que $\tau \rightarrow 10^{-9}$ s.
- GaP: Transition radiative indirecte quand le dopant est Cd ou Zn. L'énergie $h\nu$ du photon émis se situe dans le domaine visible (rouge avec $\eta=10\%$ et vert avec $\eta=1\%$).



Notions de base

Semi-conducteurs hors équilibre

Vitesse de recombinaison

En général, plusieurs processus de recombinaison entrent en compétition dans un même matériau.

Il convient donc de caractériser l'efficacité de chacun à travers un paramètre appelé vitesse de recombinaison notée R ($\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1}$).

Ce paramètre représente le nombre de porteurs recombinés par cm^3 et par s et il est définie par:

$$R_n = \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad \text{pour les électrons}$$

$$R_p = \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad \text{pour les trous}$$

Notions de base

Semi-conducteurs hors équilibre

Porteurs de charge en excès et quasi niveau de Fermi

A l'équilibre thermique, les concentrations de porteurs majoritaires et minoritaires n_0 et p_0 sont exprimés par référence au niveau de Fermi E_F au moyen des relations :

$$n = n_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right)$$

$$p = p_0 = N_v \exp\left(\frac{E_V - E_F}{k_B T}\right)$$

Pour un semi-conducteur intrinsèque $E_F = E_i$ et on aura :

$$n_i = n = N_c \exp\left(-\frac{E_C - E_i}{k_B T}\right)$$

$$p_i = p = N_v \exp\left(\frac{E_V - E_i}{k_B T}\right)$$

En faisant les rapports n_0/n_i et p_0/p_i on aboutit à :

$$n_0 = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{k_B T}\right)$$

$$p_0 = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{k_B T}\right)$$

Et on a bien $n_0 \cdot p_0 = n_i^2$ (loi d'action de masse)

Notions de base

Semi-conducteurs hors équilibre

Porteurs de charge en excès et quasi niveau de Fermi (suite)

les relations précédentes ne sont plus, du point de vue physique, autorisées pour un semi-conducteur hors équilibre. Cependant, pour continuer à utiliser les relations précédentes, on introduit deux quantités mathématiques E_{Fn} et E_{Fp} appelées respectivement quasi niveau de Fermi des électrons et des trous définis par :

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_i}{k_B T}\right)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_{Fp}}{k_B T}\right)$$

D'où on a :

$$n \cdot p = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{k_B T}\right) \neq n_i^2$$

Notions de base

Semi-conducteurs hors équilibre

Equations de base

- Equations de continuité (1D)**

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \mu_n n \frac{\partial E}{\partial x} + \mu_n E \frac{\partial n}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + G_n - \frac{n - n_0}{\tau_n}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\mu_p p \frac{\partial E}{\partial x} - \mu_p E \frac{\partial p}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + G_p - \frac{p - p_0}{\tau_p}$$

$$J_n = q\mu_n n E + q D_n \frac{dn}{dx} \text{ Pour les électrons}$$

$$J_p = q\mu_p p E - q D_p \frac{dp}{dx} \text{ Pour les trous}$$

- Equation de poisson (1D)**

$$\text{div}(\text{grad}\vec{V}) = \Delta V = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

$$\rho = e(N_D - n + p - N_A)$$

Ce sont ces trois équations qu'il faut résoudre pour étudier le comportement Électriques des dispositifs

