

PHENOMENES DE TRANSPORT DANS LES SEMI-CONDUCTEURS

Conductivité – Dérive dans un champ électrique

Mobilité- Conductivité

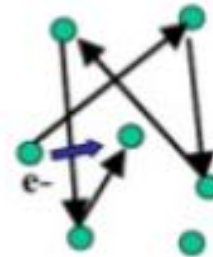
Soit un cristal semi-conducteur contenant des électrons et trous libres de densité n et p .

En l'absence d'un champ électrique E la vitesse moyenne d'entraînement est nul:

Collisions multiples dues à l'agitation thermique d'origines:

- atomes du réseau
- impuretés ionisées
- défauts

$$\Rightarrow \langle v_{th} \rangle = 0$$



Trajectoire linéaire entre choc

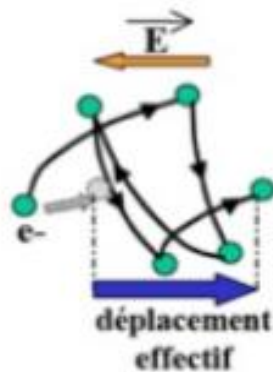
En présence d'un champ électrique E constant et uniforme, La force à laquelle est soumis l'électron est :

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{\text{appliquée}}$$

$$\vec{F} = -q\vec{E} = m_0\vec{\gamma} = m_0 \frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$\vec{v}(t) = -\frac{q}{m_0} \vec{E}t$$

Trajectoire incurvée entre choc



Les porteurs ont une vitesse thermique moyenne, orientée dans toutes les directions de l'espace qui est légèrement modifiée en imposant une direction statistique préférentielle par la présence du champ électrique.

La vitesse d'entraînement vaut donc:

$$\langle v(t) \rangle = \langle v \rangle = -\frac{q}{m_0} \vec{E} \tau$$

Soit μ la mobilité:

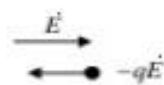
$$\boxed{\mu = \frac{q\tau}{m_0}} \Rightarrow \boxed{\langle v \rangle = -\mu \vec{E}}$$

Pour les Semiconducteurs:

Si $v \ll v_{th}$ ou E faible

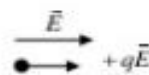
$\langle \vec{v}_n \rangle$ Vitesse moyenne des électrons

$$\langle \vec{v}_n \rangle = -\mu_n \vec{E}$$



$\langle \vec{v}_p \rangle$ Vitesse moyenne des trous

$$\langle \vec{v}_p \rangle = \mu_p \vec{E}$$



$$\boxed{\mu_n = \frac{q\tau}{m_n^*}}$$

$$\boxed{\mu_p = \frac{q\tau}{m_p^*}}$$

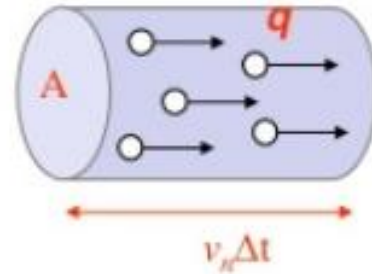
$\mu(\text{cm}^2/\text{Vs})$

m_p^* et m_n^* sont les masses effectives de conduction

La densité de courant de conduction

Courant causé par le champ électrique due aux électrons:

$$j = \frac{\Delta Q}{A \cdot \Delta t} = \frac{-qn \langle v_n \rangle \Delta t A}{A \Delta t}$$



$$j = -qn \langle v_n \rangle = -\frac{nq^2 \tau_n}{m_n^*} E = nq \mu_n E \quad (\text{A/cm}^2)$$

Loi d'Ohm : $j = \sigma E$



$$\sigma_n = \frac{nq^2 \tau_n}{m_n^*} = nq \mu_n$$

(due aux électrons
seulement)

Courant total due aux électrons et aux trous:

$$j = -qn\langle v_n \rangle + qp\langle v_p \rangle = (nq\mu_n + pq\mu_p)E = \sigma E$$

$$\sigma = qn\mu_n + qp\mu_p$$

j_n et j_p sont les courants de dérive dans le champ électrique.

Pour les trous,

$$\langle v_p \rangle = \frac{q\tau_p}{m_p^*} E = \mu_p E$$

(μ_p est la mobilité des trous)

La loi d'Ohm locale (**microscopique**) :

$$J_n = \frac{nq^2 E \tau_n}{m_n^*} = \sigma_n E \quad \text{pour les électrons, et}$$

$$J_p = \frac{pq^2 E \tau_p}{m_p^*} = \sigma_p E \quad \text{pour les trous.}$$

Def: Les conductivités électriques s'écrivent :

$$\sigma_n = \frac{nq^2 \tau_n}{m_n^*} = nq\mu_n \quad (\Omega^{-1}cm^{-1}) \text{ pour les électrons, et}$$

$$\sigma_p = \frac{pq^2 \tau_p}{m_p^*} = pq\mu_p \quad (\Omega^{-1}cm^{-1}) \text{ pour les trous.}$$

Le courant total étant la somme des courants de trous et d'électrons, la conductivité totale du matériau s'écrit naturellement:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = qn\mu_n + qp\mu_p$$

Le courant total étant la somme des courants de trous et d'électrons,

$$\begin{aligned}\vec{J} &= \vec{J}_n + \vec{J}_p = \frac{nq^2\vec{E}\tau_n}{m_n^*} + \frac{pq^2\vec{E}\tau_p}{m_p^*} = \\ &= (\sigma_n + \sigma_p)\vec{E} = \sigma\vec{E}\end{aligned}$$

la conductivité totale du matériau s'écrit naturellement:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = qn\mu_n + qp\mu_p$$

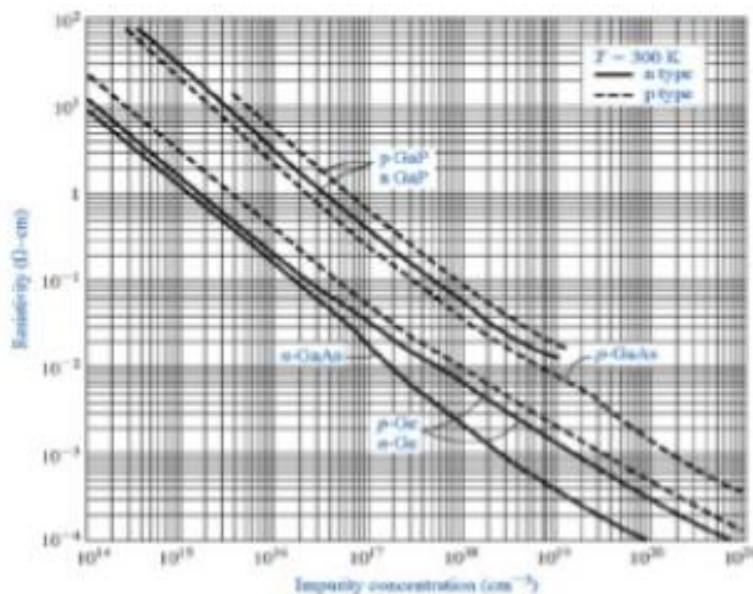
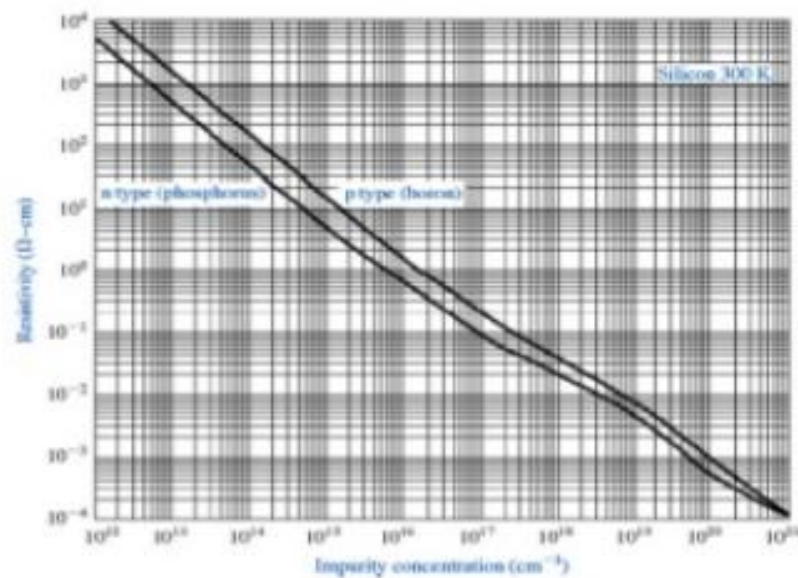
La résistivité ρ d'un matériau est l'inverse
de la conductivité σ

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (\Omega cm)$$

$$\rho_n = \frac{1}{qn\mu_n} \quad \text{si } n \gg p$$

$$\rho_p = \frac{1}{qp\mu_p} \quad \text{si } p \gg n$$

Résistivité



➤ Cas du silicium intrinsèque à 300K :

$\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ et $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V.s}$

$p = n = n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

$\rho = 3,4 \cdot 10^5 \Omega\text{cm}$ et

$\sigma = 2,9 \cdot 10^{-6} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$

➤ Cas du silicium dopé à 300K :

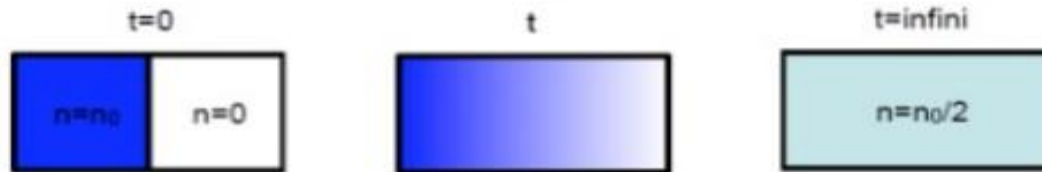
$\mu_n = 280 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ et $\mu_p = 90 \text{ cm}^2/\text{V.s}$

$n = N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et $p = 2,2 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-3}$

$\rho = 2,2 \cdot 10^{-2} \Omega\text{cm}$ et

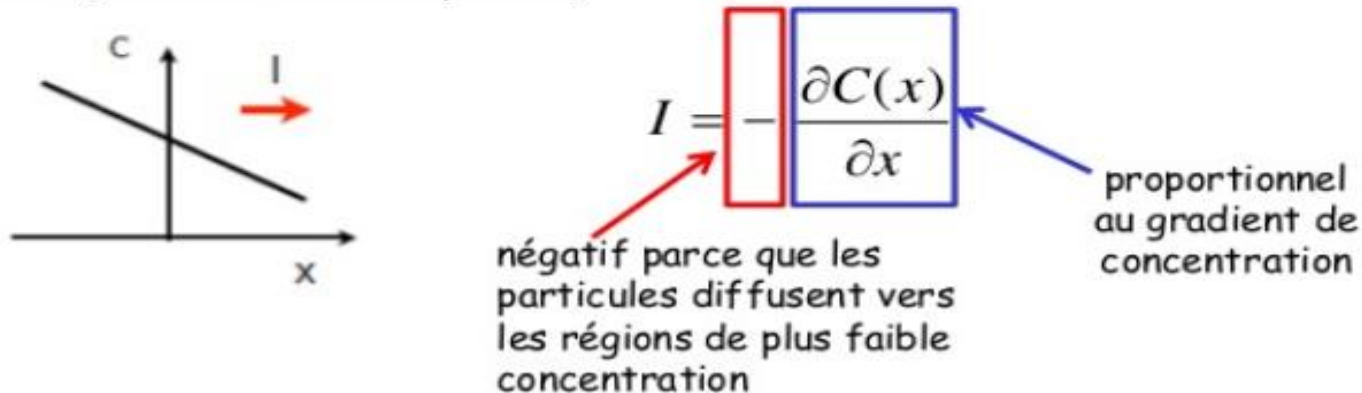
$\sigma = 48 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$

Diffusion des porteurs



Il apparaît un courant qui tend à homogénéiser la concentration

Ce courant est d'autant plus faible que la différence de concentration est faible (il tend vers 0 à l'équilibre)

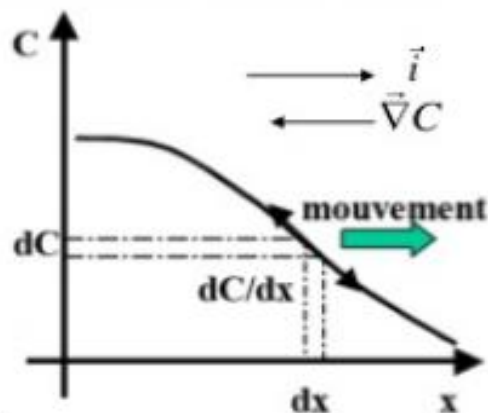


Il y a diffusion des régions de forte concentration vers les régions de faible concentrations

$$\vec{V}C = \frac{\partial C}{\partial x} \vec{i}$$

C : concentration de l'espèce

$$\frac{\partial C}{\partial x} < 0$$



□ Loi de Fick : le mouvement des porteurs de charges s'effectue dans une direction qui a tendance à uniformiser leur distribution spatiale. Ce phénomène est équivalent à celui de l'équilibre de la pression d'un gaz dans une enceinte.

(Loi de Fick) : $\Rightarrow F = -D \vec{\nabla} C$ D : coefficient de diffusion (cm^2s^{-1})

Le flux des particules F est proportionnel au gradient de concentration

□ Le signe (-) vient du fait que pour qu'il y ait étalement, le gradient doit être < 0 . Cette loi est générale et s'applique aussi bien aux électrons, aux trous, aux atomes et aux ions.

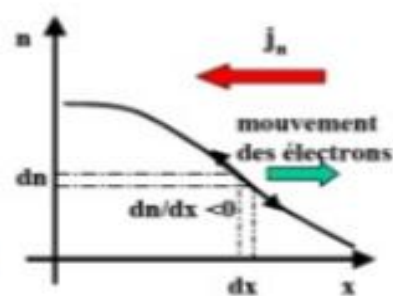
➤ **Courants de Diffusion** : En considérant macroscopiquement la diffusion des électrons et des trous, leur déplacement est équivalent à un courant. On peut donc exprimer les densités de courant de diffusion des électrons et des trous en multipliant le flux des porteurs par la charge élémentaire.

➤ **Cas des électrons** :

$$F_n = -\frac{1}{q} \cdot J_{n,D} \quad \rightarrow \quad J_{n,D} = +q \cdot D_n \vec{\nabla} n$$

D_n : coefficient de diffusion des électrons.

Par convention la densité de courant est de sens opposé au déplacement des électrons. Les électrons étant de charge <0 , se déplaçant vers les $x>0$, le gradient de concentration <0 , la densité de courant est <0 .

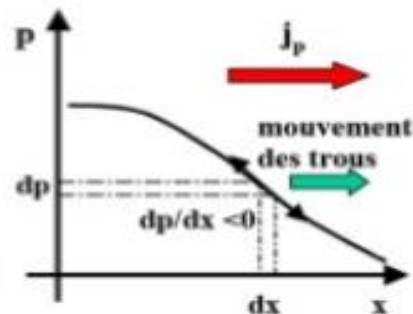


➤ **Cas des trous** :

$$F_p = \frac{1}{q} \cdot J_{p,D} \quad \rightarrow \quad J_{p,D} = -q \cdot D_p \vec{\nabla} p$$

D_p : coefficient de diffusion des trous

Par convention la densité de courant est dans le même sens que celui des trous. Les trous étant de charge >0 , se déplaçant vers les $x>0$, le gradient de concentration <0 , la densité de courant est >0 .



Densité de courant de diffusion

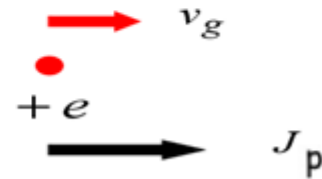
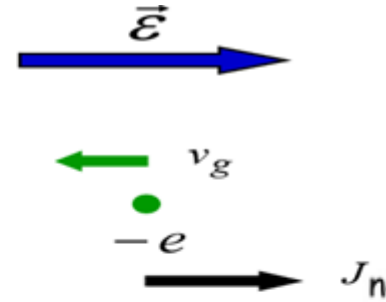
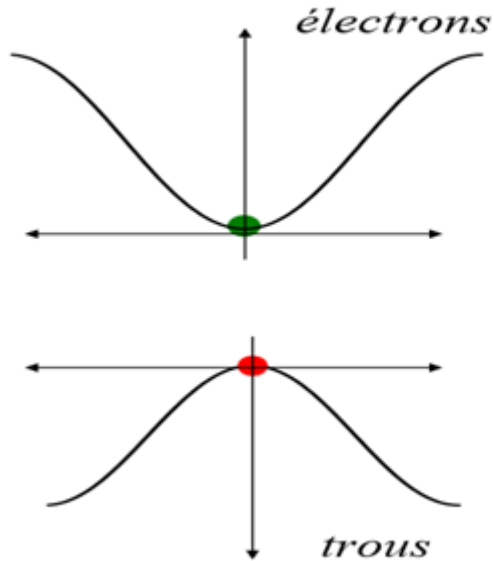
$$J_{n,D} = (-q).F_n = +q.D_n \vec{\nabla} n \quad \text{Pour les électrons}$$

$$J_{p,D} = (+q).F_p = -q.D_p \vec{\nabla} p \quad \text{Pour les trous}$$

$$J_D = q.(D_n \vec{\nabla} n - D_p \vec{\nabla} p) \quad \text{Total}$$

Densité de courant total

Électrons et trous



$$J_{total} = J_n + J_p$$

- Densité de courant total d'électrons dans un semi-conducteur :

$$J_n = J_{n,deriv} + J_{n,Dif} = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

- Densité de courant total de trous dans un semi-conducteur :

$$J_p = J_{p,deriv} + J_{p,Dif} = q\mu_p pE - qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

- Densité de courant total dans un semi-conducteur :

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p = \sum_{n,p} J_{deriv} + \sum_{n,p} J_{diff}$$


- Les coefficients de diffusion s'expriment en cm^2/s . Ils sont de l'ordre de grandeur de l'unité et en général tels que $D_n > D_p$.
- Le modèle utilisé ici unidimensionnel permet de mener à bien des calculs analytiques.

Relation d'Einstein

- A l'équilibre le courant de diffusion est équilibré par le courant de conduction:

$$J_p(x) = q\mu_p p(x)E(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx} = 0 \quad \Rightarrow \quad E(x) = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{p(x)} \frac{dp(x)}{dx}$$

On a $p(x) = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{KT}}$


$$E(x) = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{kT} \left(\frac{dE_i}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right)$$

$$E(x) = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx}$$

car E_F est constante à l'équilibre

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p$$



$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q}$$

Relation d'Einstein