~~C~~hapitre II : Phénomènes de transfert dans les s/c

$\exists\ \Delta T \Rightarrow$ Transport d'énergie

$\exists\ \Delta V \Rightarrow \vec{E}$ « Un déplacement de charge »

$\exists\ \begin{matrix}\Delta n \\ \Delta p\end{matrix} \Rightarrow$ Transport de masse $\Rightarrow$ Diffusion de porteurs

Dans un s/c homogène et intrinsèque, sous l'influence de potent ΔV ou $\begin{matrix}\Delta n \\ \Delta p\end{matrix}$ il existe deux mécanismes qui contrôlent le courant Conduction et diffusion

II-1- La conduction : التوصيل

II-1-1- Le déplacement des charges :

a) En l'abscence du champ $\vec{E}$:

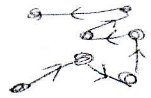
$T = 300°K \Rightarrow$ Les charges sont en mvt aléatoire

Ce mvt est caractérisé par une vitesse $V_{th} = \sqrt{\frac{3KT}{m^*}}$ ($K \rightarrow$ Boltzmann, $m^* \rightarrow$ masse effective)

ex : si $m^* \approx m_e = 9{,}8 \cdot 10^{-28}\ g$

$V_{th} = 10^7\ cm/s$ à $T = 300°K$

Toutes les directions sont possibles, l'ē change de direction à chaq fois qu'il entre en collision avec un atome $\Rightarrow \Sigma I = 0$



$\Rightarrow$ Le s/c est électriquemen neutre

Le temps moyen entre deux chocs « durée moyenne d'un libre parcours » (temps de relaxation) $\boxed{\tau = 10^{-13}\ s}$

$$\lambda = V_{th} \cdot \tau \approx 10^2\ A°$$

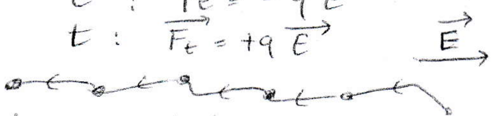
b) Application d'un champ $\vec{E}$:

Mvt thermique + Mvt de dérive $\rightarrow$ présence de $\vec{E}$

énergie thermique

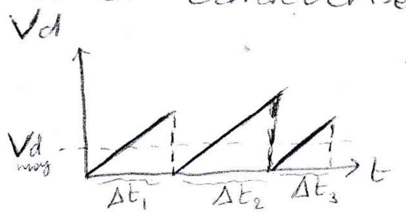
ē : $\vec{F_e} = -q\vec{E}$

t : $\vec{F_t} = +q\vec{E}$



(1)

Le mvt de dérive est caractérisé par une vitesse V_{dn} (pour ē), V_{dp} (pour t)



Vd s'annule quand il y a un choc

$$\vec{V_{dn}} = -\frac{q\vec{E}\tau_n}{m_e^*}$$

$$\vec{V_{dp}} = \frac{q\vec{E}\tau_p}{m_p^*}$$

• La Mobilité :

* Déf : On définit la mobilité par le rapport entre la vitesse de dérive et le champ électrique $\mu = \left|\frac{\vec{V_d}}{\vec{E}}\right| = cte > 0$

$$\Rightarrow \mu_n = \left|\frac{\vec{V_{dn}}}{\vec{E}}\right| \quad , \quad \mu_p = \left|\frac{\vec{V_{dp}}}{\vec{E}}\right|$$

Par application des relations précédentes on trouve :

$$\mu_n = \frac{q\,\tau_n}{m_e^*} \quad \text{et} \quad \mu_p = \frac{q\,\tau_p}{m_p^*}$$

$\vec{V_d} = \mu \cdot \vec{E}$ « La mobilité est la constante de proportionalité entre la vitesse de dérive et le champ électrique »

La mobilité est considérée comme un facteur de qualité pour les s/c car lorsque $\mu \nearrow \Rightarrow V_d \nearrow \Rightarrow I \nearrow$

Par conséquent, plus la mobilité est grande mieux est le s/c

* Remarque : $\mu = f(\vec{E}, T, N_D, N_A,$ type du s/c$)$

a/ Influence des N_A et N_D : Voir figure -1-

b/ Influence de la température : Voir figure -2-

Conduction dans les s/c homogènes :

$\vec{E} \Rightarrow$ (s/c) $\Rightarrow$ Mvt orienté $\equiv$ Mvt de dérive $\Rightarrow \vec{V_d}$

$\Updownarrow$

Courant de conduction
$$\begin{cases} \vec{J}_{cn} = -qn\vec{V}_{dn} = +qn\mu_n\vec{E} \\ \vec{J}_{cp} = +qp\vec{V}_{dp} = +qp\mu_p\vec{E} \end{cases}$$

Or $\begin{cases} \vec{V}_{dn} = -\mu_n\vec{E} \\ \vec{V}_{dp} = +\mu_p\vec{E} \end{cases} \Rightarrow$

$\Downarrow$

$$\begin{cases} \sigma_n = qn\mu_n \\ \sigma_p = qp\mu_p \end{cases}$$

On sait que : $\vec{J} = \sigma\vec{E}$

Dans le cas où on a un déplacement des $\bar{e}$ et des $+$:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = qn\mu_n + qp\mu_p = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

$\hookrightarrow \underset{\text{La résistivité}}{\rho} = \dfrac{1}{\sigma} = \dfrac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)}$

$\hookrightarrow \underset{\text{La résistance}}{R} = \rho \cdot \dfrac{L}{S}$

$R \to 0 \Rightarrow$ s/c $\equiv$ conducteur
= Court circuit

$R \to \infty \Rightarrow$ s/c $\equiv$ Isolant parfait
= circuit ouvert

$\Downarrow$

$\rho \to \infty \Rightarrow n, p \to 0$

Courant de diffusion :

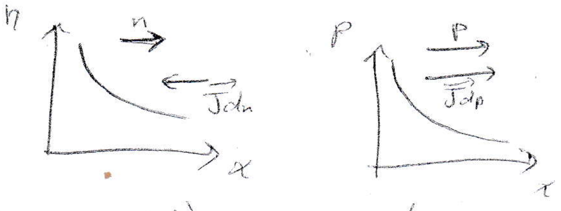
Si on a un $\overrightarrow{grad}$/n, p, on parle de courant de diffusion (distributi[on] non-uniforme des porteurs)

n ($\bar{e}$ maj)	p (+ maj)

3

D'après La Loi de Fick :
$$\begin{cases} \vec{J}_{dn} = qD_n\,\overrightarrow{grad}/n \\ \vec{J}_{dp} = -qD_p\,\overrightarrow{grad}/p \end{cases} < 0$$

D_n, D_p coefficients de diffusion



Par convention, on considère que le sens positif du courant est le sens inverse de déplacement des $\bar{e}$ et donc le même se[ns] de déplacement des trous

Cas d'un système unidimensionel $\Rightarrow$ $\begin{cases} J_{dn} = q D_n \cdot \dfrac{\partial n}{\partial x} \\ J_{dp} = -q D_p \cdot \dfrac{\partial P}{\partial x} \end{cases}$

Relation d'Einstein : $\dfrac{D_n}{\mu_n} = \dfrac{D_p}{\mu_p} = \dfrac{KT}{q} = U_T$

Potentiel thermodynam

à $T = 300°K$: $U_T = 0{,}026$ mV

Pour Si : $\mu_n = 1400$ cm²/VS
$\mu_p = 500$ cm²/VS $\Rightarrow$ $\Delta_n = 36{,}4$ cm²/s
$\Delta_p = 13$ cm²/s

Longueur de diffusion :

$L_n^2 = D_n \tau_n \Rightarrow L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$

$L_p^2 = D_p \tau_p \Rightarrow L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$

τ_n : durée de vie de l'ē

τ_p : durée de vie du t

ns < τ < ms

Conduction et diffusion :

$\Delta V + \Delta n, \Delta p \Rightarrow \vec{J} = \vec{J_c} + \vec{J_d}$

Pour les $\bar{e}$: $J_n = J_{cn} + J_{dn}$

Pour les t : $J_p = J_{cp} + J_{dp}$

$$J_n = J_{cn} + J_{dn} = qn\mu_n \vec{E} + qD_n \overrightarrow{grad}\, n \quad \text{--- (1)}$$

$$J_p = J_{cp} + J_{dp} = qp\mu_p \vec{E} - qD_p \overrightarrow{grad}\, p \quad \text{--- (2)}$$

D_n et $D_p = f(\mu_n, \mu_p)$

$\bar{e}$: $J_n = qD_n \left(\frac{n\vec{E}}{U_T} + \overrightarrow{grad}\, n \right)$ --- (3)

t : $J_p = qD_p \left(\frac{p\vec{E}}{U_T} - \overrightarrow{grad}\, p \right)$ --- (4)

Avec : $U_T = \frac{KT}{q}$ le potentiel thermodynamique

II.4 - S/C hors équilibre thermodynamique ($\not\rightleftarrows$) :

à $\rightleftarrows$: $n \times p = n_i^2$

* Remarque : Si le s/c est intrinsèque $\Rightarrow n = p = n_i$

Si le s/c est type n $\Rightarrow n \gg p$: $n \times p = n_i^2$

Si le s/c est type p $\Rightarrow p \gg n$: $n \times p = n_i^2$

$\not\rightleftarrows$: si $n \times p \neq n_i^2$
- $\to n \times p > n_i^2 \Rightarrow$ injection de porteurs
- $\to n \times p < n_i^2 \Rightarrow$ extraction de porteurs

$\Downarrow$

$$\begin{cases} n = n_0 \pm \Delta n \\ p = p_0 \pm \Delta p \end{cases}$$

densité à $\rightleftarrows$

(+) : injectés

(-) : extraits

* Remarque : on parle de faibles niveaux d'injection si :

Δn et $\Delta p \ll n_0$ et p_0

Forts niveaux d'injection : Δn et $\Delta p \gg n_0$ et p_0

Perturbation de l'équilibre :

L'état d'équilibre est perturbé dans le cas où le s/c se trouve sous l'influence de : $\vec{E}$, $\overrightarrow{grad}\, T$, $\overrightarrow{grad}\, n, p$, éclairage, rayonnement.

* Faible perturbation
$$\begin{cases} |\vec{E}| < 10^5 \text{ V/cm} \\ \overrightarrow{grad}\, n, p \\ \overrightarrow{grad}\, T \end{cases}$$

* Forte perturbation :
$|\vec{E}| > 10^6$ V/cm
Eclairage
Rayonnement

S/C $\not\rightleftarrows$

G-R : Génération - Recombinaison
Injection ; Extraction

G-R

Génération	Recombinaison
$g\ [cm^{-3}\cdot s^{-1}]$	$r\ [cm^{-3}\cdot s^{-1}]$
$g = f$(s/c , source extérieure)	$r = f(s/c)$

Le "g" mesure le nombre des porteurs générés par unité de volume et unité de temps

"r" mesure le nombre de porteurs recombinés par unité de volume et unité de temps

- **Retour à l'équilibre :**

A chaque fois que les concentrations des porteurs s'éloignent de n_0 et p_0, plusieurs phénomènes physiques apparaissent pour retrouver l'équilibre thermodynamique

Dans le cas d'une injection : Le retour à l'équilibre se fait par la recombinaison des minoritaires injectés avec les majoritaires

Dans le cas de l'extraction : Le retour à l'équilibre se fait par génération de paires ($\bar{e}$ - t)

Soit un s/c type n : Les ē sont majoritaires
les t sont minoritaires

$\not\rightleftarrows$

$$\begin{cases} n = n_0 + \Delta n \\ p = p_0 + \Delta p \end{cases} \quad \text{(En général } \Delta n = \Delta p\text{)}$$

$$n_0 \gg p_0$$

- **Equations de continuité :**

$g \begin{cases} \to g_n & \text{taux de génération} \\ \to g_p \end{cases}$

$r \begin{cases} \to r_n \\ \to r_p \end{cases}$ taux de recombinaison

$$\boxed{(\rightleftarrows) \Rightarrow g_p = r_p \quad g_n = r_n \quad G \equiv R}$$

$$\boxed{(\not\rightleftarrows) \quad G \not\equiv R}$$

Taux net G-R : $\begin{cases} U_n = r_n - g_n \\ U_p = r_p - g_p \end{cases}$

si $\begin{cases} U_n \text{ et } U_p > 0 \Rightarrow \text{Recombinai[son]} \\ U_n \text{ et } U_p < 0 \Rightarrow \text{Génératio[n]} \end{cases}$

b) Les équations de continuité : $\begin{cases} \dfrac{\partial p}{\partial t} = -U_p - \dfrac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J_p} \\ \dfrac{\partial n}{\partial t} = -U_n + \dfrac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J_n} \end{cases}$

Elles permettent de faire le bilan des phénomènes quand le s/c est $(\not\rightleftarrows)$

5

G-R des porteurs en excès :

s/c

↙ ↘

G-R directe — G-R indirecte

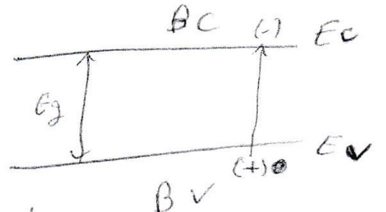
G-R Bande à Bande — G-R par centres recombinants

(B-B)

A chaque fois qu'un s/c s'éloigne de $\rightleftarrows$, il apparaît plusieurs mécanismes qui ont pour but de rétablir cet $\rightleftarrows$.

1) G-R directe : (B-B)

On considère un s/c intrinsèque



$\bar{e}\nearrow$ = rupture des liaisons covalentes $\Rightarrow$ faire passer les $\bar{e}$ de BV à BC

On fait générer instantanément en nombre égal des $\bar{e}$ et des trous

$$g_n = g_p = g$$

Toujours en abscence d'énergie extérieure, un $\bar{e}$ libre perd de l'énergie et se recombine avec un trou

$$r_n = r_p = r$$

$$r = \underset{\text{const} = f(s/c,\,T)}{\underset{\downarrow}{K'}} . n p$$

A $\rightleftarrows$: $n = p = n_0 = n_i$

$$n \times p = n_i^2 \quad : \quad n_0^2 \times p_0^2 = n_i^2$$

$$g_{th} = r = K'.n_0p_0 = K' n_i^2$$

En abscence d'énergie extérieure $g = g_{th}$: $U_n = U_p = U = r - g = K'np - K'n_i^2 = K'(np - n_i^2)$

Or : $n = n_0 + \Delta n$

$p = p_0 + \Delta p$

$\hookrightarrow U = K'\left[(n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p) - n_i^2\right] = K'.\Delta p\,(n_0 + p_0 + \Delta n)$

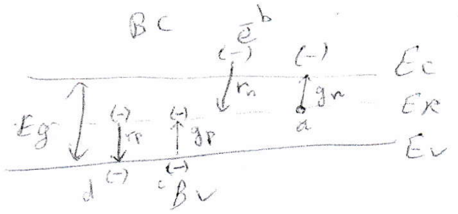
2) G-R indirecte : CR

Souvent les mécanismes de G-R directe sont masqués par les mécanismes de G-R indirecte :

$CR \equiv$ Défaut de structure : / impureté

$\Downarrow$

niveaux profonds dans E_g



Pour un seul niveau correspond quatre phénomènes :

a) Emission d'un ē de E_R vers BC : g_n (génération d'un ē)

b) Capture d'un ē par le niveau E_R : r_n (recombinaison d'ē)

c) 1ē de BV $\rightarrow E_R$: g_p

d) 1ē de $E_R \rightarrow$ BV : r_p

En régime statique : nbre d'ē $\rightarrow E_R$ = nbre d'ē $\nearrow E_R$

$\Downarrow$

$U_n = U_p$

Or : $\begin{cases} U_n = r_n - g_n \\ U_p = r_p - g_p \end{cases} \Rightarrow \boxed{r_n + g_p = g_n + r_p}$

• Remarque : Il existe d'autres classements des phénomènes de G-R en fonction de l'énergie des porteurs

On parle de la recombinaison radiative, non-radiative, Auger

• La durée de vie des porteurs minoritaires :

S/C type n $\nearrow n_0 \gg p_0$

$n = n_0 + \Delta n \simeq n_0$

$p = p_0 + \Delta p$

U_n, U_p taux nets des G-R

$A \rightleftarrows$ on suit les majoritaires

$A \not\rightleftarrows$ on s'intéresse aux minoritaires

On pose $U_n = \frac{\Delta n}{\tau_n} \rightarrow$ type p ; $U_p = \frac{\Delta p}{\tau_p} \rightarrow$ type n

Durée de vie

G-R (B-B) : $U = k'(p_0 + n_0 + \Delta p)\Delta n$

$\Rightarrow \tau = \frac{1}{k'(p_0 + n_0 + \Delta p)\Delta n}$

Pour le type n : $p_0 << n_0$ $\quad n \simeq n_0$

$\Delta n << n_0$ $\quad p = p_0 + \Delta p$

$$\hookrightarrow \boxed{\tau_p = \frac{1}{k' \cdot n_0}}$$

Pour le type p : $p_0 >> n_0$ $\quad n = n_0 + \Delta n$

$\Delta p << p_0$ $\quad p = p_0 + \Delta p \simeq p_0$

$$\hookrightarrow \boxed{\tau_n = \frac{1}{k' \cdot p_0}}$$

G-R (CR) : $\boxed{\tau_p = \frac{1}{N_R \cdot C_p}}$ $\quad \boxed{\tau_n = \frac{1}{N_R \cdot C_n}}$

N_R : concentration des centres recombinants

C_p : Coef. de capture des trous

C_n : Coef. de capture des $\bar{e}$

Finalement, les équations de continuité s'écrivent :

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &= -\frac{\Delta p}{\tau_p} - \frac{1}{q}\frac{\partial J_p}{\partial x} \\ \frac{\partial n}{\partial t} &= -\frac{\Delta n}{\tau_n} + \frac{1}{q}\frac{\partial J_n}{\partial x} \end{aligned}}$$

خلاصة:

يتكون النظام الأساسي المستعمل لتحليل السلوك الكهربائي لنصف ناقل من معادلات التيار الكهربائي و معادلات الاستمرارية، علما أن:

$$\begin{cases} \vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p \\ \nabla^2 V = -\dfrac{\rho}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \\ \vec{E} = -\vec{grad}\, V \end{cases}$$

في نظام وحيد الاتجاه، تكتب المعادلات على الشكل:

$$J_p = qD_p\left(p\frac{E}{U_T} + \frac{\delta p}{\delta x}\right) \qquad J_n = qD_n\left(n\frac{E}{U_T} + \frac{\delta n}{\delta x}\right)$$

$$\frac{\delta p}{\delta t} = -\frac{\Delta p}{\tau_p} + \frac{1}{q}\cdot\frac{\delta J_p}{\delta x} \qquad \frac{\delta n}{\delta t} = -\frac{\Delta n}{\tau_n} + \frac{1}{q}\cdot\frac{\delta J_n}{\delta x}$$

8

$$E = -\frac{\delta v}{\delta x}$$

$$\frac{\delta^2 v}{\delta x^2} = -\frac{q\left(p - n + N_D - N_A\right)}{\varepsilon_r}$$

$$J = J_n + J_p$$

$$\begin{cases} Dn = \mu_n . U_T \\ Dp = \mu_p . U_T \\ U_T = \dfrac{KT}{q} \end{cases}$$

8