Semi-Conducteurs

résistivité → $\rho = \frac{1}{\sigma}$ conductivité

⇒ Semi conducteur $[10^{-3}; 10^{8}]$ Ω.Cm

Les Cristaux :

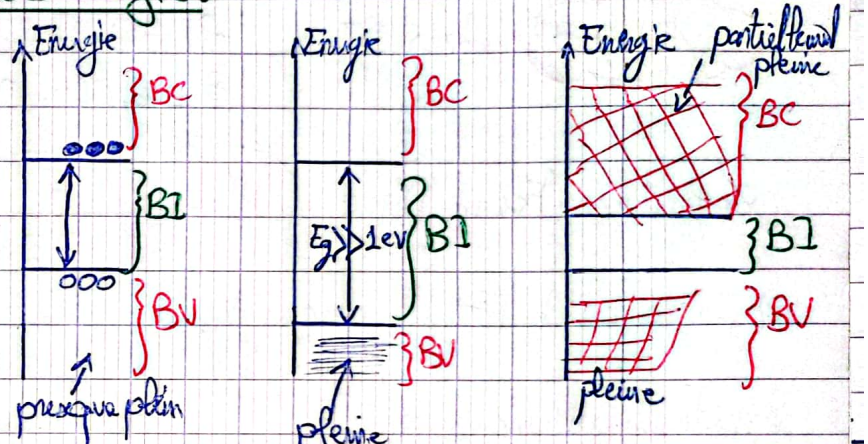
- **État désordonné** : Gaz, liquides, solide amorphe → arrangement aléatoire des atomes
- **Etat ordonné** : L'état cristallin où les atomes sont disposés de manière ordonnée

Cristaux ioniques	cristaux métallique	Cristaux Covalents
Association d'atome • forment électropositif (1 seul atome périphérique) Li, Na, K, Rb, Cs • forment électn (7e⁻ périphérique) F, Cl, Br, I • forte énergie de liaison • pas d'e⁻ libre, les isolants	formés par des électro-positive (les métaux alcalins Na, Cl, les métaux nobles Ag, Al, ...) les e⁻ périphériques sont libérés, les cristaux formés d'un réseau d'ions (+) et d'un gaz d'e⁻ libres : ces les conducteurs	les atomes du colonne 4 (Ge, Si) participe chaque atome avec 4e⁻ pour acceptés 4e⁻ des atomes voisin pour former 4 liaisons covalent autres atomes dans les colonnes 3,5 ainsi que 6 As Ga, In P

Les Semi-Conducteurs (sc) :

sont des matériaux sous forme de cristaux covalents qui caractérise par une valeur de résistivité intermédiaire entre celle des isolants $[10^{8}-10^{18}]\ \Omega.Cm$ et celle des conducteurs $[10^{-3}-10^{3}]\ \Omega_{Cm}$ (1)

* Bande d'énergie :



La bande d'énergie est constitué d'un ensemble de niveaux discret qui sont tellement proche considéré comme continue.

- Pour T assez basse (proche de ~0) : e⁻ sont bien lié aux atomes et le conduction n'est pas possible.
- Pour T s'élevée, les vibrations thermique des liaisons covalentes donc le libération d'e⁻.

* Population des Porteurs :

1- Densités des états : C'est le nbre d'états (niveaux) d'énergie par unité de volume compris entre E et E+dE

$D_n(E) = 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2}$ dans la BC (pour e^-)

$D_p(E) = 4\pi \left(\frac{2m_p}{h^2}\right)^{3/2} (E_v - E)^{1/2}$ dans la BV (pour les trous)

$D(E) = 0$ dans BI

h : cst de Planck

$h = 6,625.10^{-34}$ J.s

La fonction Fermi-Dirac $F_n(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$

E_F : niveau de Fermi : niveau fictif dans la proba. est égale à $\frac{1}{2}$

$0 < F_n(E) < 1$

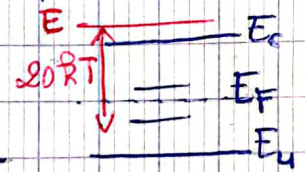
k : cste de Boltzmann $k = 1,381.10^{-23}$ J/K

$1eV = 1,6.10^{-19}$ J

à 300K ; $\Rightarrow kT = 0,0259 eV$

- à $T = 0K$, $F_n(E) = \begin{cases} 1 \text{ pour } E < E_F \\ 0 \text{ pour } E > E_F \end{cases}$
- Si $E - E_F = 3kT \Rightarrow F_n(E) = 0,05$
- Si $E - E_F = -3kT \Rightarrow F_n(E) \simeq 1$
- Si $E - E_F > 3kT \Rightarrow F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$

$F_n(E) \simeq \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)$



pour le trou : $F_p(E) = 1 - F_n(E)$

* Concentration de porteur dans un SC intrinsèque (suite)

• Concentration des e^- dans la BC : (n)



$dn = D_n(E) F_n(E) dE$

$n = \int_{E_c}^{\infty} D_n(E) F_n(E) dE$; Mq $n = N_c \exp -\left(\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$

avec $\int_0^{\infty} x^{1/2} e^{-x} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$

$n = \int_{E_c}^{\infty} D_n(E) F_n(E) dE = \int_{E_c}^{\infty} 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} (E - E_c)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) dE$

$X = \frac{E - E_c}{kT}$; $dX = \frac{dE}{kT}$

$n = 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{kT} \int_{E_c}^{\infty} \left(\frac{E - E_c}{kT}\right)^{\frac{1}{2}} \exp -\left(\frac{(E - E_c) + (E_c - E_F)}{kT}\right) \frac{dE}{kT} \Rightarrow dE = dX(kT)$

$= 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} (kT)^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right) \int_0^{\infty} X^{\frac{1}{2}} e^{-X} dX$

$= N_c \exp -\left(\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$ avec $N_c = \frac{2}{h^3} (2\pi m_n kT)^{3/2}$

• Concentration des trous : (P)

on peut montrer de même que $p = N_v \exp -\left(\frac{E_F - E_v}{kT}\right)$

avec $N_v = \frac{2}{h^3} (2\pi m_p kT)^{3/2}$

N_c : densité effective des état dans la BC

N_v densité effective des états dans la BV

n_i : Concentration intrinsèque

Dans un S.C intrinsèque on a : $n = p = n_i$

• Mq pour S.C intrinsèque :

$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}$

(2)

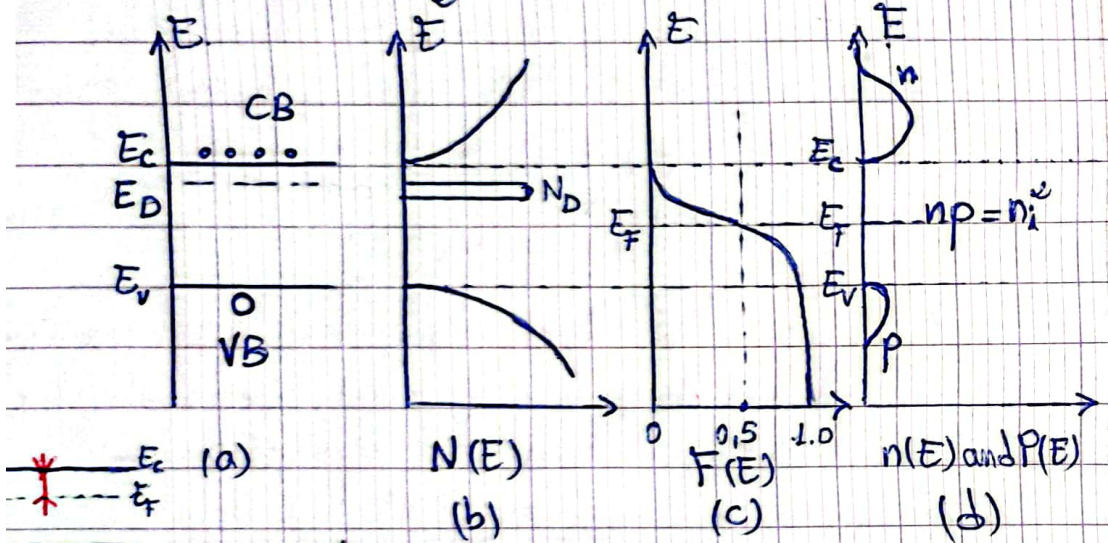
$\Rightarrow N_D = N_c \exp\left[-\left(\frac{E_c - E_{Fn}}{kT}\right)\right] \Rightarrow_{Ln} E_c - E_{Fn} = kT \ln\left(\frac{N_c}{N_D}\right)$

$N_D \nearrow \Rightarrow \frac{N_c}{N_D} \searrow \Rightarrow Ln\frac{N_c}{N_D} \searrow \Rightarrow E_c - E_{Fn} \searrow$

(A) $-n + p + N_D = 0$ et $np = n_i^2 \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{n}$

$-n^2 + n_i^2 + nN_D = 0 \Rightarrow \Delta = N_D^2 + 4n_i^2$

$\Rightarrow \begin{cases} n_{i1} = \frac{+N_D - \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}{2} < 0 \text{ imp} \\ n_{i2} = \frac{N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}{2} \end{cases}$



S.C de type P:

Lorsqu'un sc de la colonne IV soit par ex Si se dope par une impureté de la colonne III,

L'expression de la concentration des trous p_p dans ce cas:

Loi d'action de masse : $n_p p_p = n_i^2$ (*)

Neutralité électrique : $n_p(-q) + p_p(+q) + N_A(-q) = 0$ (**)

(*) $\Rightarrow n_p = \frac{n_i^2}{p_p}$ (**) $\Rightarrow p_p^2 - p_p N_A - n_i^2 = 0$

$\Delta = N_A^2 + 4n_i^2$ et la sol^{le} $p_p = \frac{N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2}}{2}$

pratiquement, cas des sc: $N_A \gg n_i$; $\Rightarrow \begin{cases} p_p \approx N_A \\ n_p = \frac{n_i^2}{N_A} \end{cases}$ ← concentration des trous

La position du niveau de Fermi : E_{Fp}

• Mq : $E_{Fp} - E_v = kT\,Ln\left(\frac{N_v}{N_A}\right)$ $p_p = N_v \exp\left(-\left(\frac{E_F - E_v}{kT}\right)\right)$

$N_A = N_v \exp -\left(\frac{E_{Fp} - E_v}{kT}\right) \Rightarrow Ln\frac{N_A}{N_v} = -\left(\frac{E_{Fp} - E_v}{kT}\right)$

$\Rightarrow E_F - E_v = kT\,Ln\left(\frac{N_v}{N_A}\right)$

$N_A \nearrow \Rightarrow \frac{N_v}{N_A} \searrow \Rightarrow Ln\left(\frac{N_v}{N_A}\right) \searrow \Rightarrow (E_{F_p} - E_v) \searrow$

• Pour le dopage Si: L'As et B sont le plus utilisées.

• As ∈ C(V) $N_D(+q)$; B ∈ C(III) $N_A(-q)$

pour $n=p \Rightarrow \frac{N_v}{N_c} = \exp\left(\frac{2E_F - E_v - E_c}{kT}\right)$ $\Big\downarrow Ln$

$Ln\frac{N_v}{N_c} = \frac{2E_F - E_v - E_c}{kT}$ (Remplir)

d'où $E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} Ln \frac{N_v}{N_c}$

A température basse T↓, le 2nd terme est très faible devant le 1er ⇒ le niveau de Fermi intrinsèque est pratiquement au milieu de la BI.

- Loi d'action de masse à l'équilibre thermique : $np = n_i^2$ avec $\begin{cases} n = n_i \text{ et} \\ p = n_i \end{cases}$

Rq : $n_i = \sqrt{N_c N_v}\exp\left[-\left(\frac{E_g}{2kT}\right)\right]$; $E_g = E_c - E_v$

(Rq) ⇒ pour $np = n_i^2$ ⇒ $N_c \exp^{-}\left(\frac{E_c - E_F}{kT}\right) \times N_v \exp\left(\frac{E_F - E_v}{kT}\right) = n_i^2$

↳ $n_i = \sqrt{N_c N_v}\exp\left[-\left(\frac{E_g}{2kT}\right)\right]$ avec $E_g = E_c - E_v$

Rq : lorsque T↗ ; E_g↘ et n_i↗

* Semi-Conducteurs extrinsèques : $[10^{-8} - 10^{-}$

sce type N :

pour $\begin{cases} \text{S-C} \in \text{colonne IV du tableau P (Si par exp)} \\ \text{l'élt dopant} \in \text{à la colonne V (Pour As)} \end{cases}$ } Abus un at

As remplace un atome Si dans le réseau cristalin

↳ 4 e⁻ p. constituent des liaisons covalentes avec leurs voisins S

- charge d'e⁻ : −q
- charge de trou : +q

$E_g = E_c - E_v$

E_c ; E_D ; E_i ; E_F ; E_v

↳ As est un atome donneur d'où le S-C est dopé N ou type

N_D : nbre d'atomes donneurs → il y a N_D niveaux d'énergie

- Neutralité électrique imposée : $\sum$ charge(+) $\sum$ charge(−) = 0

* L'expression de la Concentration de Porteurs libres :

- loi d'action de masse pour une S-C extrinsèque : $np = n_i^2$
- la neutralité c.à.d : $n(-q) + p(+q) + N_D(+q) = 0$

Rq ⇒ $n = N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}$ ⇒ Tourner la page (A)

on a (j'ai) pratiquement ($100K \leq T \leq 500K$) : $N_D \gg n_i$ ⇒ $\begin{cases} n_n \approx N_D \\ p_n \approx \frac{n_i^2}{N_D} \end{cases}$

(exp : $N_D = 10^{16}\,cm$, $n_i = 10^{10}\,cm$)

(3)

Notation : E_{F_n} : le niveau de Fermi du S.C extrinsèque

E_{F_i} : le niveau de Fermi du S.C intrinsèque.

- en $x = -l_n$ allant vers $x = 0$:

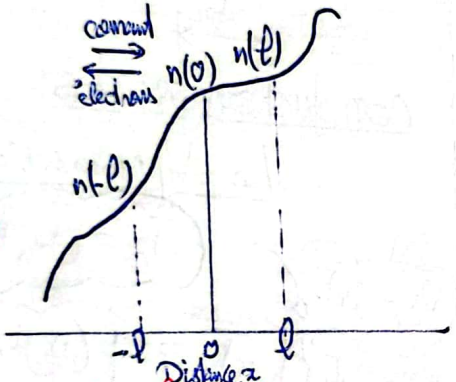
$$f_{n1} = \frac{1}{2} \frac{n(-l_n) l_n}{\tau_n} \Rightarrow f_{n1} = \frac{1}{2} n(-l_n) v_{th_n}$$

Le taux moyen de flux d'e⁻ par unité de surface.

- en $x = l_n$ allant vers $x = 0$:

$$f_{n2} = \frac{1}{2} n(+l_n) v_{th_n}$$

Le taux moyen de flux d'e⁻ par unité de surface



le sens positif est le sens de x croissant : $f_n = f_{n1} - f_{n2}$

$$\Rightarrow f_n = \frac{1}{2} \left(n(-l_n) - n(+l_n) \right) v_{th_n}$$

- En utilisant la formule de Taylor (faire approx à $x = \pm l_n$)

$$n(\pm l_n) = n(0) \mp l_n \frac{dn(0)}{dx}$$

Alors $f_n = \frac{1}{2} v_{th} (-2) l_n \frac{dn(0)}{dx}$

$$\Rightarrow f_n = -D_n \frac{dn(0)}{dx}$$

1ère loi de Fick : indique que les e⁻ se déplacent des régions de fortes concentrations vers les régions de faibles concentrations

D_n : la diffusivité (coeff. de diffusion) des électrons

$l_n = v_{th_n}$

$$J_{n,diff} = -q f_n \Rightarrow J_{n,diff} = q D_n \frac{dn}{dx}$$

donc $J_{p,diff} = q f_p = -q D_p \frac{dp}{dx}$

↳ En général : $\vec{J}_{n,diff} = q D_n \overrightarrow{grad}(n)$

$\vec{J}_{p,diff} = -q D_p \overrightarrow{grad}(p)$

Relation d'Einstein :

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

Cas général : $\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p$ et $\begin{cases} \vec{J}_n = q n \mu_n \vec{E} + q D_n \overrightarrow{grad}(n) \\ \vec{J}_p = q p \mu_p \vec{E} - q D_p \overrightarrow{grad}(p) \end{cases}$

donc $\begin{cases} \vec{J}_n = \mu_n (q n \vec{E} + kT \overrightarrow{grad}(n)) \\ \vec{J}_p = \mu_p (q p \vec{E} - kT \overrightarrow{grad}(p)) \end{cases}$

R. Directe

- Pour $P_n = n_i^2$ (Le taux de recombinaison)

$R_{th} = \beta n_n p_n$ (n_n : nbre de trous disponible dans la B.V. ; p_n : nbre d'e⁻ disponible dans la B.C ; β : cst de proportionnalité pour un SC de type n)

- En équilibre thermique pour un SC de type n :

$G_{th} = R_{th} = \beta n_{n_0} p_{n_0}$

Le taux de génération ; n_{n_0} : densité de trous ; p_{n_0} : densité d'e⁻

0 : indique une état d'équilibre

- $R = \beta n_n p_n$
- $G = G_{th} + G_{ph}$

$\Delta n = n_n - n_{n_0}$

$\Delta P = P_n - P_{n_0}$

les concentrations en excès de porteurs

* pour les électrons :

- $\langle E_{cn} \rangle = \frac{1}{2} m_n v_{th}^2$ pour $v_{th} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$
- $\langle E_{cn} \rangle = \frac{3}{2} kT$

v_{th} : Vitesse thermique moyenne

- à $T = 300K \Rightarrow \langle E_{cn} \rangle = 10^7$ cm/s (silicium et l'arsenium de gallium)
- $l_n = v_{th} \tau_n$ — le libre parcours moyen — le temps de libre parcours moyen.

$-q\vec{E}\tau_n = m_n \vec{v}_{dn} \Rightarrow \vec{v}_{dn} = -\frac{q\tau_n}{m_n}\vec{E}$

$-q\vec{E}\tau_n$: la quantité de mvt appliquée à un $\vec{e}$; $m_n \vec{v}_{dn}$: la quantité de mvt gagné

$\mu_n = \frac{q\tau_n}{m_n}$ Alors $\vec{v}_{dn} = -\mu_n \vec{E}$

μ_n : mobilité électronique

* Pour les trous :

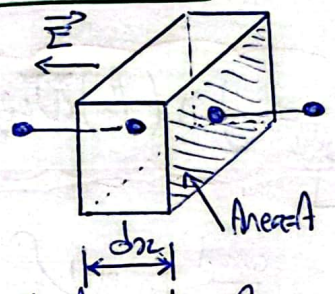
$l_p = v_{th_p} \tau_p$

$\vec{v}_{dp} = \mu_p \vec{E}$ ← Pas de signe (-) (car les trous dérive dans le même sens que $\vec{E}$)

v_{dp} est la vitesse de dérivé du trou

μ_p : la mobilité du trou $\mu_p = \frac{q\tau_p}{m_p}$

* Loi d'ohm



conduction dans le sc

$dN_n = n\,dV = n A\,dx_n$

$dx_n = v_{dn}\,dt$

$dN_p = p\,dV = pA\,dx_p$

$dx_p = v_{dp}\,dt$

nbre de trous / cm³ ; libre de trous

Le déplacement de Brtans crée un courant de densi

$\vec{J}_c = \vec{J}_n + \vec{J}_p$ $J_c = \frac{1}{A}\frac{dQ}{dt} = \frac{\pm 1}{A} q \frac{dN}{dt}$

Car $\vec{v}_{dn} = -\mu_n \vec{E}$; $\vec{v}_{dp} = \mu_p \vec{E}$

$\vec{J}_c = q(n\mu_n + p\mu_p)\vec{E} = \sigma \vec{E}$

c'est la loi d'ohm microscopique

$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$ ← conductivité du semi conducteur (exprime en $\Omega^{-1}.m^{-1}$)

- Cas d'un sc intrinsèque : on a $n = p = n_i \Rightarrow \sigma = q(\mu_n + \mu_p) n$

Rq :

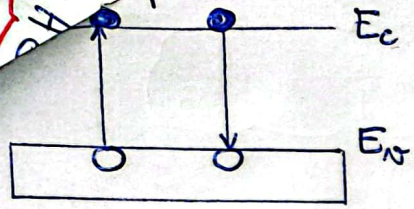
* Si T ↗ $\Rightarrow \sigma$ ↗ $\Rightarrow$ la résistance d'un sc R ↘ (conductivité $R \propto \frac{\rho l}{s}$; Rés proportionnelle à la résistivité $\rho = \frac{1}{\sigma}$)

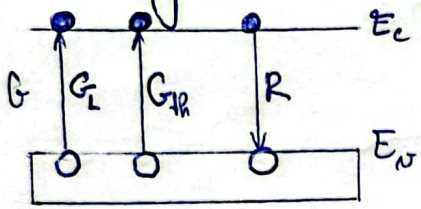
Exemples :

- sc de type n : $n \simeq N_D$; donc p est négligeable
  ① ↳ $\sigma \simeq q N_D \mu_n$; si N_D ↗ $\Rightarrow \sigma$ ↗
- sc de type p : $p = N_A$; donc n est négligeable
  $\Rightarrow \sigma = q N_A \mu_p$; si N_A ↗ $\Rightarrow \sigma$ ↗

CamScanner

pour maintenir la neutralité globale de la charge.





- si $G > R$: injection (Augmentation de la densité des Porteurs)
- si $G < R$: extraction (Diminution de la densité des Porteurs)

Le taux de changement de concentration de trous est :

$$\frac{dp_n}{dt} = G - R = G_L + G_{th} - R$$

- En Régime Permanent : $\frac{dp_n}{dt} = G_L - U$; $U = R - G_{th}$
- Régime à faible injection : Δp ; $p_{n_0} \ll n_{n_0}$

À l'équilibre thermique : $U = 0$

La cste de Recombinaison durée de vie τ_p : $\tau_p = \frac{1}{\beta n_{n_0}}$

En R.P : $G_L = U = \frac{\Delta p}{\tau_p}$

- $p_n = p_{n_0} + \Delta p$
- $\Delta p = \Delta n = p_n - p_{n_0}$
- Condition aux limites : $\begin{cases} p_n(t=0) = p_{n_0} + \dots \\ p_n(t \to \infty) = p_{n_0} \end{cases}$

$$* \quad \frac{dp_n}{dt} = G_L - \frac{p_n}{\tau_p} = \dots = -\frac{}{\tau_p}$$

$\left(G_L = \frac{\Delta p}{\tau_p}\right)$ $\quad X = p_n - p_{n_0}$

$\frac{dx}{dt} = -\frac{\dots}{\dots} \rightarrow Ln(X) = -\dots + C$; $C = Cst$

$\rightarrow X = Ke^{\dots} \Rightarrow p_n - p_{n_0} = K \tau_p$.

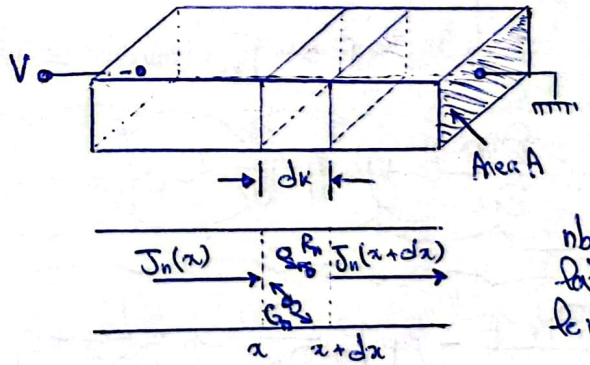
Comme $p_n(t=0) = p_{n_0} + \dots \Rightarrow K = \dots$

d'où $p_n = p_{n_0} + \dots$

$$G_L = U = \frac{p_n - p_{n_0}}{\tau_p}$$

En régime stationnaire et de faible injection

* Équation de Continuité



nbre d'e^- entrant dans l'tranche en x, moins le nbre d'e^- sortant en x+dx

Le taux de variation global du nombre d'e^- dans l'tranche est : $\frac{\partial n}{\partial t} A\,dx = \left[\frac{J_n(x)A}{-q} - \frac{J_n(x+dx)A}{-q}\right] + (G_n - U_n) A\,dx$

(courant rentrant) (courant sortant)

A : section ; $A\,dx$: volume de l'tranche

• l'eq. de base de la continuité pour les e^- :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = +\frac{1}{q}\frac{\partial J_n(x)}{\partial x} + (G_n - U_n)$$

• —— pour les trous : $\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q}\frac{\partial J_p(x)}{\partial x} + (G_p - U_p)$

* Cas unidimensionnel dans des conditions de faible injection :

$$U_n = \frac{n_p - n_{p_0}}{\tau_n} \qquad U_p = \frac{p_n - p_{n_0}}{\tau_p}$$

• $J_n = q\mu_n n E + qD_n \frac{\partial n}{\partial x} dx \Rightarrow \frac{1}{q}\frac{\partial J_n}{\partial x} = \mu_n \frac{\partial n}{\partial x} E + \mu_n n \frac{\partial E}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$

• $J_p = q\mu_p p E - qD_p \frac{\partial p}{\partial x} dx \Rightarrow -\frac{1}{q}\frac{\partial J_n}{\partial x} = -\left(\mu_p \frac{\partial p}{\partial x} E + \mu_p p \frac{\partial E}{\partial x}\right) + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$

* les eq. de continuité pour les porteurs minoritaires (c'est-à-dire un semi-conducteur de type p ou p_n dans un SC de type N)

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \mu_n \frac{\partial n_p}{\partial x} E + \mu_n n_p \frac{\partial E}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + G_n - \frac{n_p - n_{p_0}}{\tau_n}$$

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\mu_p \frac{\partial p_n}{\partial x} E - \mu_p p_n \frac{\partial E}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + G_p - \frac{p_n - p_{n_0}}{\tau_p}$$

CamScanner