

COMPOSANTS SEMI-CONDUCTEURS

III) Propriétés de transport

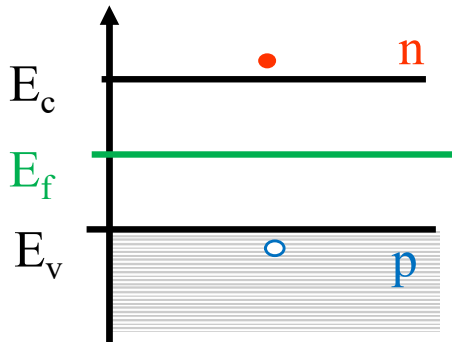
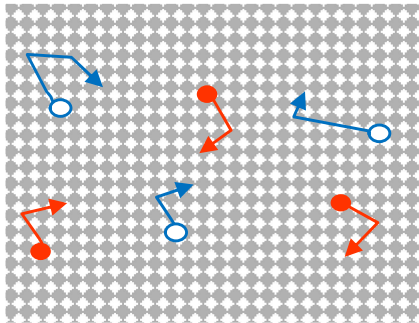
P.A. Besse

EPFL

Charges libres (mobiles) et charges fixes

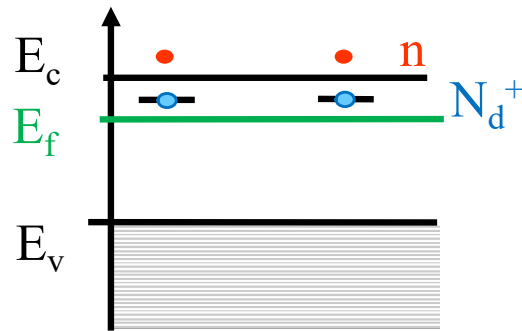
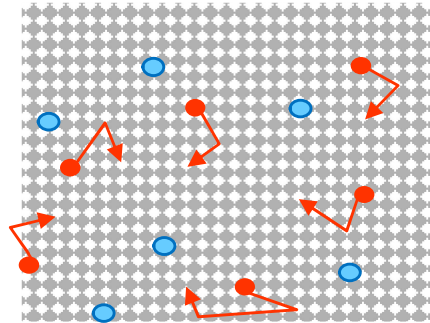
À l'équilibre, dans un milieu homogène,
la condition de neutralité ($n + N_A^- = p + N_D^+$) détermine l'énergie de Fermi E_f

Intrinsèque



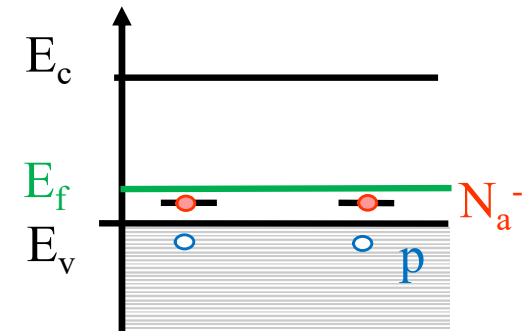
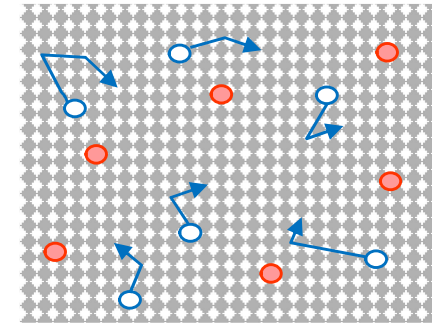
n = charges libres (mobiles) négatives
 p = charges libres (mobiles) positives

Type n



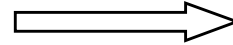
N_a^- = charges fixes négatives
 N_d^+ = charges fixes positives

Type p



Zones de charges et champ électrique (1)

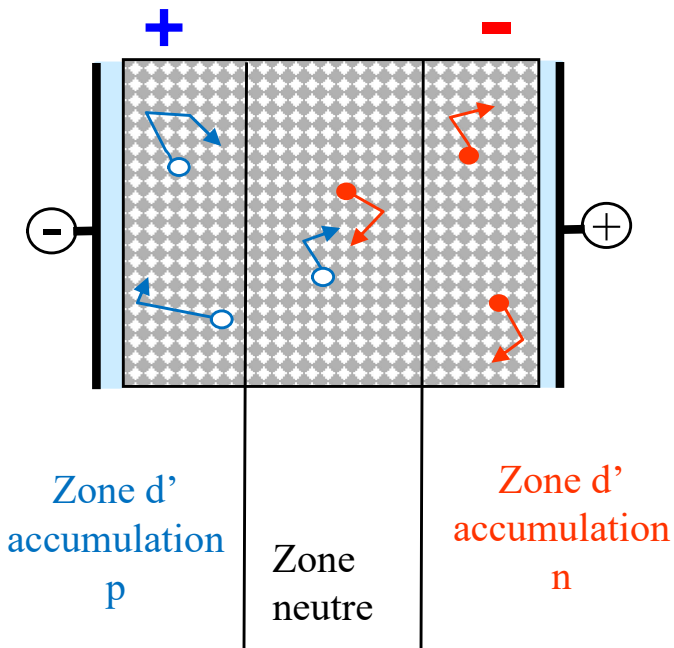
Influences extérieures



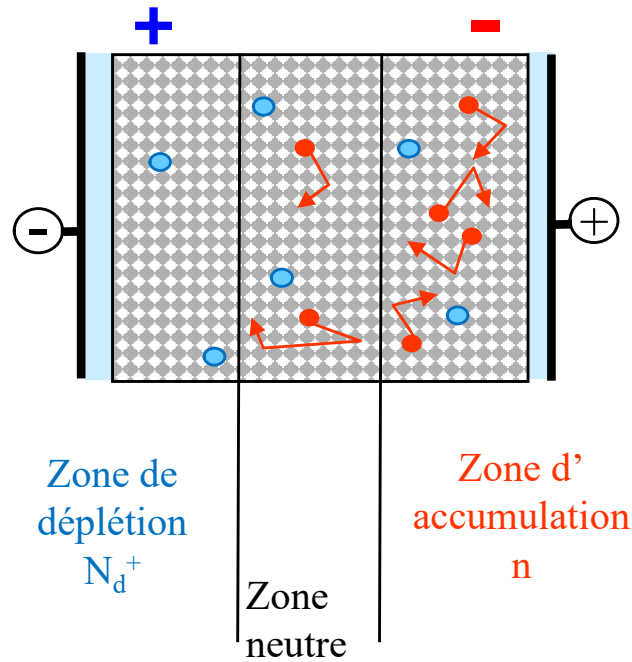
Zones de charges

Ex: semiconducteur entre deux plaques chargées (champ électrique externe):

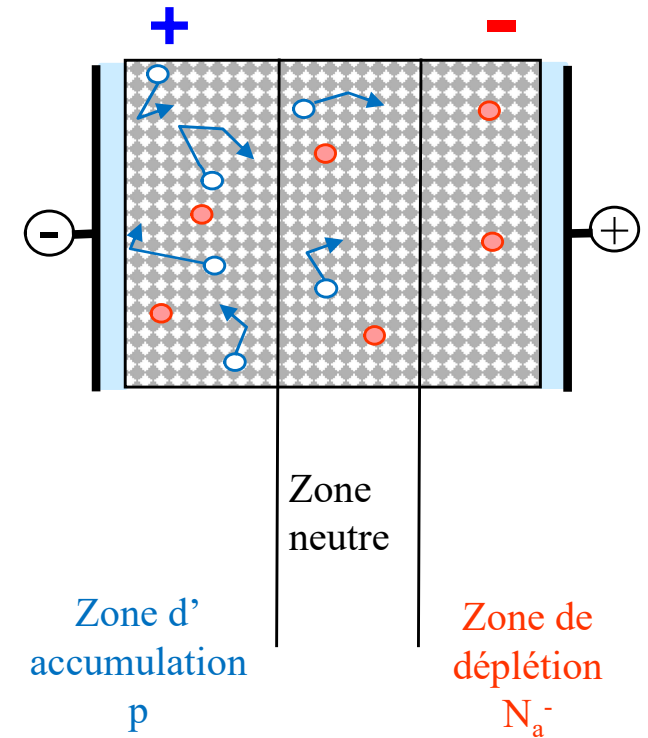
Intrinsèque



Type n



Type p

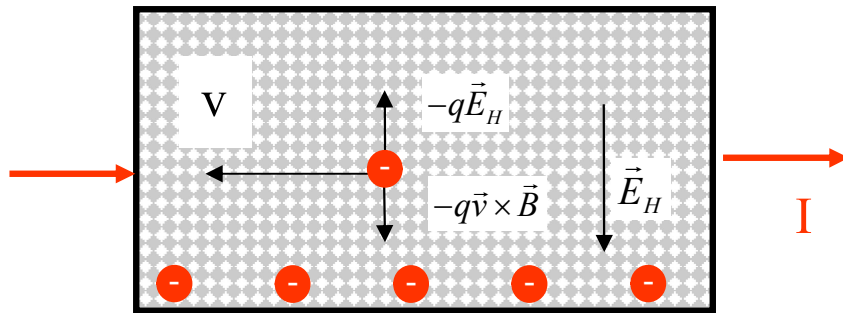




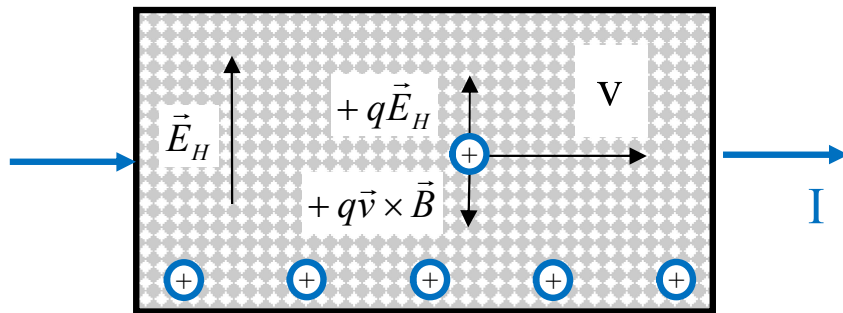
Ex: champ magnétique (capteur Hall)

Ex: température (semicond. type n)

Type n

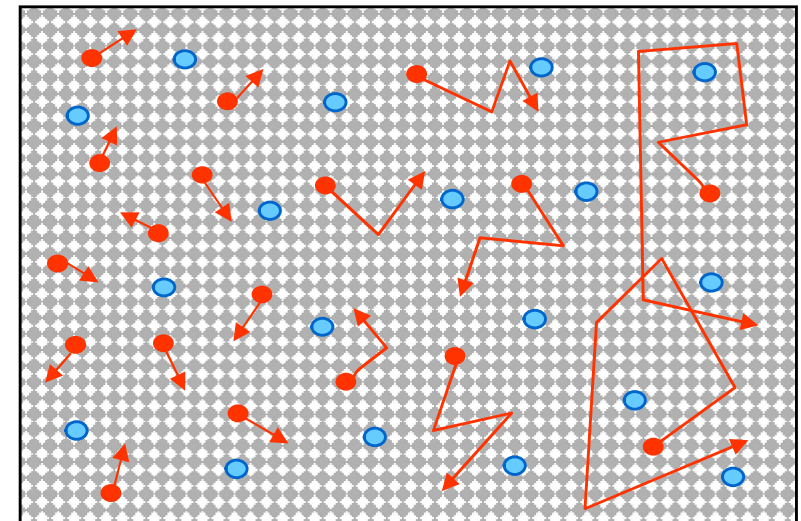


Type p

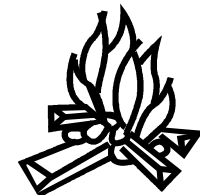


Accumulation

Déplétion



$\xrightarrow{\text{grad}(T)}$



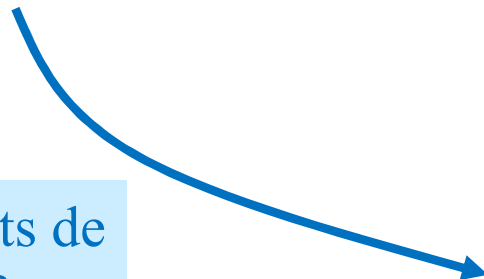
Champs électriques

(Champs magnétiques)

(Gradient de température)

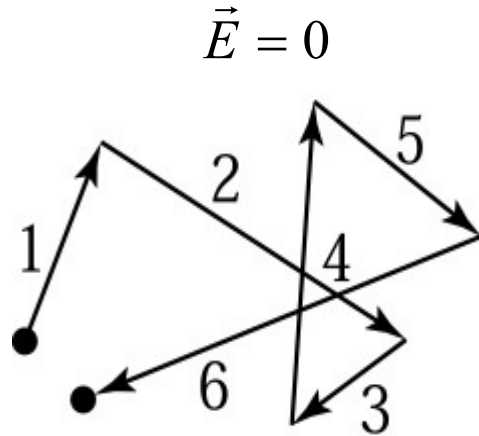
Courants de
drift

Charges libres n
Charges libres p



Mouvement brownien et vitesse thermique

Mouvement brownien



S. M. Sze
"Semiconductor
Devices"

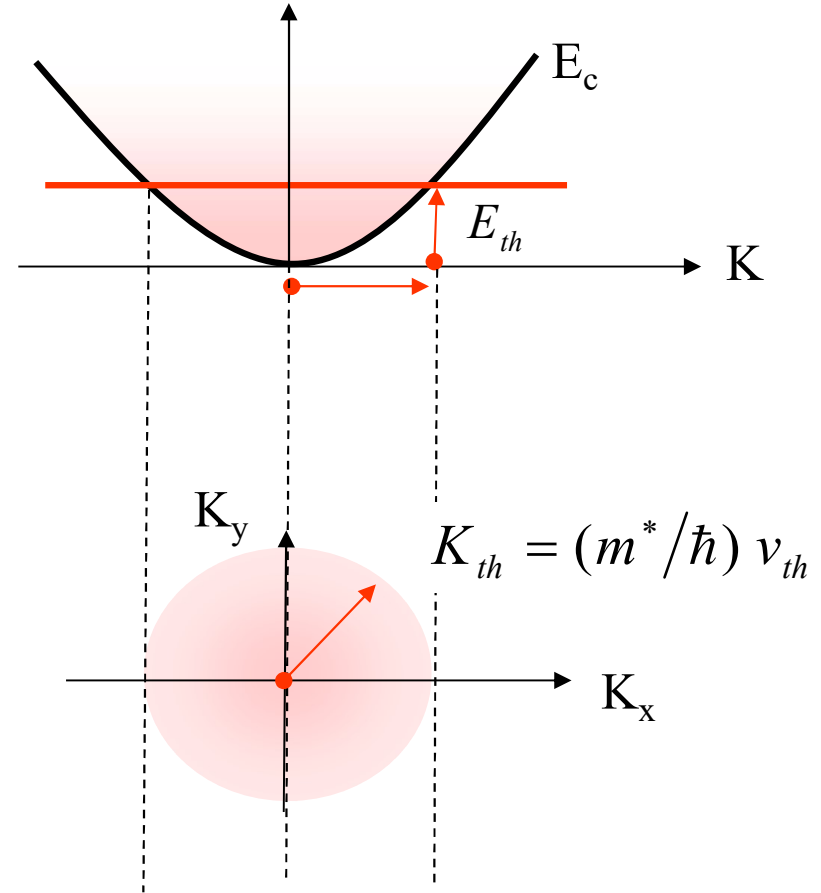
$$E_{th} = \frac{1}{2} m^* v_{th}^2 = \frac{3}{2} k T$$

Ex.: T=300K, électrons dans Si:

→ $v_{th} = 2.10^7$ cm/s = 200 km/s

Temps moyen de parcours libre = temps entre collisions = τ_c

Parcours libre moyen = distance entre collisions = $l_c = v_{th} \cdot \tau_c$

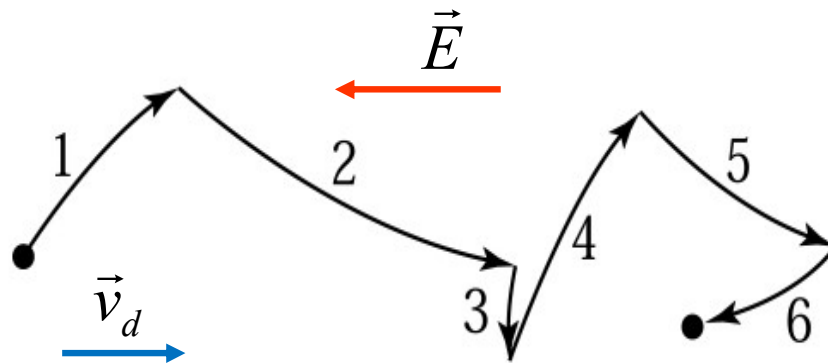


$\approx [0.1 - 1] ps$

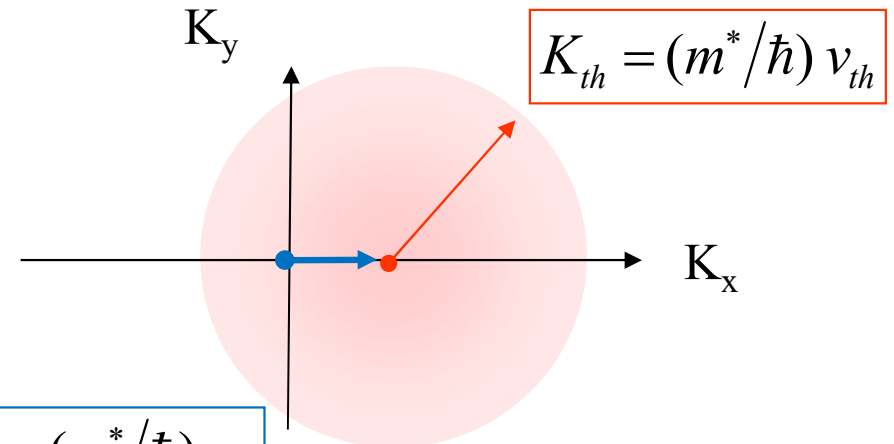
$\approx [20 - 200] nm$

Champ électrique \rightarrow vitesse de drift v_d (vitesse moyenne du nuage de porteurs)

S. M. Sze "Semiconductor Devices"



$$\vec{v}_d = -\mu \cdot \vec{E}$$

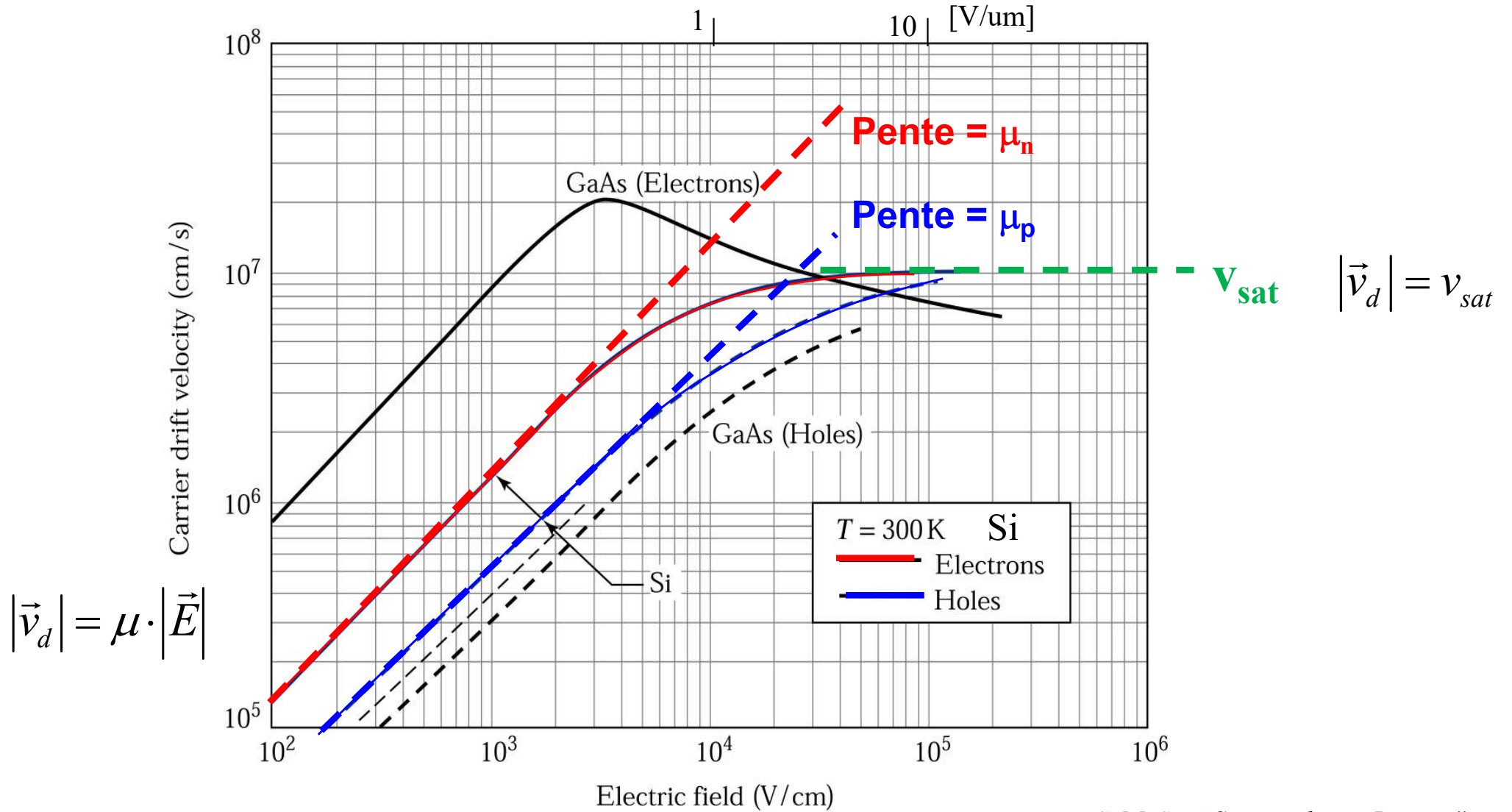


$$K_{th} = (m^*/\hbar) v_{th}$$

$$K_d = (m^*/\hbar) v_d$$

Ex.: $E=10^4 \text{V/cm} = 1 \text{V/um}$, électron dans Si:
 $\rightarrow v_d=6.10^6 \text{ cm/s} < v_{th}$

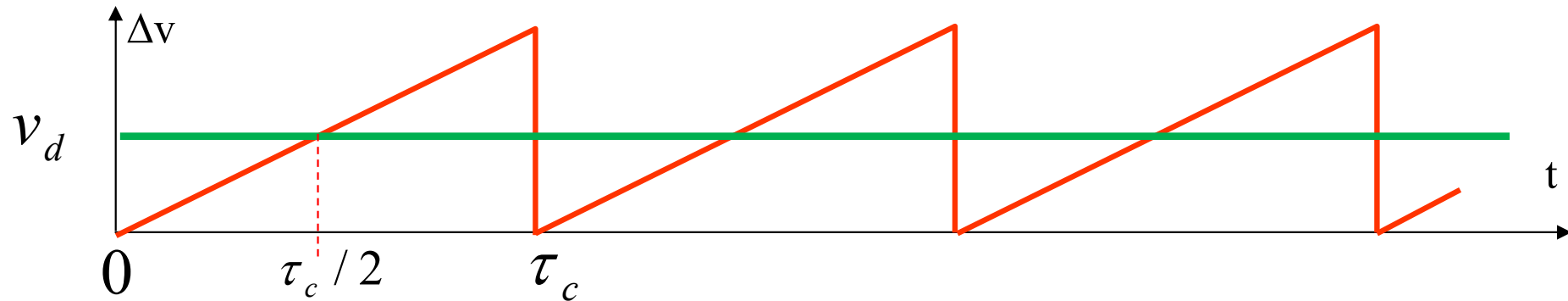
Saturation de la vitesse à haut champ électrique



S. M. Sze "Semiconductor Devices"

Temps moyen de parcours libre et vitesse de drift (modèle de Drude)

Temps moyen de parcours libre = temps entre collisions = τ_c



Modèle:

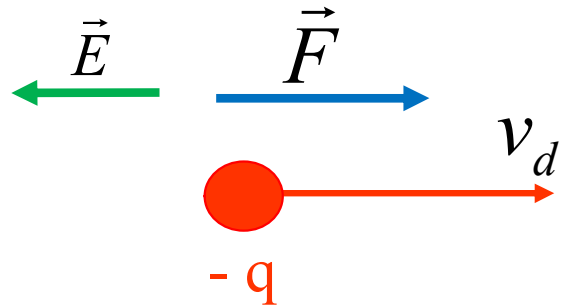
Sous l'effet d'une force F les porteurs augmentent de vitesse jusqu'au prochain choc.

La vitesse moyenne (vitesse de drift) v_d est:

Le déplacement de drift moyen l_{drift} est:

$$v_d = \left(\frac{F}{m^*} \right) \cdot \left(\frac{\tau_c}{2} \right)$$

$$l_{drift} = \frac{1}{2} \left(\frac{F}{m^*} \right) \tau_c^2 = v_d \cdot \tau_c$$



$$\vec{F} = -q \cdot \vec{E}$$

$$\vec{v}_d = -\mu \cdot \vec{E} \quad \text{avec} \quad \mu \equiv \frac{q}{m^*} \frac{\tau_c}{2}$$

Pour électrons:

$$\vec{v}_{d,n} \equiv \vec{v}_n = -\mu_n \cdot \vec{E}$$

Mobilité

Pour trous:

$$\vec{v}_{d,p} \equiv \vec{v}_p = \mu_p \cdot \vec{E}$$

$$\vec{j}_n = -q n \cdot \vec{v}_n$$

$$\vec{j}_p = q p \cdot \vec{v}_p$$

Pour électrons:

$$\vec{j}_n = \sigma_n \cdot \vec{E}$$

Conductivité

Pour trous:

$$\vec{j}_p = \sigma_p \cdot \vec{E}$$

Conductivité:

$$\sigma_n = q n \mu_n = \frac{q^2 \tau_c}{2} n \frac{1}{m_e^*}$$

$$\sigma_p = q p \mu_p = \frac{q^2 \tau_c}{2} p \frac{1}{m_h^*}$$

Silicium dopé N (10^{18} cm^{-3})

Mobilité

$$\mu_n \cong 1000 \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} \right]$$

Concentration porteurs libres

$$n_{Si} \cong 10^{18} \left[\frac{1}{\text{cm}^3} \right]$$

Conductivité

$$\sigma_{Si} = q \cdot n_{Si} \cdot \mu_n \cong 160 \left[\frac{1}{\Omega \cdot \text{cm}} \right]$$

Cuivre

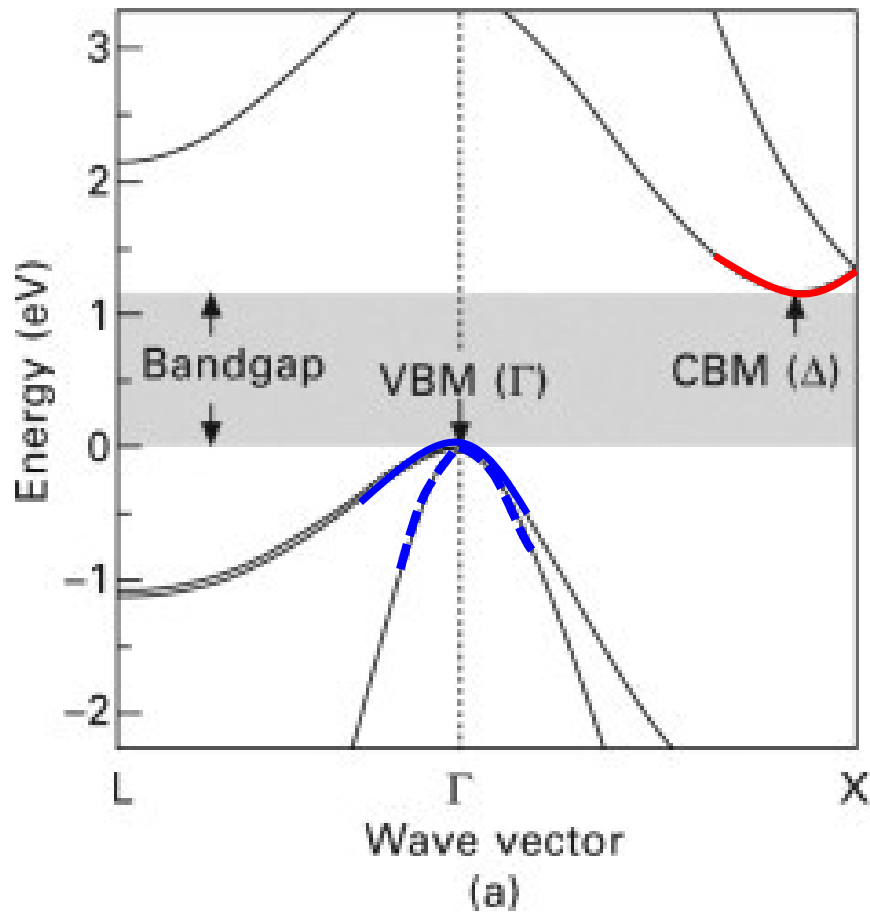
$$\mu_{Cu} \cong 40 \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} \right]$$

$$n_{Cu} \cong 9 \cdot 10^{22} \left[\frac{1}{\text{cm}^3} \right]$$

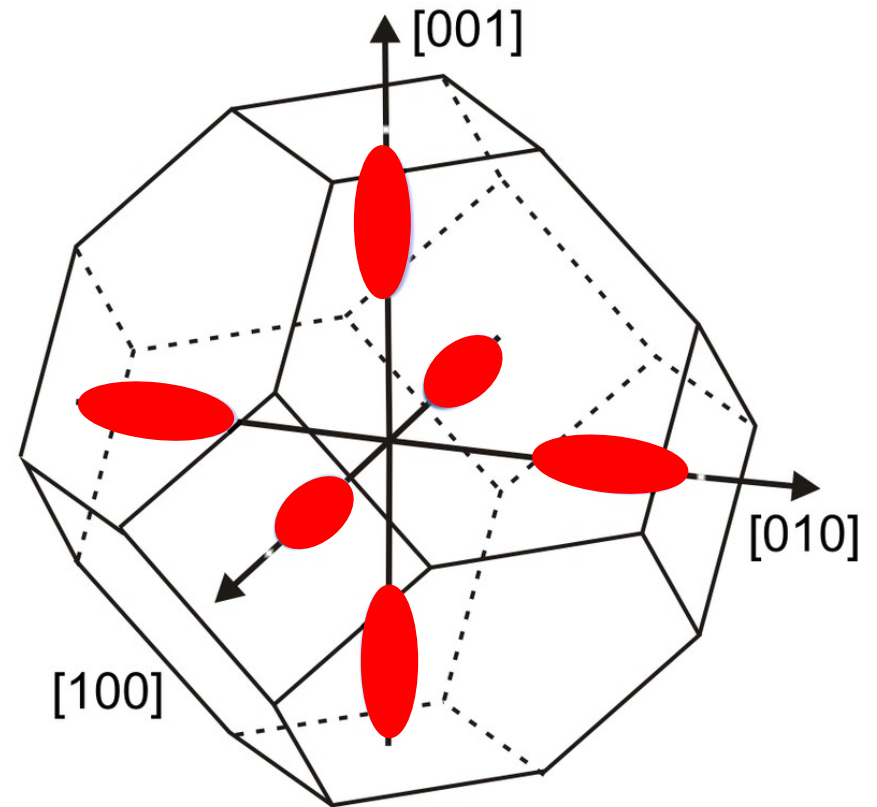
$$\sigma_{Cu} = q \cdot n_{Cu} \cdot \mu_{Cu} \cong 6 \cdot 10^5 \left[\frac{1}{\Omega \cdot \text{cm}} \right]$$

6 vallées dans la bande de conduction

2 vallées dans la bande de valence



Bande de conduction



Conductivité dans silicium (bande de conduction)

Conductivité:

anisotrope

isotrope

$$\sigma_n = \frac{q^2 \tau_c n}{2} \cdot \frac{1}{6} \cdot \left[2 \begin{pmatrix} \frac{1}{m_l^*} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_t^*} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_t^*} \end{pmatrix} + 2 \begin{pmatrix} \frac{1}{m_t^*} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_l^*} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_t^*} \end{pmatrix} + 2 \begin{pmatrix} \frac{1}{m_t^*} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_t^*} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_l^*} \end{pmatrix} \right] = \frac{q^2 \tau_c n}{2} \cdot \frac{1}{6} \cdot 2 \left[\frac{1}{m_l^*} + \frac{1}{m_t^*} + \frac{1}{m_t^*} \right] \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Masse effective pour la conductivité:

$$\sigma_n = qn\mu \equiv \frac{q^2 \tau_c n}{2} \frac{1}{m_{\sigma,n}^*} \Rightarrow \frac{1}{m_{\sigma,n}^*} = \frac{1}{3} \left[\frac{1}{m_l^*} + \frac{2}{m_t^*} \right]$$

Masse effective de conduction

Masses effectives de conduction

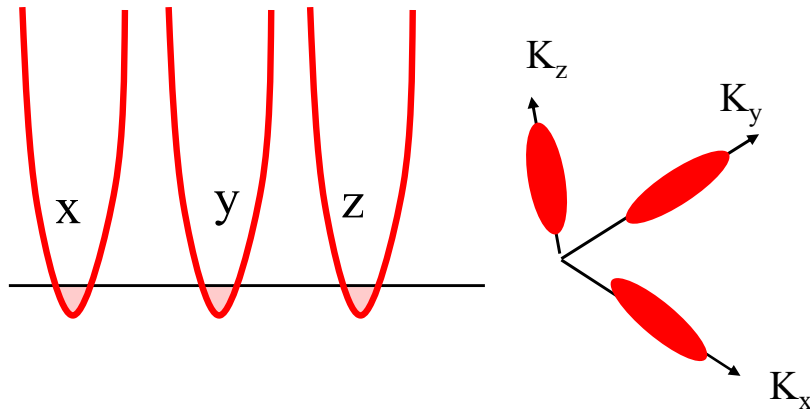
Masses effectives en unité: $m_0=0.911.10^{-30}$ Kg

PROPERTY	Si	GAAs
Electron effective mass (m_0)	$m_{l}^* = 0.98$ $m_{t}^* = 0.19$ $m_{dos}^* = 1.08$ $m_{\sigma}^* = 0.26$	$m^* = 0.067$
Hole effective mass (m_0)	$m_{hh}^* = 0.49$ $m_{lh}^* = 0.16$ $m_{dos}^* = 0.55$ $m_{\sigma}^* = 0.37$	$m_{hh}^* = 0.45$ $m_{lh}^* = 0.08$ $m_{dos}^* = 0.47$ $m_{\sigma}^* = 0.34$
Bandgap (eV)	$1.17 - \frac{4.37 \times 10^{-4} T^2}{T + 636}$	$1.519 - \frac{5.4 \times 10^{-4} T^2}{T + 204}$
Electron affinity (eV)	4.01	4.07

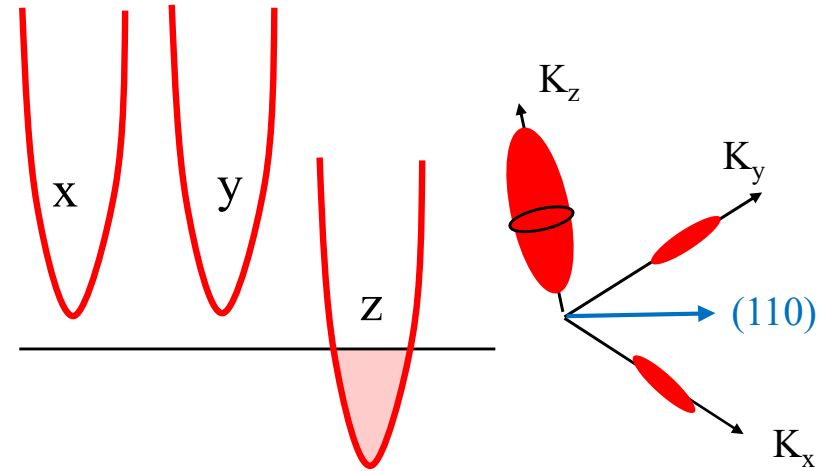
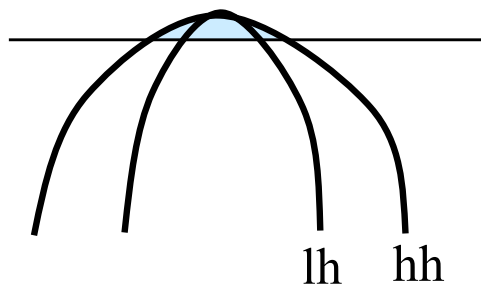
For Si: m_{dos}^* : To be used in calculating density of states, position of Fermi level
 m_{σ}^* : To be used in calculating response to electric field, e.g., in mobility

J. Singh “Semiconductor Devices”

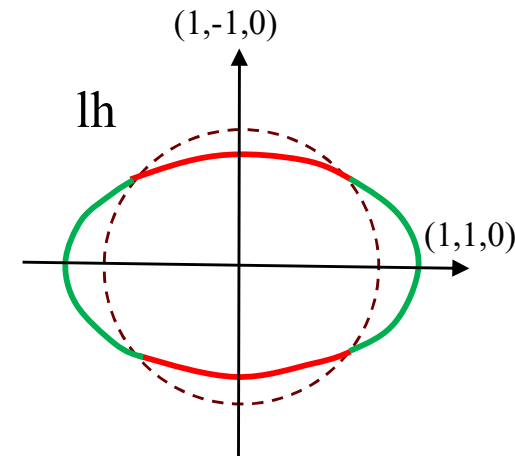
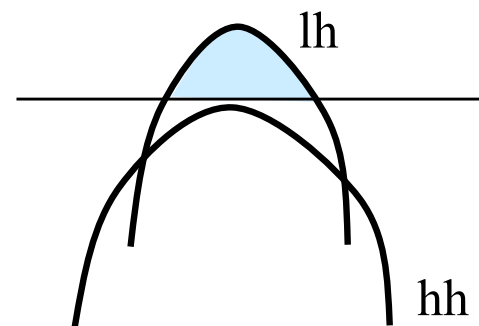
Application: piezorésistance en silicium



Pas de contrainte

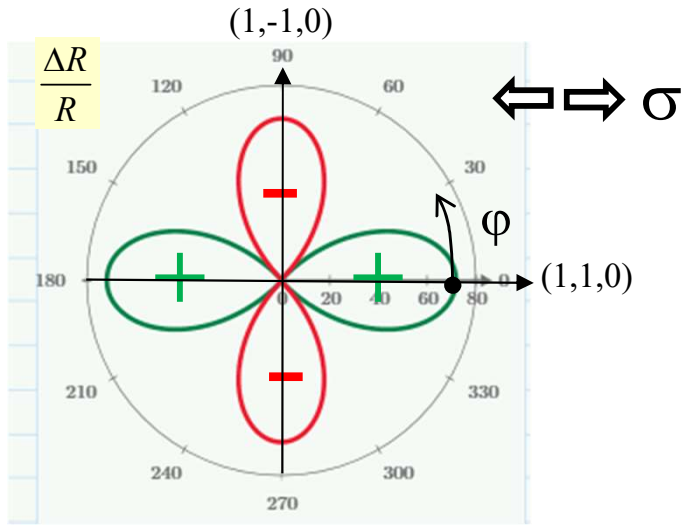


Contrainte ($\sigma > 0$) dans la direction (110)

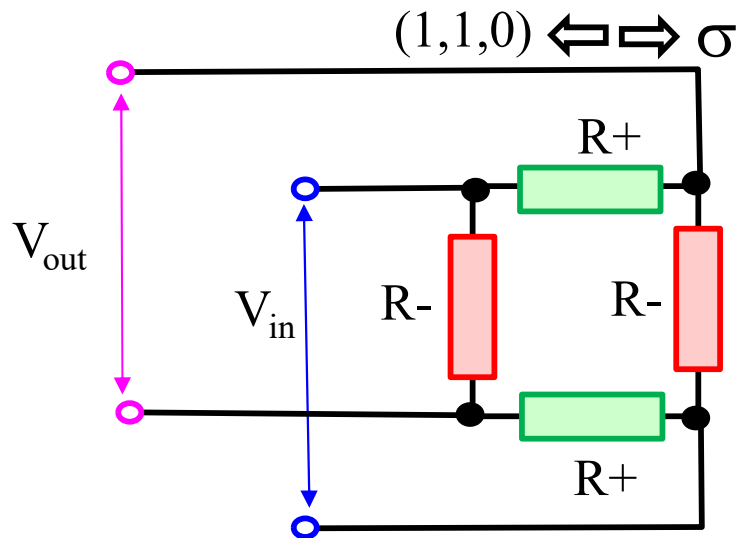


Anisotropie de l'effet piézorésistif

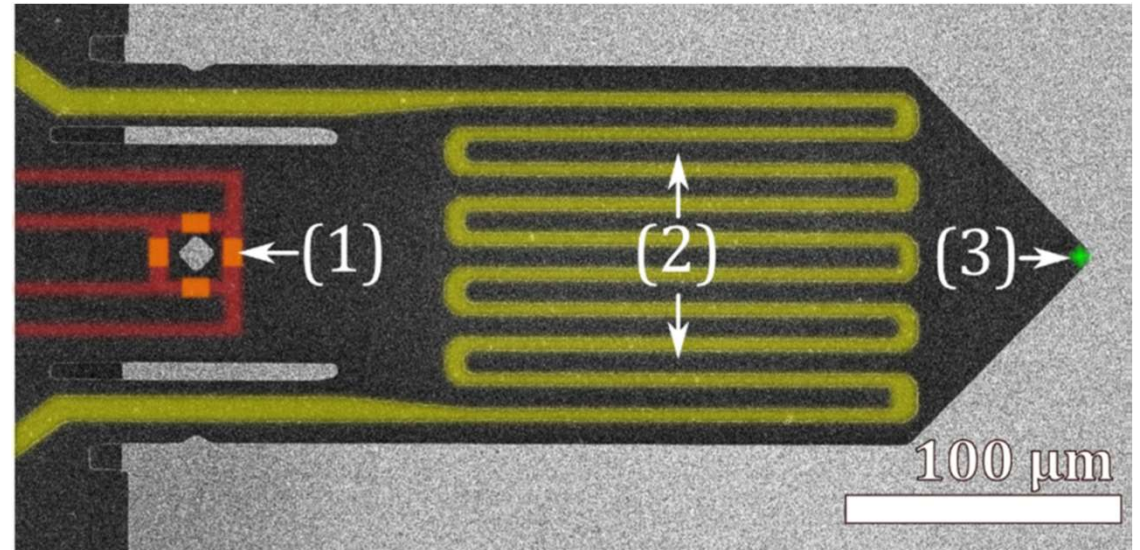
Jauges de contraintes en P-Si cantilever, pressure sensors, ...



Wheatstone bridge



<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/ad8cf9>

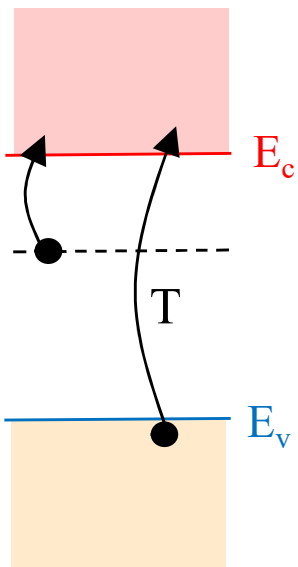


1) Wheatstone bridge 2) Heater 3) Tip

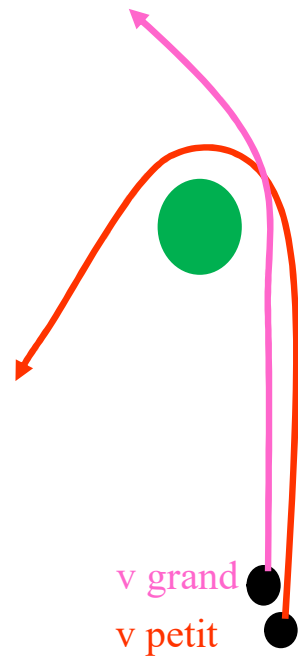
Scattering et augmentation de température

Diminution de resistance:

a) Generation de porteurs

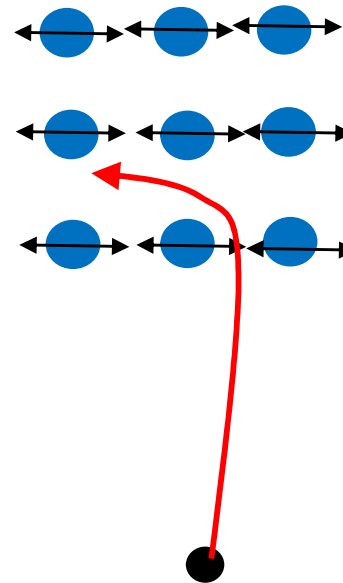


b) Impurity scattering:

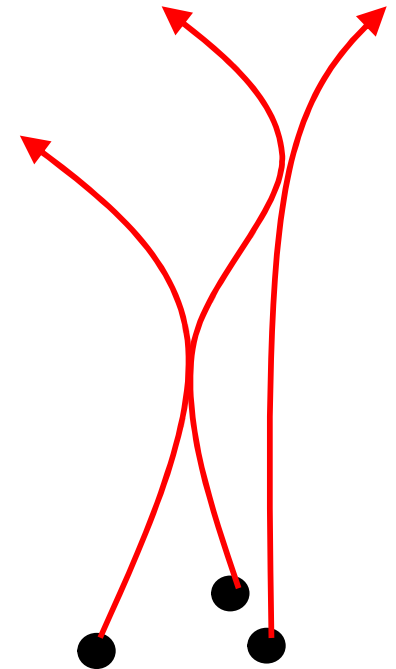


Augmentation de resistance:

c) Phonon scattering:



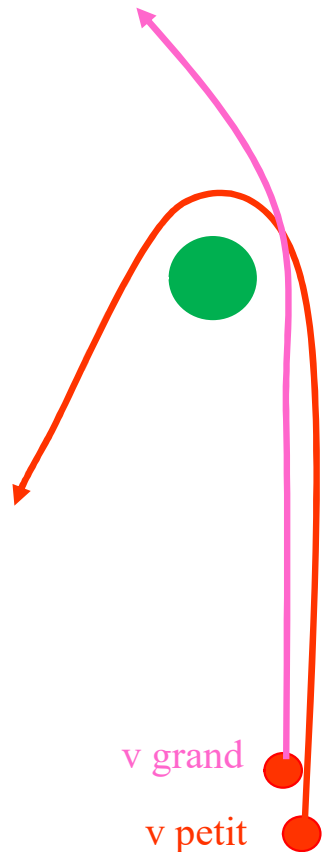
d) Electron scattering:



← Semi-conducteurs →

← Métaux →

Scattering (1): effets physiques



a) Impurity scattering:

- Le nombre d'impuretés augmente avec le dopage
est constant en température
- L'effet d'une collision est plus faible à haute vitesse (T)
→ Le temps τ_i entre deux collisions augmente avec la température
et diminue avec le dopage

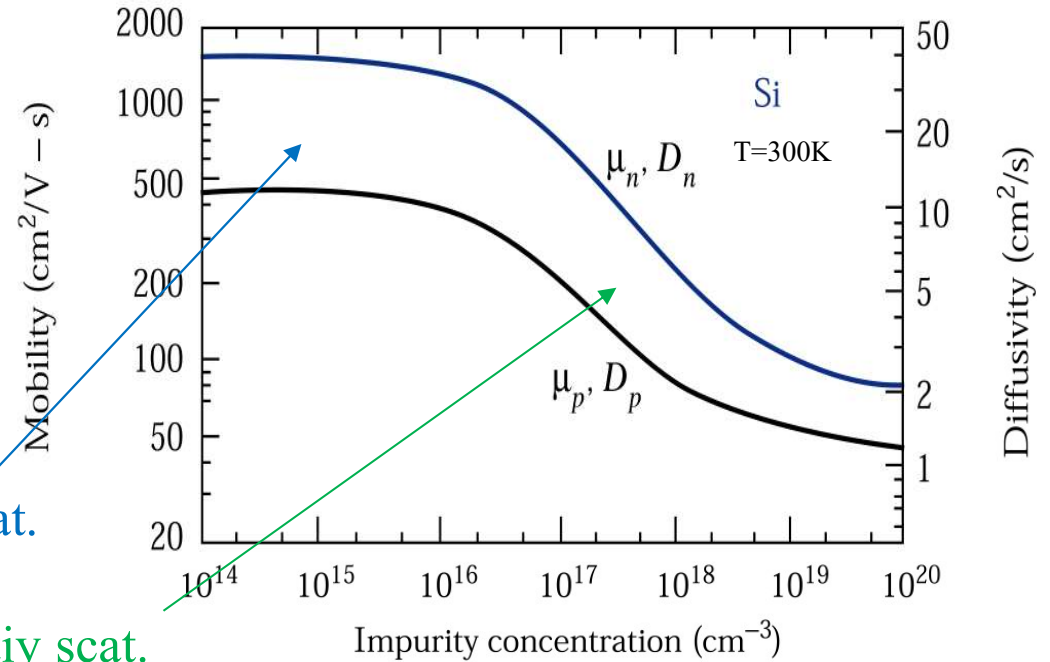
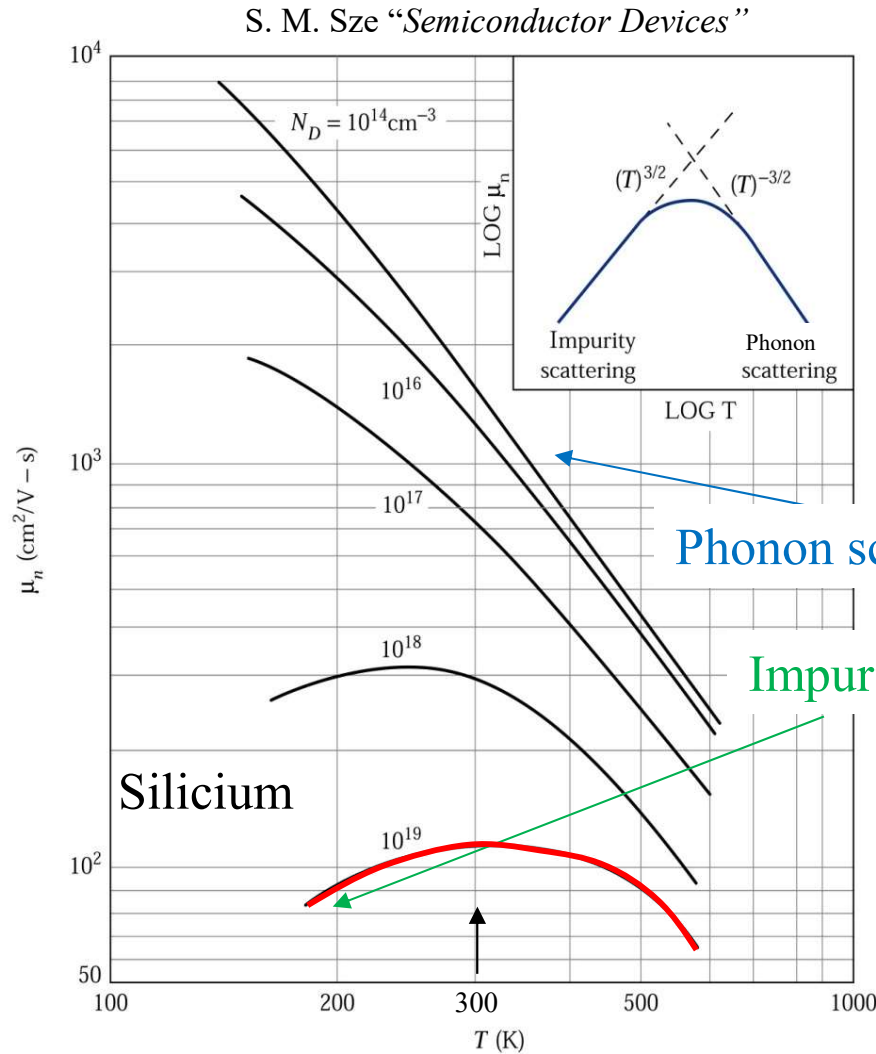
b) Phonon scattering (vibrations cristallines):

- Le nombre de phonons augmente avec la température
est constant en dopage
- Le temps τ_{ph} entre deux collisions diminue avec la température
mais ne dépend pas du dopage

Scattering totale:

$$\frac{1}{\tau_c} = \frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\tau_{ph}}$$

Mobilité: température et dopage



Les électrons sont plus mobiles que les trous (petite masse effective et long temps τ_c)

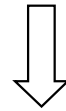
$$\mu \equiv \frac{q}{m^*} \frac{\tau_c}{2}$$

Le champ électrique produit **plusieurs** courant

Courant de drift:

$$\vec{j}_{drift} \equiv \vec{j}_n + \vec{j}_p = (\sigma_n + \sigma_p) \cdot \vec{E}$$

Sommer les courants



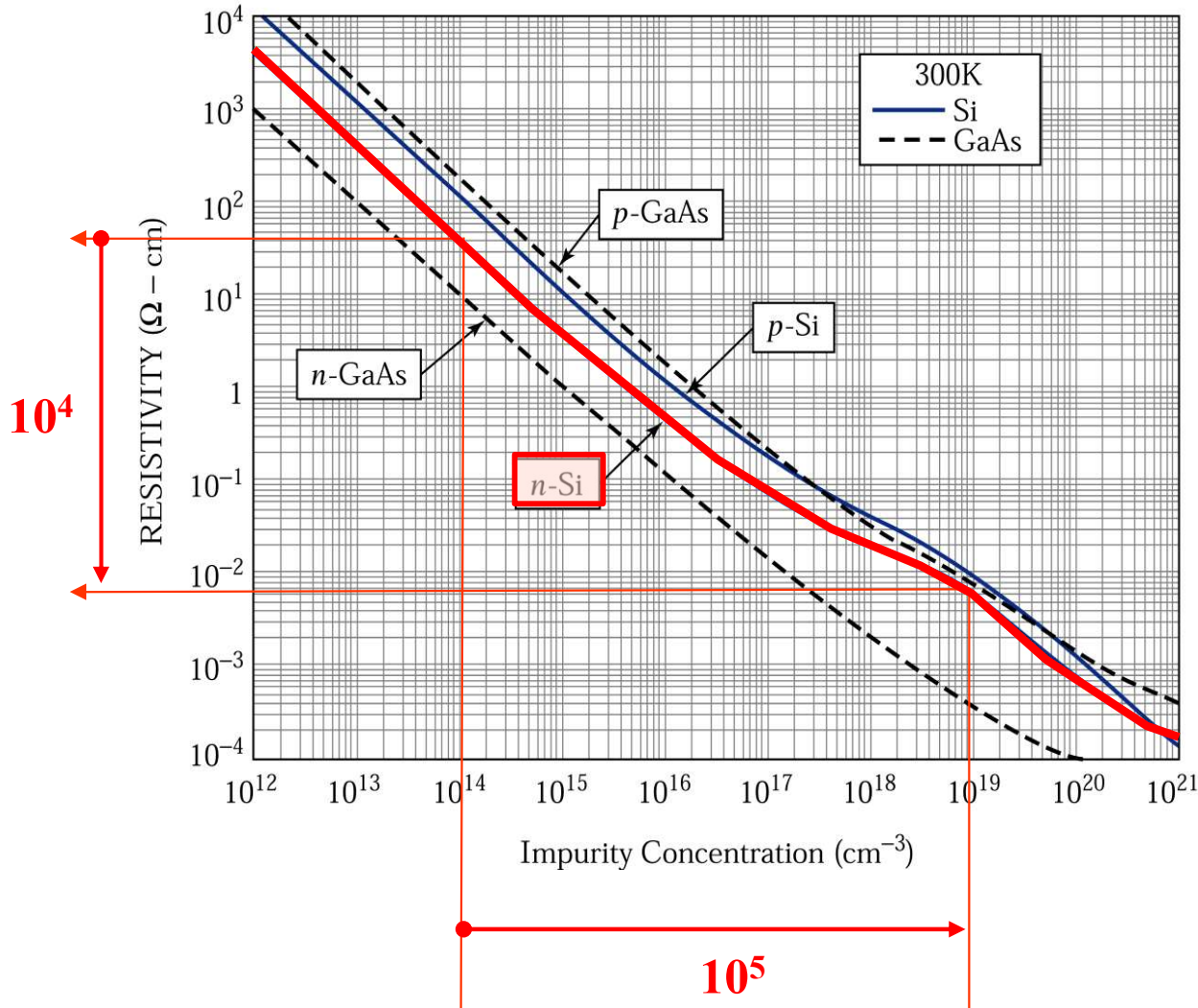
$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{j}_{drift}$$

Résistivité:

$$\rho \equiv \frac{1}{\sigma_n + \sigma_p}$$

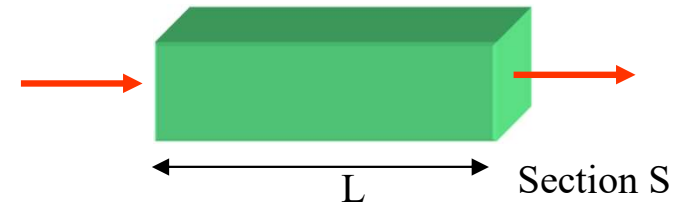
Sommer les conductivités et prendre l'inverse

S. M. Sze "Semiconductor Devices"



Résistivité

$$\rho \approx \frac{1}{\sigma} \approx \frac{1}{q n \mu}$$



Résistance

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

Zones de charges et champs électriques

Champs électriques
(Champs magnétiques)
(Gradient de température)

Maxwell ou
Poisson

Courants de
drift

∇

Charges libres n
Charges libres p

Maxwell:

$$\text{div}(\vec{D}) = \rho$$

$$\rho = q (p + N_d^+ - n - N_a^-)$$

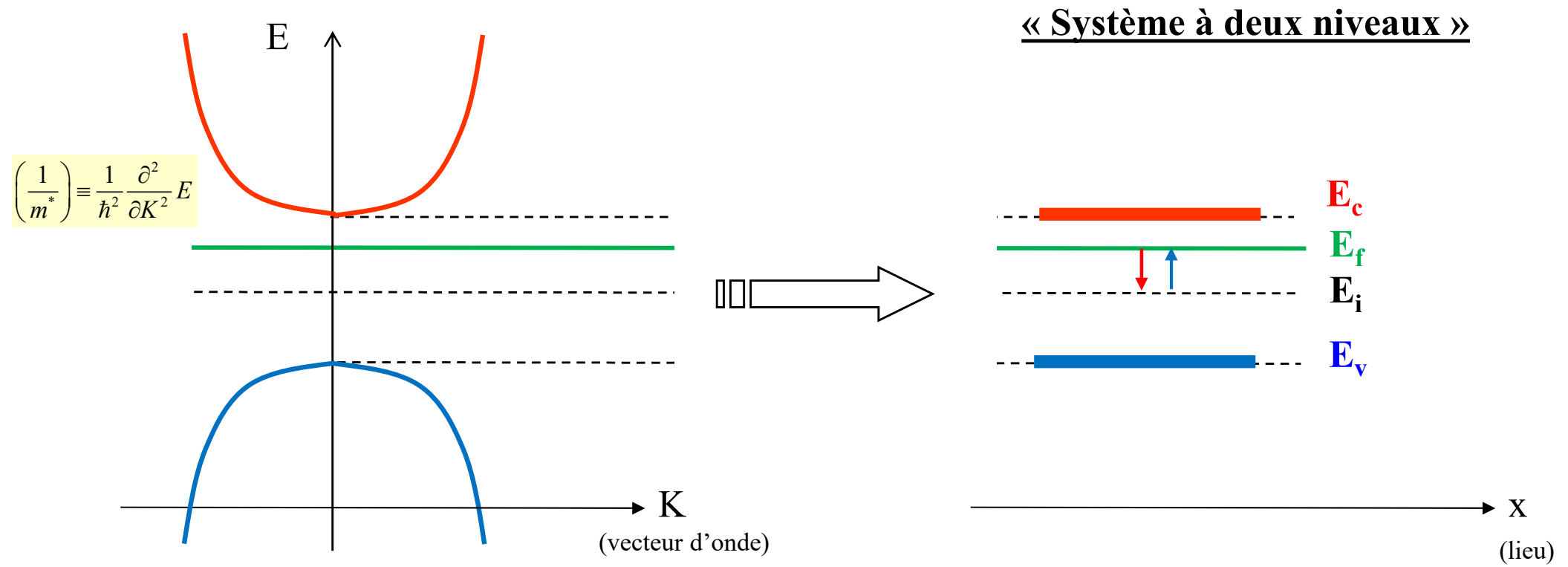
$$\text{rot}(\vec{E}) = -\dot{\vec{B}} = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}(\varphi)$$

Champ électrique E:

$$\text{div}(\vec{E}) = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} q (p + N_d^+ - n - N_a^-)$$

Potentiel électrique φ : (équation de Poisson)

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} q (p + N_d^+ - n - N_a^-)$$



$$n = 2 \cdot \int_{E_c}^{E_{c \max}} \rho_c(E) \cdot F_c(E) dE$$

$$p = 2 \cdot \int_{E_{v \min}}^{E_v} \rho_v(E) \cdot F_v(E) dE$$

$$n \cong n_i \cdot e^{(E_F - E_i) / kT}$$

$$p \cong n_i \cdot e^{(E_i - E_F) / kT}$$

Bandes – champ électrique – charges dans une structure 1D

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}(\varphi)$$

$$E_{pot} = -q \cdot \varphi$$

$$\vec{E} = +\overrightarrow{\text{grad}}\left(\frac{E_{pot}}{q}\right) = +\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{E_{bande}}{q}\right)$$

La pente de la bande indique un champ électrique

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \rho$$

$$E_{pot} = -q \cdot \varphi$$

$$\nabla^2 \left(\frac{E_{pot}}{q}\right) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{E_{bande}}{q}\right) = +\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \cdot |q| (p + N_D^+ - n - N_A^-)$$

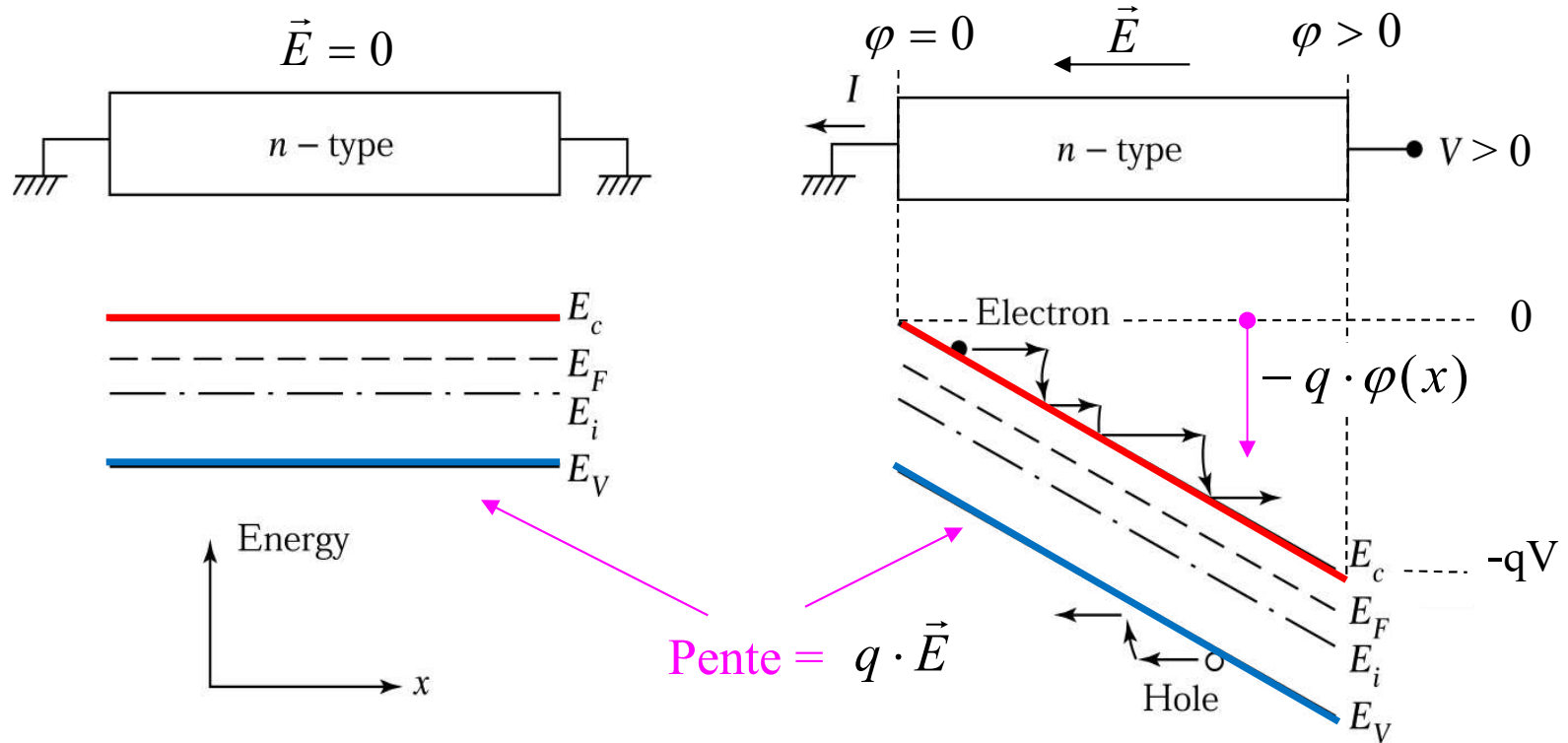
La courbure de la bande indique une charge totale

$$\text{div}(\vec{D}) = \rho$$

$$\vec{E} = +\frac{q}{\epsilon_0 \epsilon} \int (p + N_d^+ - n - N_a^-) \cdot dx$$

Le champ électrique est l'intégrale des charges

Au potentiel ϕ est associé une énergie potentielle: $E_{pot} = -q \cdot \phi$
 → variation des bandes d'énergie



S. M. Sze "Semiconductor Devices"

Champs électriques

(Champs magnétiques)

(Gradient de température)

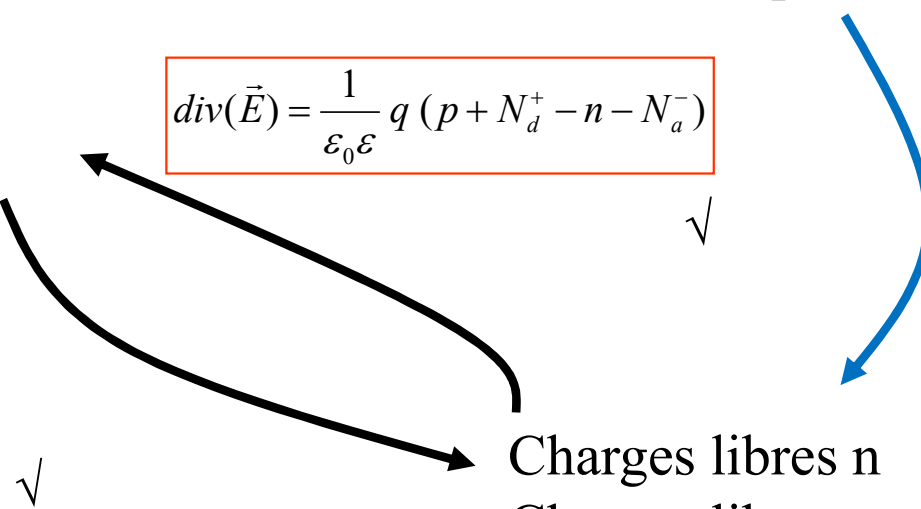
Courants de drift

$$\text{div}(\vec{E}) = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} q (p + N_d^+ - n - N_a^-)$$

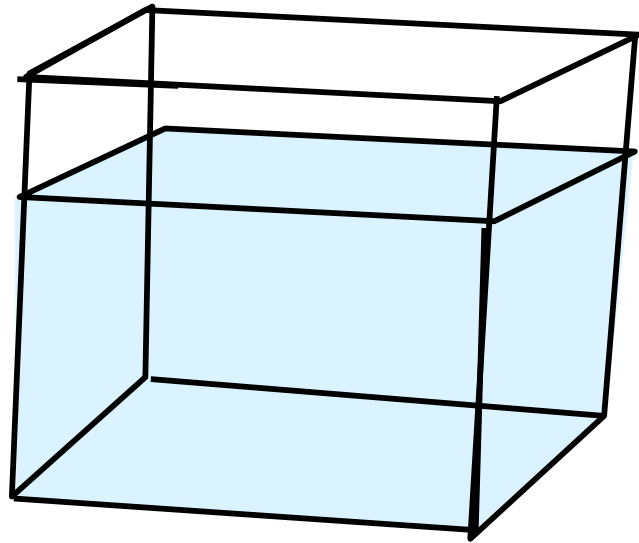
Atomes dopants, N_d, N_a

Ionisation
+
Courants de diffusion

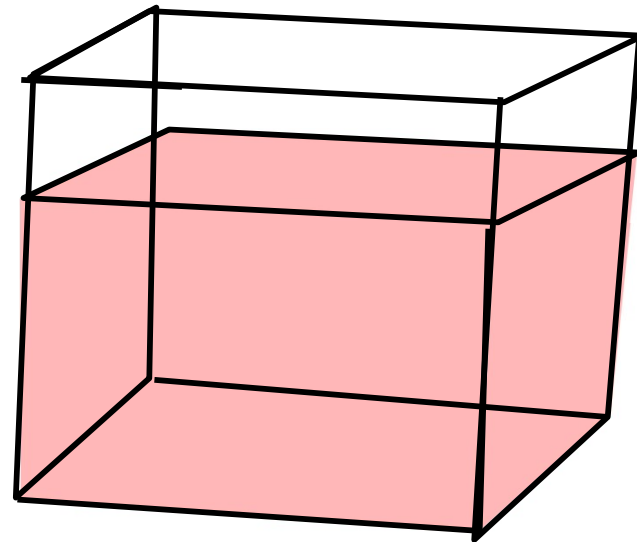
Charges libres n
Charges libres p



Jonction entre deux dopages différents



Ionisation complète



Ionisation complète



Donneurs

$$N_D^+ = N_D(1 - F_D)$$

$$F_D = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} e^{(E_D - E_F)/kT}}$$

Accepteurs

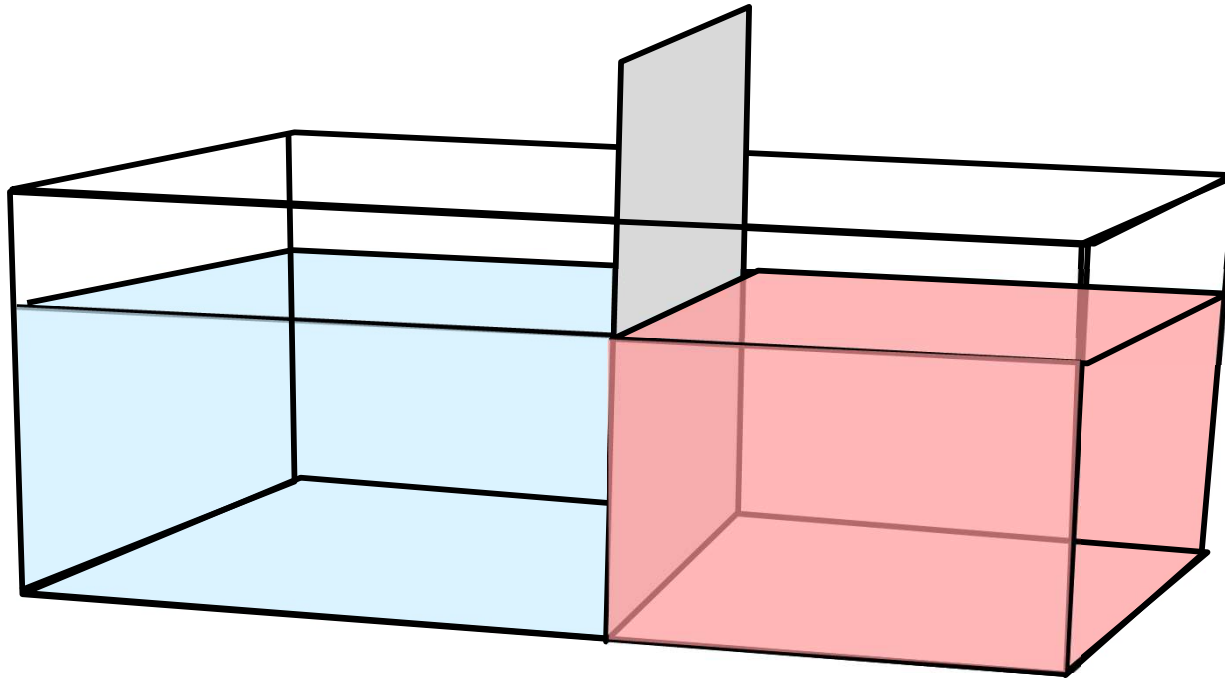
$$N_A^- = N_A(1 - F_A)$$

$$F_A = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} e^{(E_F - E_A)/kT}}$$

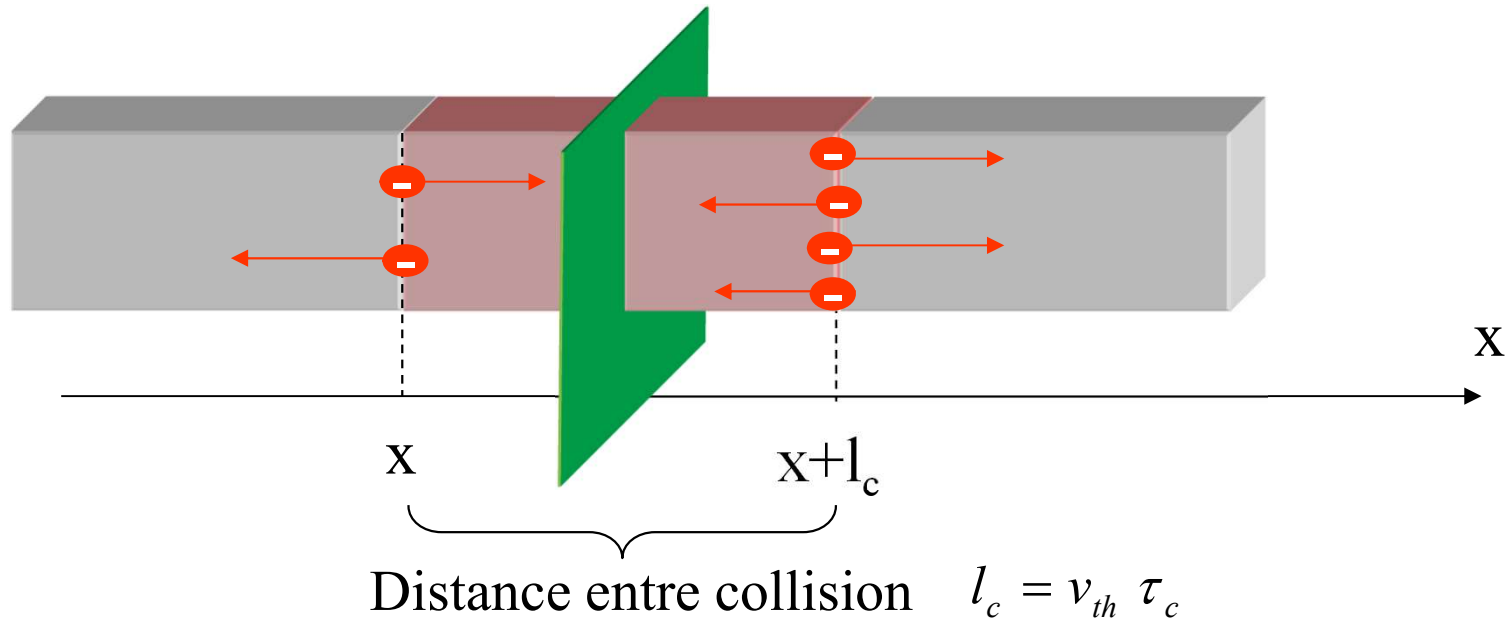
Ionisation complète:

$$N_D^+ = N_D \quad \text{et} \quad N_A^- = N_A$$

Que se passe-t-il si on enlève la séparation ?



Équation de diffusion



$$\left. \begin{aligned}
 \vec{j}_{\rightarrow} &= -q \frac{n(x)}{2} \vec{v}_{th} \\
 \vec{j}_{\leftarrow} &= -q \frac{n(x+l_c)}{2} \vec{v}_{th}
 \end{aligned} \right\} \begin{aligned}
 \vec{j}_{dif} &= \vec{j}_{\rightarrow} - \vec{j}_{\leftarrow} = q v_{th} \frac{l_c}{2} \cdot \left(\frac{n(x+l_c) - n(x)}{l_c} \right) \\
 \vec{j}_{dif,n} &= q v_{th}^2 \frac{\tau_c}{2} \cdot \frac{\partial n}{\partial x} = q D_n \cdot \frac{\partial n}{\partial x}
 \end{aligned}$$

Energie thermique d'un système à un degré de liberté:

$$\frac{1}{2} m v_{th}^2 = \frac{1}{2} kT$$

Mobilité et temps entre collisions:

$$\mu = \frac{q}{m} \frac{\tau_c}{2}$$

Relations d'Einstein:

$$D_n = v_{th}^2 \cdot \frac{\tau_c}{2} = \frac{kT}{q} \mu_n$$

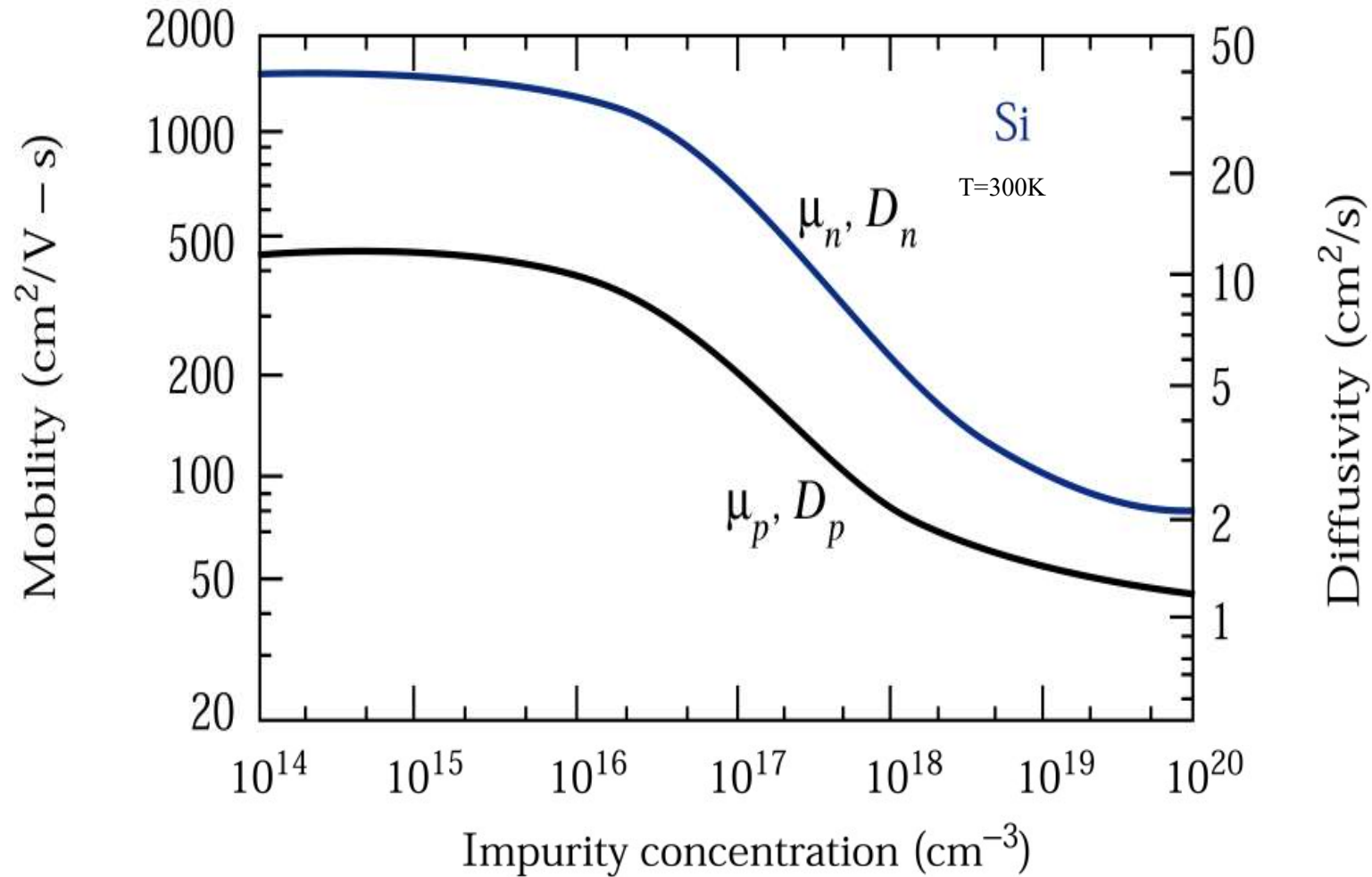
$$D_p = v_{th}^2 \cdot \frac{\tau_c}{2} = \frac{kT}{q} \mu_p$$

Courants de diffusion des électrons libres et des trous:

$$\vec{j}_{dif,n} = kT \mu_n \cdot \overrightarrow{grad}(n)$$

$$\vec{j}_{dif,p} = -kT \mu_p \cdot \overrightarrow{grad}(p)$$

S. M. Sze "Semiconductor Devices"



Relation
d'Einstein

$$D \equiv \frac{kT}{q} \cdot \mu$$



Courant de drift

$$\vec{j}_{drift,n} = q n \cdot \mu_n \cdot \vec{E}$$

$$\vec{j}_{drift,p} = q p \cdot \mu_p \cdot \vec{E}$$

Courant de diffusion

$$\vec{J}_{dif,n} = kT \cdot \mu_n \overrightarrow{grad}(n)$$

$$\vec{J}_{dif,p} = -kT \cdot \mu_p \overrightarrow{grad}(p)$$

Champ et potentiel
électriques

$$div(\vec{E}) = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} q (p + N_d^+ - n - N_a^-)$$

ou

$$\Delta\varphi = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} q (p + N_d^+ - n - N_a^-)$$

Solutions pour une structure à l'équilibre:

3 inconnues: Champ électrique E, (ou potentiel électrique φ)
 Concentration d'électrons libres n
 Concentration de trous p

3 équations:

1

$$\text{div}(\vec{E}) = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} q (p + N_d^+ - n - N_a^-)$$

**L'énergie de Fermi E_F
est constante**

2

$$\vec{j}_{tot} = \vec{j}_{drift,n} + \vec{j}_{drift,p} + \vec{j}_{dif,n} + \vec{j}_{dif,p} = 0$$

3

$$n \cdot p = n_i^2$$

Equations de base à l'équilibre

1

$$\text{div}(\vec{E}) = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} q (N_d^+ - n)$$

2

$$\vec{j}_{\text{drift},n} + \vec{j}_{\text{dif},n} = 0$$

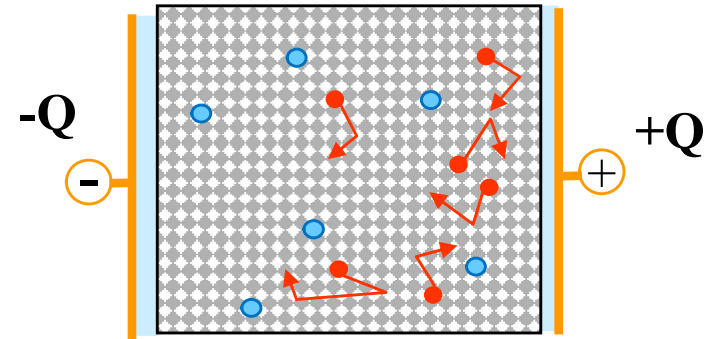
**L'énergie de Fermi E_F
est constante**

3

$$n \cdot p = n_i^2$$

+ conditions aux bords

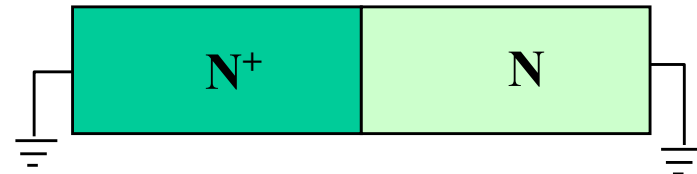
Condensateur



$$E_x(\text{left}) = -\frac{|Q|}{\epsilon_0 \epsilon}$$

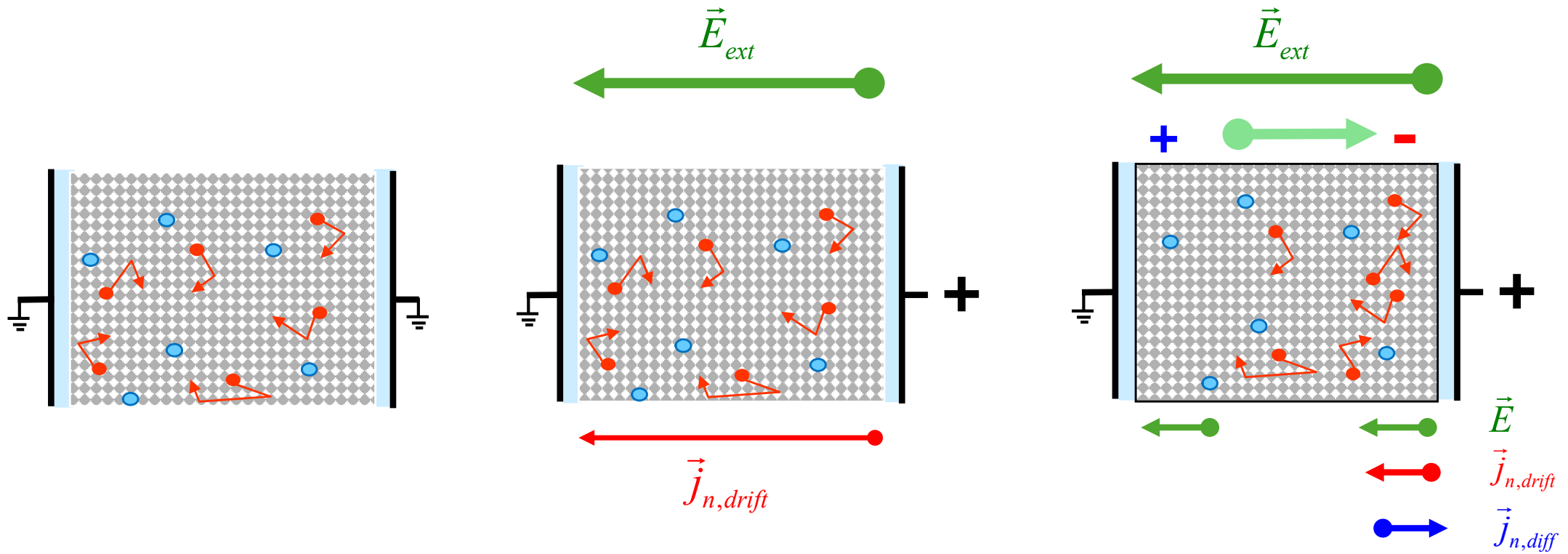
$$E_x(\text{right}) = -\frac{|Q|}{\epsilon_0 \epsilon}$$

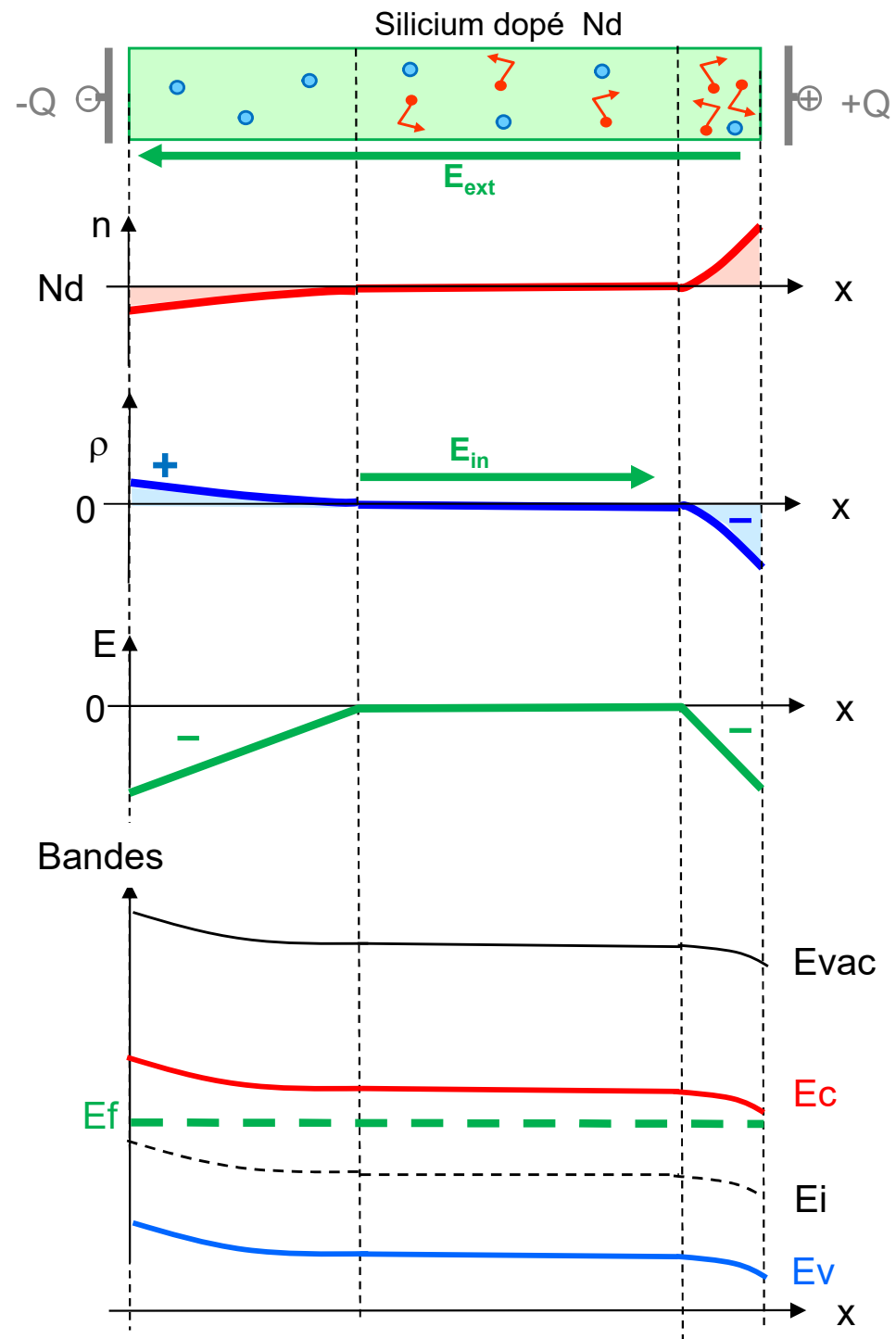
Jonction N⁺N

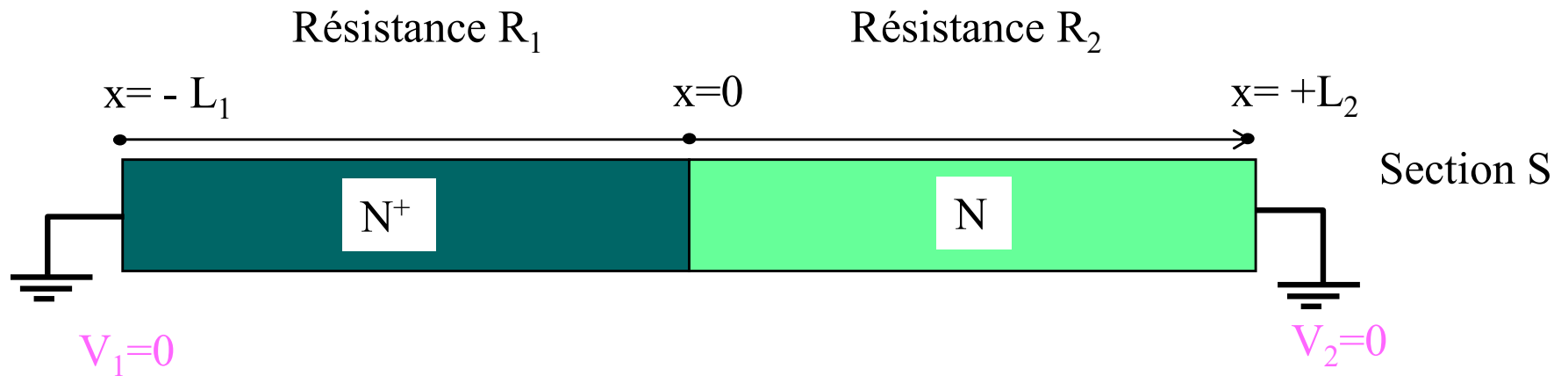


$$n(\text{left}) = N^+$$

$$n(\text{right}) = N$$

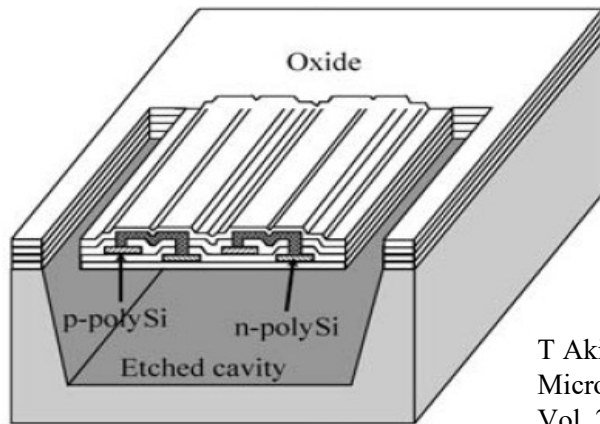
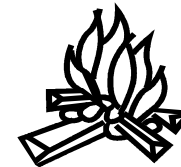
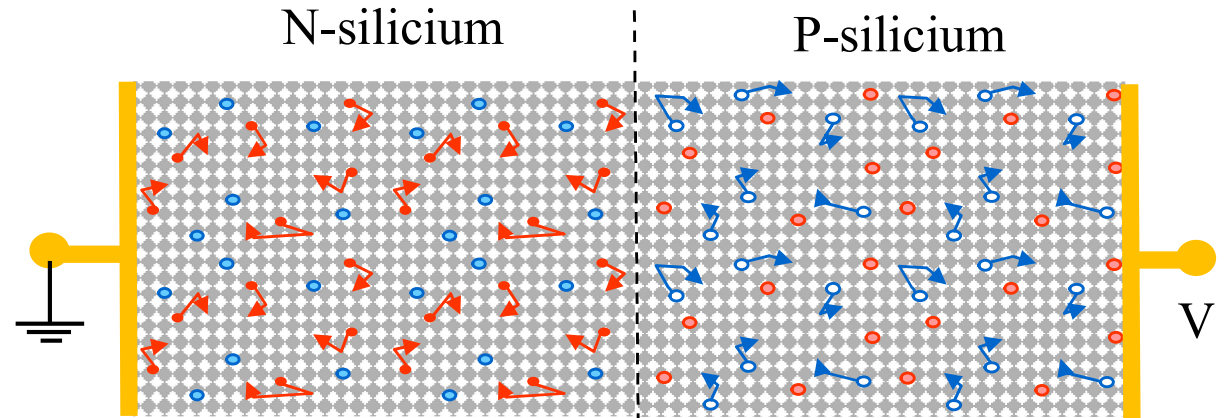
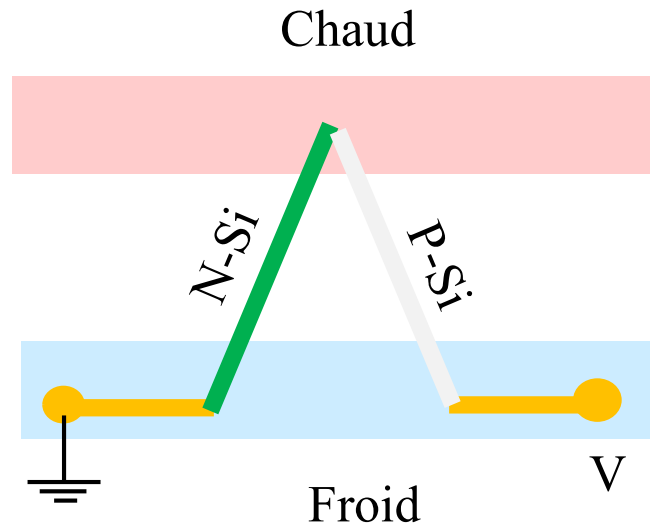






- Qu'est-ce que la zone de charge dans une jonction N^+/N à l'équilibre ?
- Quel est le champ électrique ?
- Quelles sont les deux composantes du courant dans cette structure ?
- Décrivez la structure de bande dans cette jonction.

Exercice 3.3: Thermocouple



T Akin in Advanced
Micro and Nanosystems.
Vol. 2. CMOS – MEMS,
Chap. 10