

# Chapitre II. Éléments de physique des semiconducteurs

- 2.1. Matériaux en microélectronique
- 2.2. Porteurs de charge dans les semiconducteurs
- 2.3. Concentration des porteurs de charge
- 2.4. Courants dans les semiconducteurs
- 2.5. Semiconducteurs à non-équilibre
- 2.6. Les équations de base de la physique des semiconducteurs

## 2.1. Matériaux en microélectronique

- (1) *Matériaux isolateur*:  $\rho > 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$  și  $E_G > 7\text{eV}$ .

Ex: ...

- (2) *Matériaux semiconducteurs* :  $10^{-1} < \rho < 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ ,  
 $0.3\text{eV} < E_G < 7\text{eV}$ .

Ex:....

Pt. Si  $\rho_{\text{Si}} = 240\text{k}\Omega\text{cm}$ ,  $E_{G-\text{Si}} = 1.11\text{eV}$ .

- (3) *Matériaux conducteurs (de ord. I)*:  $\rho < 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$   
( $\rho_{\text{Ag}} = 16\text{n}\Omega\text{cm}$ ), et  $E_{G-\text{met}} = 0\text{eV}$ .

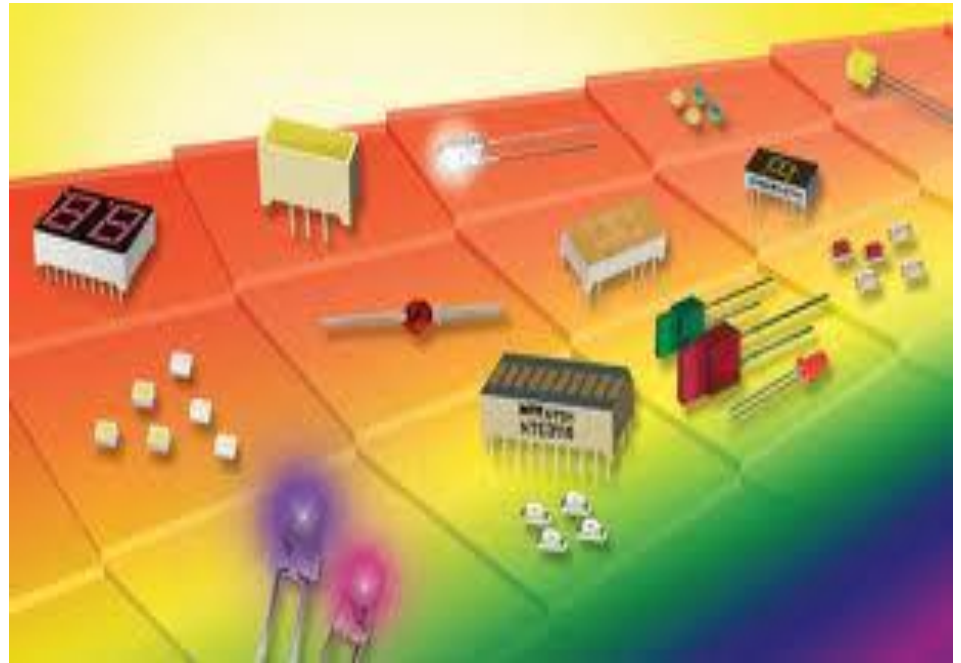
Ex: ....

# Zone de production pour DE

- l'industrie des semi-conducteurs



1 → G  
2 → D  
3 → S



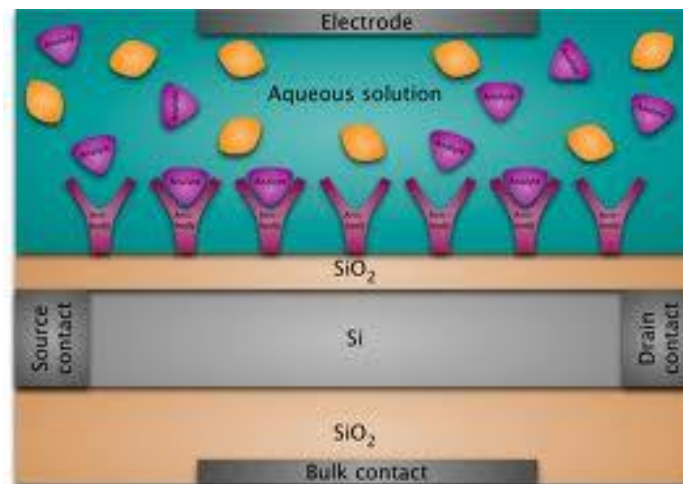
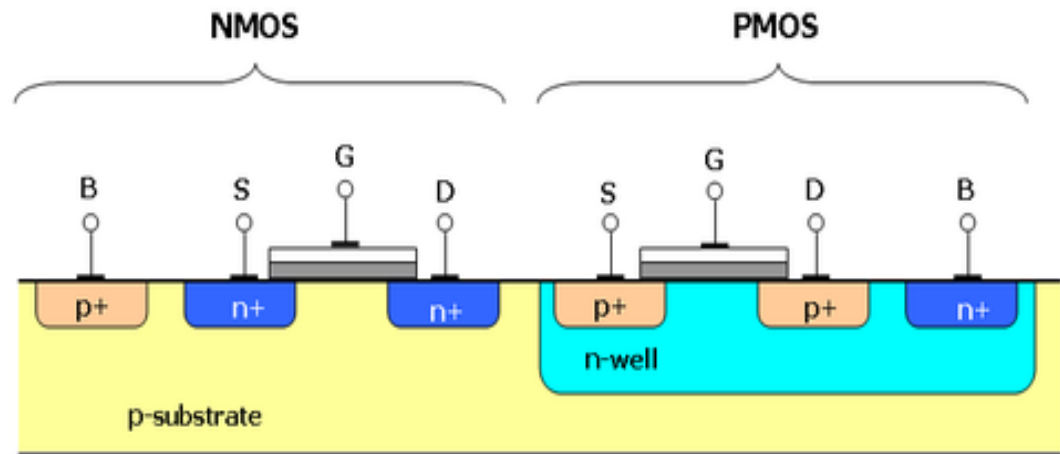
# Zone de production pour DE

- Salle blanche



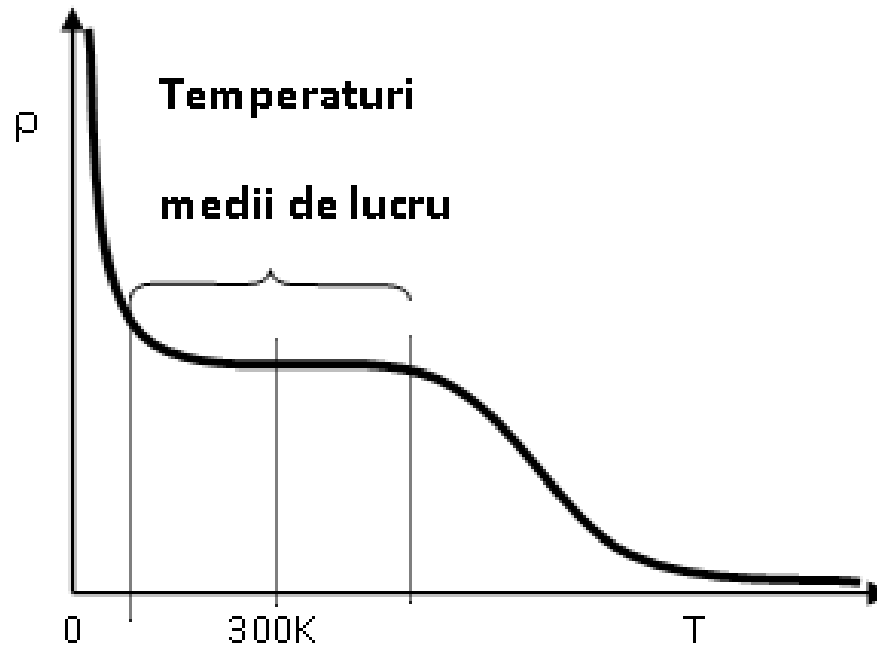
# Zone de production pour DE

- CMOS.
- 2011 – 130nm
- 2013-2020 – 18nm
- $X_{ox}$  – 3...1nm.



## 2.1.... (au paragraphe. 2.1)

- Dep.  $\rho$ -T



• Fig. 2.1. Dep.,  $\rho$ -T.

## 2.2. Porteurs de charge dans les semiconducteurs

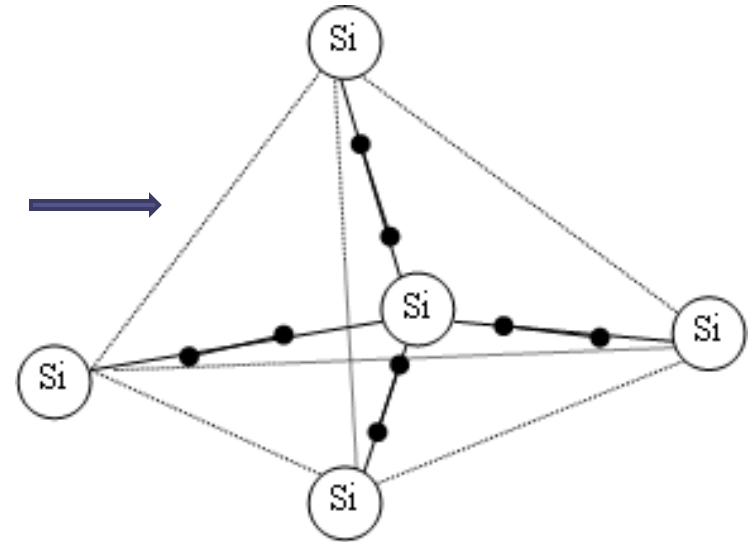
### 2.2.1. Cellule elementaire de Si

- Si, Ge și C = éléments avec 4 e-

- 

- T ~ 300K pairs électron-trou (electron-gol).

Pour Si →



## 2.2.2. La structure de bandes énergétiques

- La relation d'incertitude du Heisenberg :

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

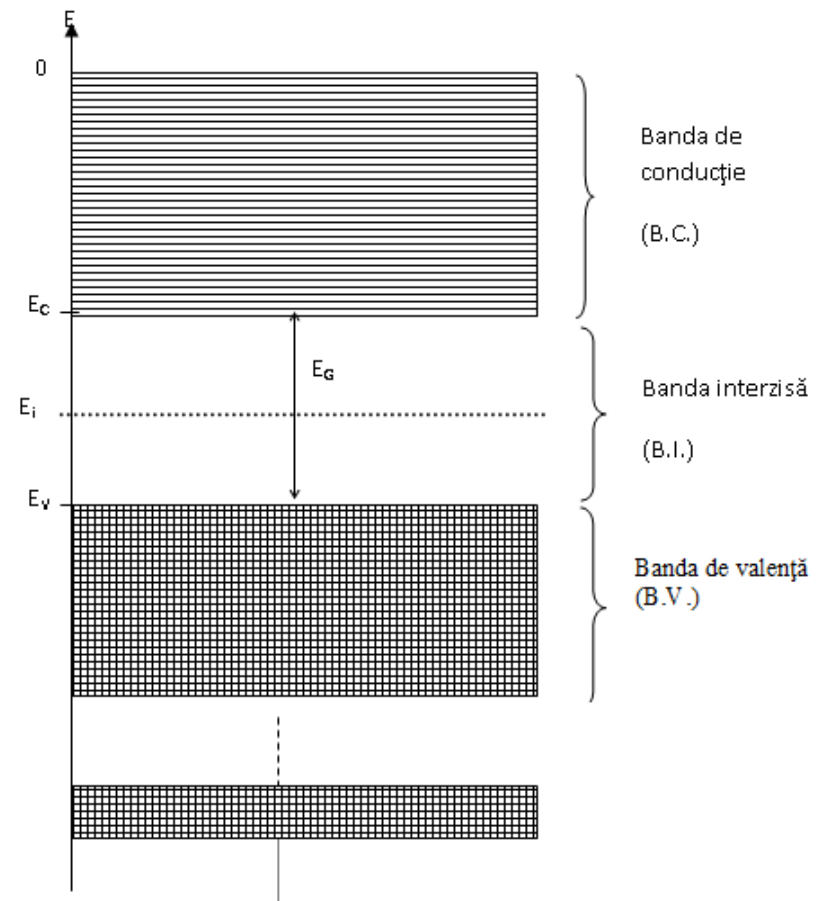
- Ainsi ils apparaissent :

$BC \leftarrow E_G \rightarrow BV$ , Fig. 2.3.

Les niveaux se fendent.

La scission de niveau

Bande: profonde, de valence, conduction, interdite.

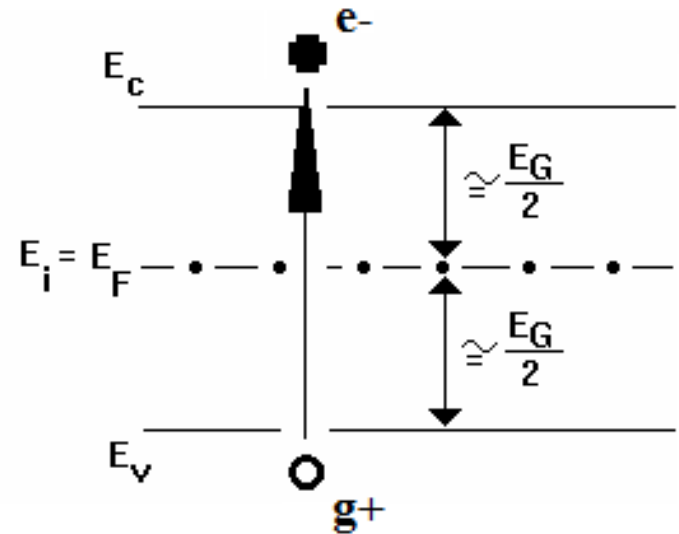




## 2.2.3. Bandes d'énergie en Semic. intrinsèque

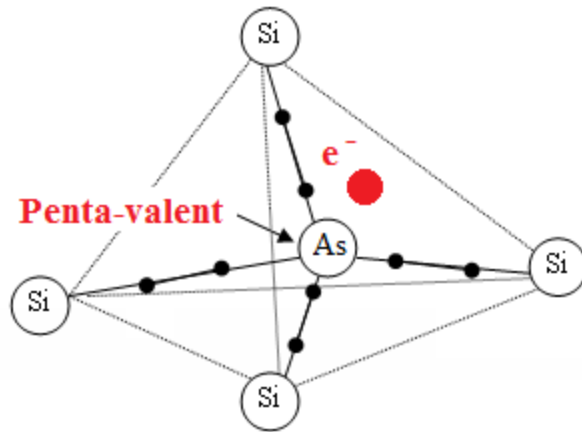
Sc. pur et sans d'impuretés

- A  $T=0K$ , BV est entièrement occupé, fig. 2.3.
- A  $T>0K$  apparaît une probabilité de générer des paires e-g, Fig. 2.4 →

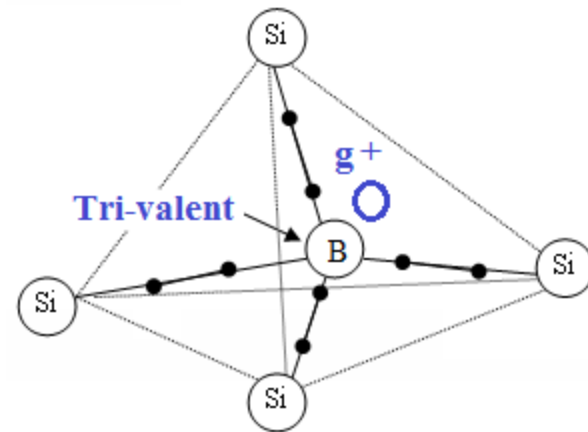


## 2.2.4. Semiconductor extrinsèque

- A) Type n, dopage  $N_D$ .



- B) Type p, dopage  $N_A$ .



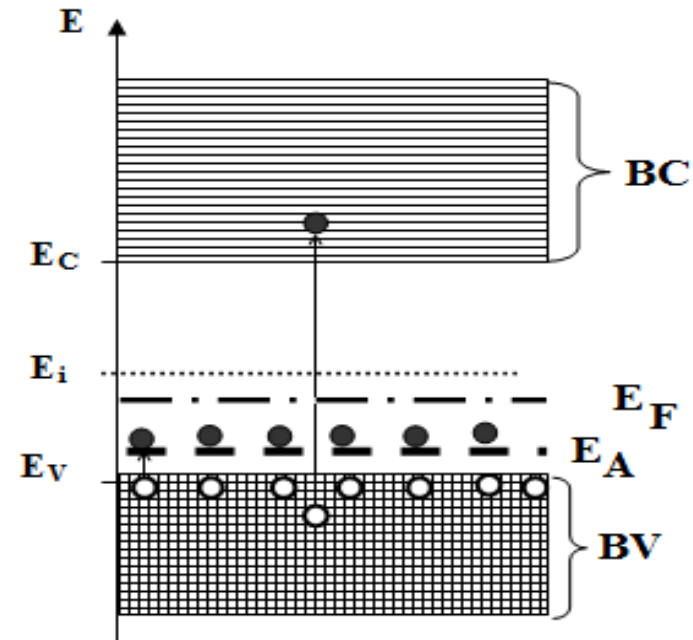
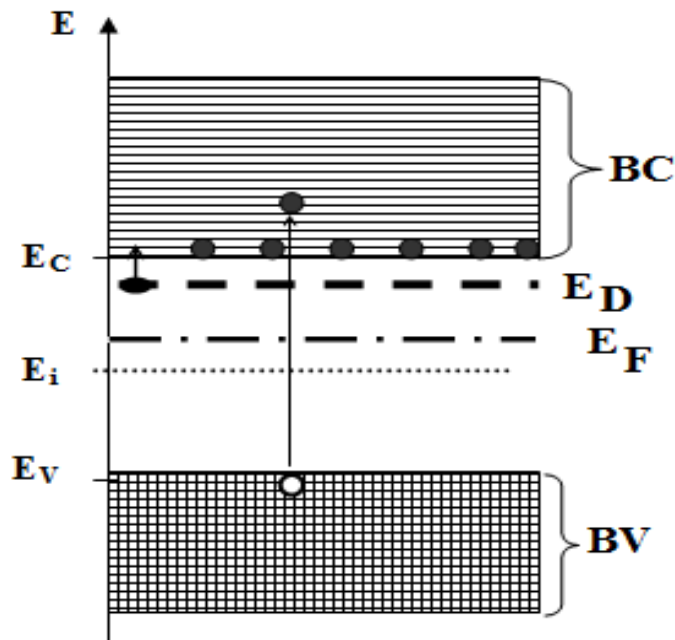
- Fig. 2.5. P. Maj / Min; impuretés A/D, exemple.
- Quel est  $N_D = 10^{16} \text{cm}^{-3}$  ?  $N_{\text{Si}} \sim 10^{22} \text{cm}^{-3}$ .

## 2.2.4. Semiconductor extrinsèque

La diagramme énergétique, fig. 2.6.

Semic. "n"

Semic. "p"



## 2.3. Concentration des porteurs de charge dans les semiconducteurs

- *La fonction de distribution du Fermi-Dirac :*

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

- *Au dopage  $< 10^{18} \text{cm}^{-3}$  (semic. Non-dégénérés) distrib. Boltzman:*

$$f(E) \cong \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right)$$

## 2.3. ... (continuation - en suite)

- Après calculs, résultants les concentration d'électrons , trous:
- En Semic. **Intrinsèque suite:**  $n_0 = p_0 = n_i$ , donc:

$$n_i^2 = n_0 p_0 = N_V N_C \cdot \exp\left(-\frac{E_C - E_V}{kT}\right)$$

## 2.3... (continuation - en suite)

- Dans le cas du semiconducteur extrinsèque:
- A l'équilibre thermique :

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

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

- A non-équilibre:

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

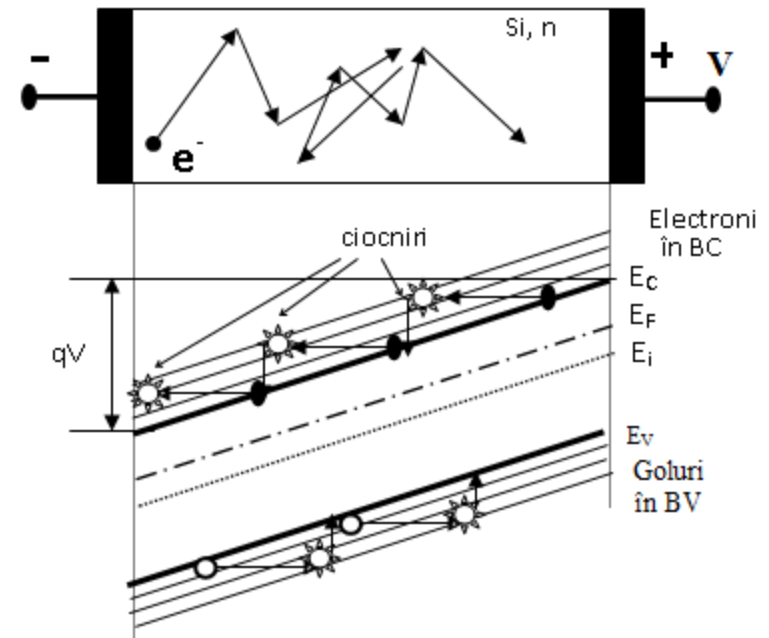
$$p = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_i - E_{Fp}}{kT}\right)$$

## 2.4. Courants dans les semiconducteurs

### 2.4.1. Courants de champ (drift)

- Cause:  $\text{grad } V \neq 0$ .

**Fig. 2.7.** Semiconducteur polarisée a tension  $V$  et son diagramme énergétique.



## 2.4.1. Courants de champ

- La force électrique - produite par le champ,  $\mathcal{E}$  :

$$\vec{F}_n = -q \vec{\mathcal{E}} = m_n \vec{a}_n$$

$$\vec{F}_p = +q \vec{\mathcal{E}} = m_p \vec{a}_p$$

- vitesse moyenne :

$$\vec{v}_n = \frac{\vec{a}_n t_c}{2}$$

$$\vec{v}_p = \frac{\vec{a}_p t_c}{2}$$



## 2.4.1. Courants de champ

- Par les remplacements:

$$\vec{v}_n = -\frac{qt_c}{2m_n} \cdot \vec{\mathcal{E}} = -\mu_n \cdot \vec{\mathcal{E}} \qquad \vec{v}_p = +\frac{qt_c}{2m_p} \cdot \vec{\mathcal{E}} = \mu_p \cdot \vec{\mathcal{E}}$$

- Définitions et discussions :  $v$ - $\mathcal{E}$ ,  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ].
- La densité de courant à semiconducteur est :

$$j = \frac{I}{A} = qNv$$

## 2.4.1. Courants de champ

La charge électrique de l'électron et trou:  $-q$ ,  $+q$ , il suit:

$$\vec{j}_n = qn\mu_n \vec{\mathcal{E}}$$

$$\vec{j}_p = qp\mu_p \vec{\mathcal{E}}$$

Forme microscopique de la loi d'Ohm :

$$\vec{j} = \vec{j}_n + \vec{j}_p = q(p\mu_p + n\mu_n) \vec{\mathcal{E}} = \sigma \vec{\mathcal{E}}$$

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

## 2.4.

### 2.4.2. Courants de diffusion

- Cause: grad  $n$ ,  $p \neq 0$ .
- La loi de Fick de diffusion des gaz :

$$\vec{F}_p = -D_p \cdot \nabla p$$

- équivalence de flux - densité de courant :

$$\vec{j}_p = q \vec{F}_p$$

## 2.4.2. Courants de diffusion

- Resulte les densités de courant de diffusion :

$$\begin{cases} \vec{j}_n = qD_n \nabla n \\ \vec{j}_p = -qD_p \nabla p \end{cases}$$

- Courants de diffusion se produisent dans les semiconducteurs,

## 2.4.

### 2.4.3. Équations de transport

Co-existe les deux causes:

$$\vec{j}_n = \vec{j}_{ndrift} + \vec{j}_{ndif} = qn\mu_n \vec{\mathcal{E}} + qD_n \nabla n \quad (*)$$

$$\vec{j}_p = \vec{j}_{pdrift} + \vec{j}_{pdif} = qp\mu_p \vec{\mathcal{E}} - qD_p \nabla p$$

- Relations (\*) sont appelées équations de transport.
- Le courant de transport total est donnée par:

$$\vec{j} = \vec{j}_n + \vec{j}_p$$

## 2.4.3. Équations de transport

- Par utilisation de les relations Einstein :

$$D_{n,p} = \frac{kT}{q} \mu_{n,p}$$

- Où  $kT/q = v_{th} \sim 25mV$ .

**Devoir:**

déduisez les relations :  $\longrightarrow$

$$\begin{cases} j_n = n\mu_n \cdot \frac{dE_F}{dx} \\ j_p = p\mu_p \cdot \frac{dE_F}{dx} \end{cases}$$

## 2.4.

### 2.4.4. L'équilibre thermique

- *L'équilibre thermique se produit lorsque les flux des e-, trous, et T – nulles  $j_n=0$  et  $j_p=0 \rightarrow E_F = \text{ct.}$*
- Un semi-conducteur est en équilibre thermique si:
- NE PAS appliquer un champ électrique ou magnétique,
- Non soumis à des radiations
- Non chauffé.

Les grandeurs ont indice "o" a équilibre thermique, (ex.  $n_o$ ).

## 2.5. Semiconducteurs en regime de non-équilibre

Les causes de non-équilibre:

- Generation /creation thermiques (par interactions phonon-électron) avec les vitesses absolus:  $g_n, g_p$ .
- La recombinaison est le processus inverse avec les vitesses :  $r_n, r_p$ .
- Génération de porteurs due a lumière (interaction photon - électrons): vitesse =  $G_L$ .



## 2.5. Semiconducteurs en regime de non-équilibre

- La vitesse net de recombinaison :

$$R_n = r_n - g_n$$

$$R_p = r_p - g_p$$

- La vitesse net de **recombinaison avec durée de vie des porteurs en excès**:

$$R_n = \frac{n - n_0}{\tau_n}$$

$$R_p = \frac{p - p_0}{\tau_p}$$

- Désavantage :  $\tau_n$  si  $\tau_p$  var. avec  $n$  et  $p$ !
- Avantage: simplicité.

## 2.6. Les équations de base de la physique des semiconducteurs

- *Les Équations de transport incluent le crt. de déplacement:*

$$\vec{j}_n = \vec{j}_{ndrift} + \vec{j}_{ndif} = qn\mu_n \vec{\mathcal{E}} + qD_n \nabla n$$

$$\vec{j}_p = \vec{j}_{pdrift} + \vec{j}_{pdif} = qp\mu_p \vec{\mathcal{E}} - qD_p \nabla p$$

$$\vec{j}_{tot} = \vec{j}_n + \vec{j}_p + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

## 2.6. Les équations de base de la physique des semiconducteurs

- *L'Équation du Poisson en semiconducteurs :*

$$\Delta V = -\frac{\rho_v}{\epsilon}$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{q}{\epsilon} (p - n + N_D^* - N_A^*)$$

## 2.6. Les équations de base de la physique des semiconducteurs

- Équations de continuité. Une cause = transports.
- De la loi de conservation de charge:  $-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \text{div } \vec{j}$
- Pour les électrons et les trous, la loi devient :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{-q} \cdot \text{div } \vec{j}_n$$
$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{+q} \cdot \text{div } \vec{j}_p$$

## 2.6. Les équations de base de la physique des semiconducteurs

- Variation dans le temps = génération - recombinaison + transport.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_L - R_n + \frac{1}{q} \cdot \nabla \cdot \vec{j}_n$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_L - R_p - \frac{1}{q} \cdot \nabla \cdot \vec{j}_p$$

- Ce système est la basé pour les simulateurs électronique de type Silvaco.

# Atlas- Silvaco

[www.silvaco.com](http://www.silvaco.com)

**SILVACO**

## ATLAS User's Manual

DEVICE SIMULATION SOFTWARE

