Propriétés électroniques des semiconducteurs

1ère année Polytech Paris Sud

Département Electronique & Systèmes Embarqués

Cédric KOENIGUER

POLYTECH PARIS-SUD

Plan

I. Introduction à la physique du solide

1) Rappels et outils
2) Propriétés d'un cristal
3) Caractérisation des porteurs

II. Propriétés des semiconducteurs

1) Caractérisation d'un semiconducteur
2) Dopage
3) Semiconducteur à l'équilibre

I. Introduction à la physique du solide

1) Rappels et outils

2) Propriétés d'un cristal

3) Caractérisation des porteurs

Tableau périodique des éléments

Ex : Silicium

$$\begin{array}{ccc} & \bullet & \\ \bullet & \mathrm{Si} & \bullet \\ & \bullet & \end{array}$$

- 3 couches
- 4 électrons sur la couche de valence

Nombre d'électrons sur la couche de valence

Nombre de couches électroniques

	I	II		Ib	IIb	III	IV	V	VI	VI	VIII
1	H										He
2	Li	Be				B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg				Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	...	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	...	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	...	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

Energies et électrons volts

Energies caractéristiques des SC : $E \approx 10^{-19}$ J

Le Joule est une unité peu adaptée à la physique des solides

Nouvelle unité : eV , électron-volt

1 eV = énergie d'un électron accéléré sous 1 V

$$\boxed{|E| = qV = 1.6\ 10^{-19}\ \mathrm{J} = 1\,eV}$$

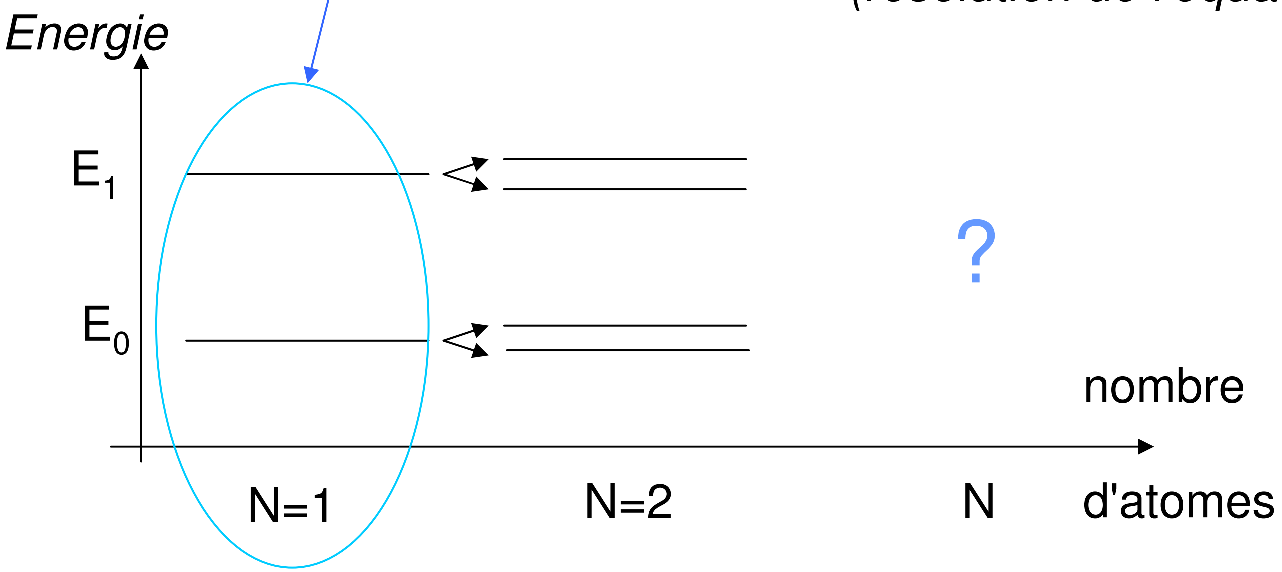
$$\boxed{E^{(eV)} = \frac{E^{(J)}}{q}}$$

Ex à Température ambiante : $k_B T = 4.14\,10^{-21}\ \mathrm{J} = 25\ \mathrm{meV}$

Mais : $\dfrac{k_B T}{q} = 25\ \mathrm{mV}$

Problématique : de l'atome au cristal

Atome isolé : niveaux d'énergie discrets pour les électrons
(résolution de l'équation de Schrödinger)

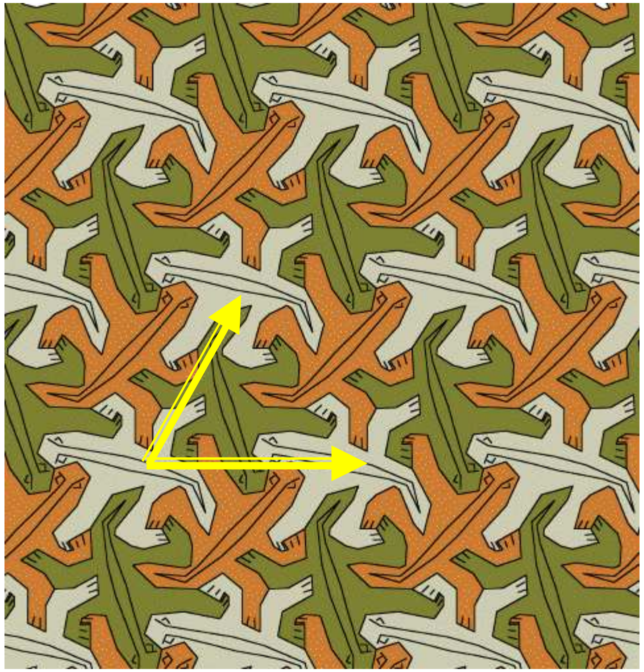


Dans les solides : 10^{22} atomes/cm^3

Pour connaître l'énergie :résolution de 10^{22} équations de Schrödinger couplées
$\Rightarrow$ impossible dans le cas général !

solides cristallins : simplification possible car les positions des atomes sont **périodiques** ($\neq$ des structures **amorphes**)

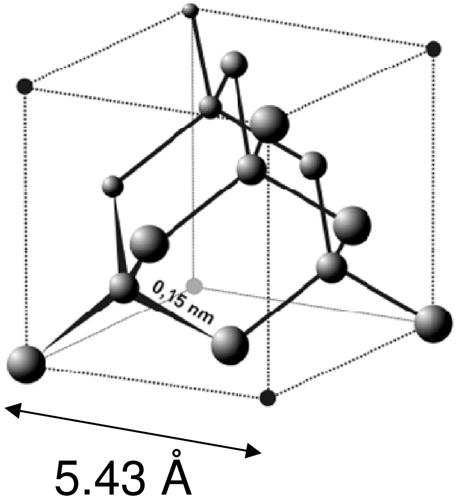
Périodicité des cristaux (1)

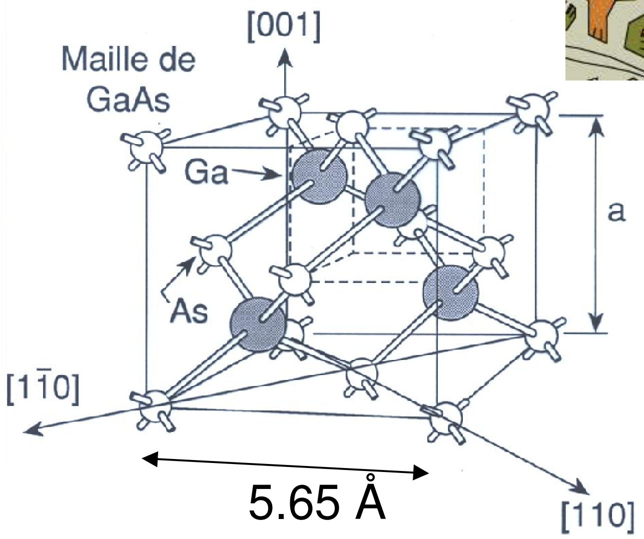


Cristal : solide dont l'arrangement atomique est périodique dans l'espace

⇒ motif élémentaire : **maille élémentaire**

Ex: Si





Périodicité des cristaux (2)

<u>réseau direct :</u>

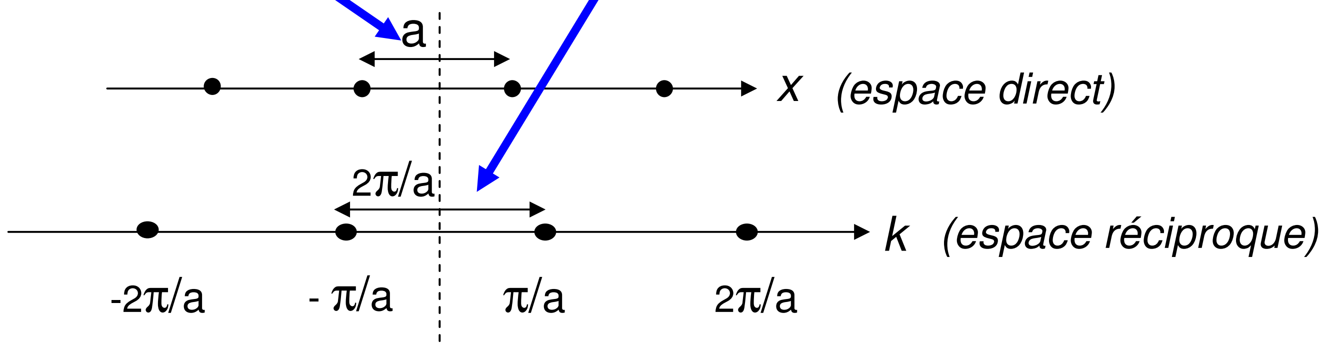
- espace réel, des distances (m)
- structure cristalline périodique
- maille élémentaire
- grandeurs physiques périodiques (densités, potentiel, ...)

Transformée (ou série) de Fourier ⟷

<u>réseau réciproque :</u>

- espace de Fourier, du vecteur d'onde k (m^{-1})
- structure périodique
- grandeurs périodiques
- équivalent de la maille élémentaire : 1ère zone de Brillouin

Ex :



Structure de bande : exemple de résolutions

Résolution numérique de l'équation de Schrödinger appliquée à un électron dans un potentiel moyen

$\Rightarrow$ diagramme des bandes d'énergie (E fonction de k)

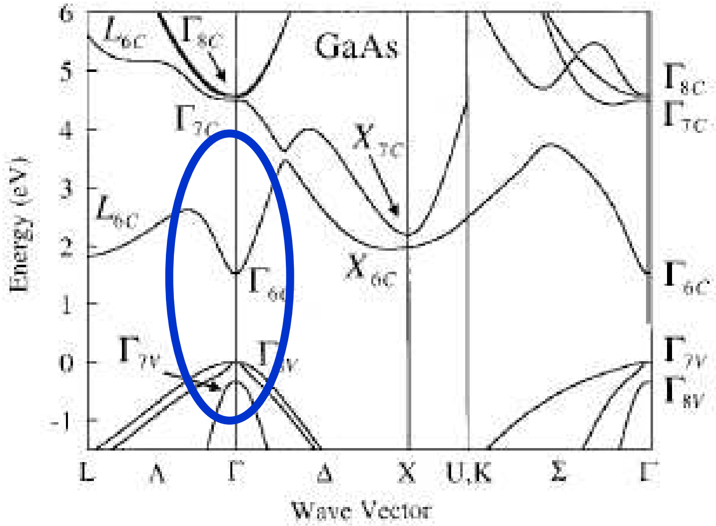


FIG. 2. The GaAs band structure, as calculated according to the present $sp^3s^{*}d$ $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ model for four directions.

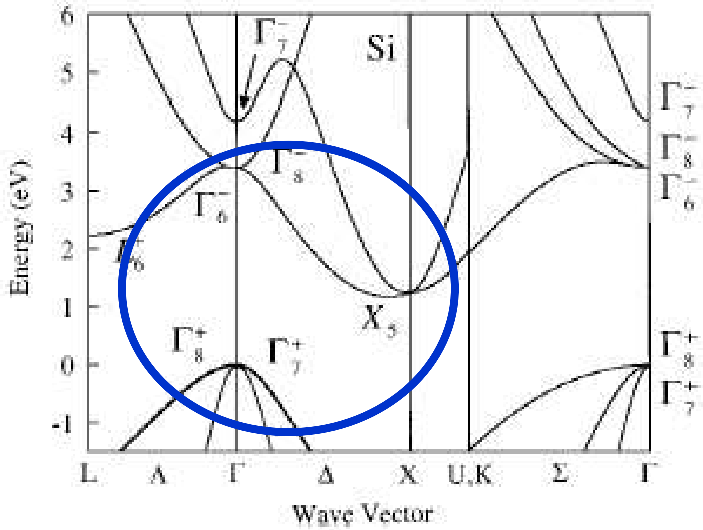


FIG. 3. The Si band structure, as calculated according to the present $sp^3s^{*}d$ $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ model for four directions.

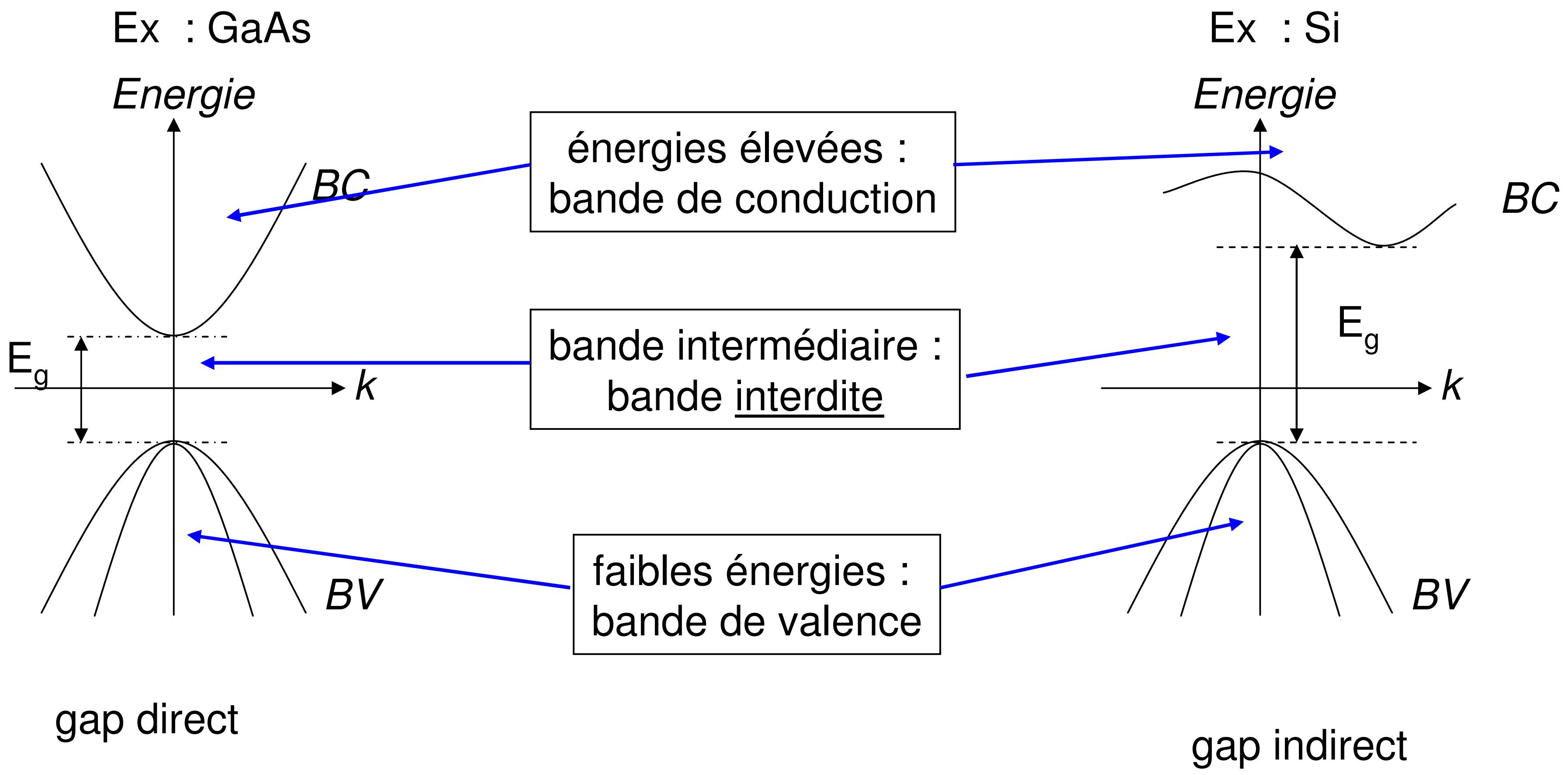
PHYSICAL REVIEW B, VOLUME 64, 115207

Energy-band structure of GaAs and Si: A *sps k·p method**

Nicolas Cavassilas,[1] Frédéric Aniel,[1] Kais Boujdaria,[2] and Guy Fishman[1]
[1]*Institut d'Electronique Fondamentale, UMR 8622 CNRS, Université Paris Sud, 91405 Orsay Cedex, France*
[2]*Département de Physique, Faculté des Sciences de Bizerte, Université de Tunis II, 7021 Zarzouna, Bizerte, Tunisia*
(Received 2 March 2001; published 31 August 2001)

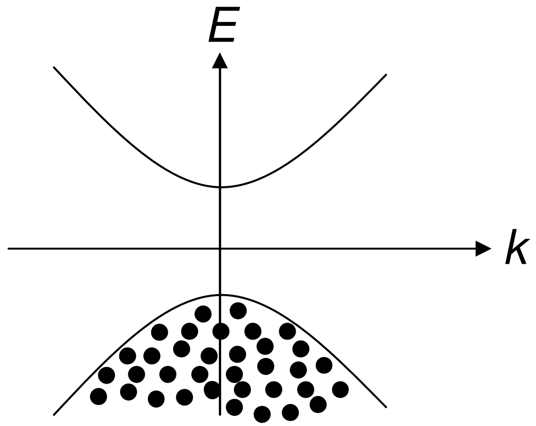
Structure de bande simplifiée (espace réciproque)

diagramme des bandes d'énergie : 3 zones dont
1 zone interdite et 2 zones continues

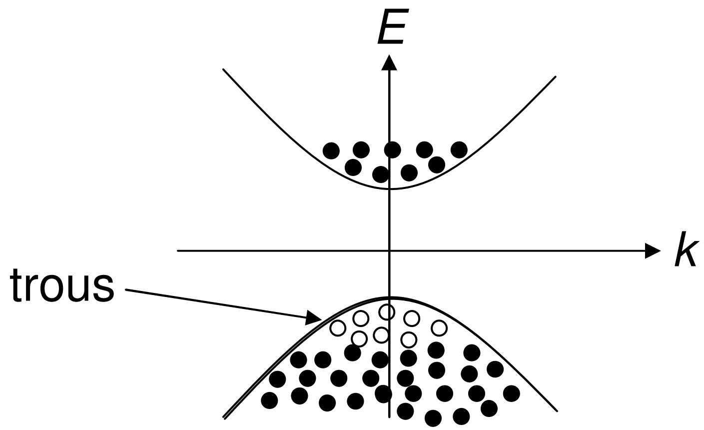


C. Koeniguer 2009/2010

Répartition des électrons dans les bandes



T=0 K



T> 0 K

trou = absence d'électron

bulles

Energie de Gap

Phénomènes électriques et optiques :

- électrons en bas de la BC (énergie minimale)
- les trous en haut de BV (énergie maximale)

On définit $\mathbf{E_G=Min(BC)-Max(BV)=E_C-E_V}$ **: énergie de gap**

- caractéristique du matériau
- dépend de T

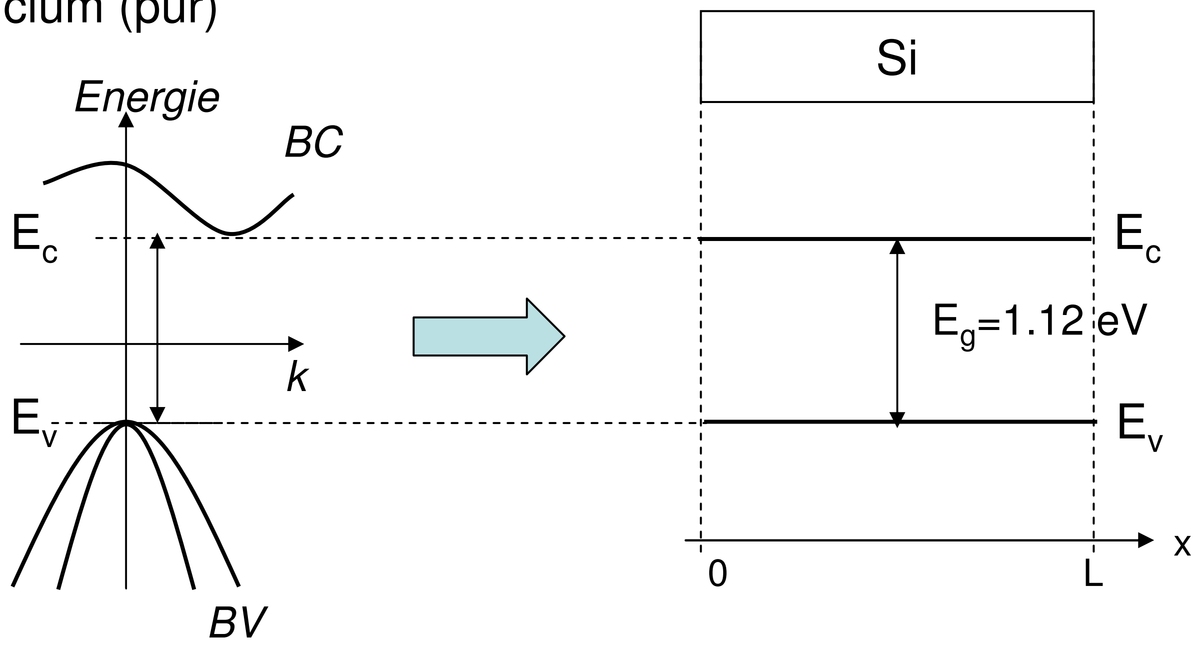
Exemple de Gap des SC courants :

SC	Si	Ge	GaAs
EG (T=300 K)	1.12 eV	0.66 eV	1.42 eV

Structure de bande dans l'espace direct

on représente E_C et E_V en fonction de x (position dans le matériau)

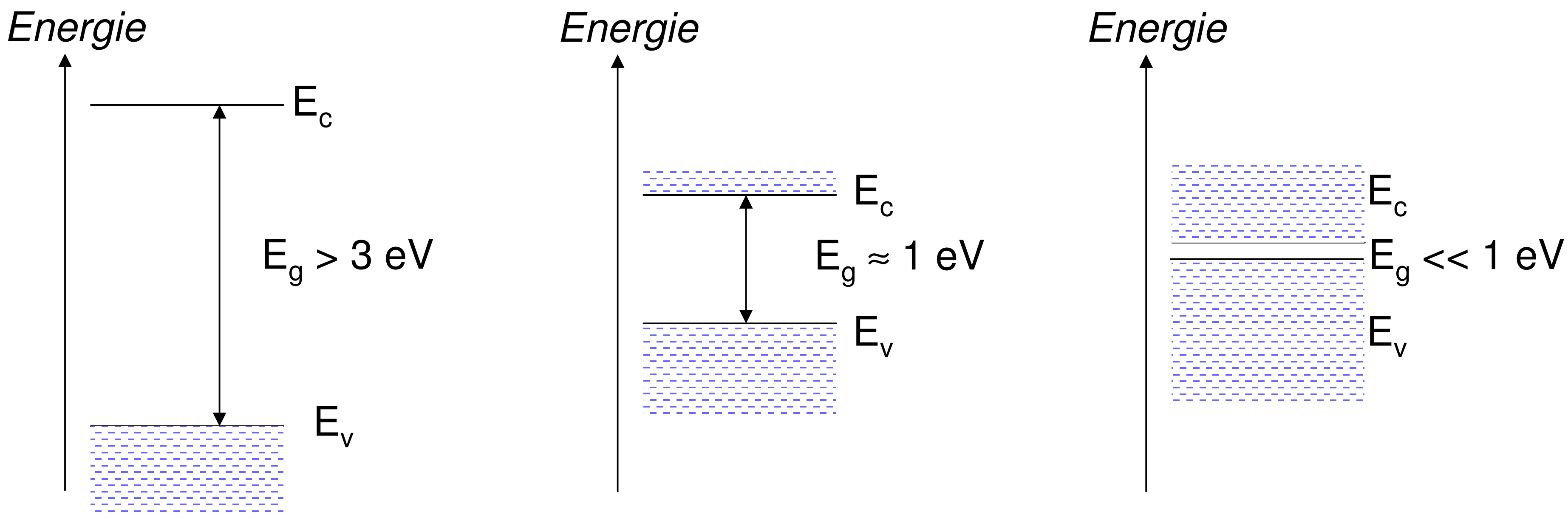
Ex : Silicium (pur)



Si V(x) : potentiel dans le SC

$$\begin{cases} E_C(x) = -q\,V(x) + \text{constante} \\ E_V(x) = -q\,V(x) + \text{constante} \end{cases}$$

Structure de bande des autres matériaux



Isolant

SC

conducteur (métal)

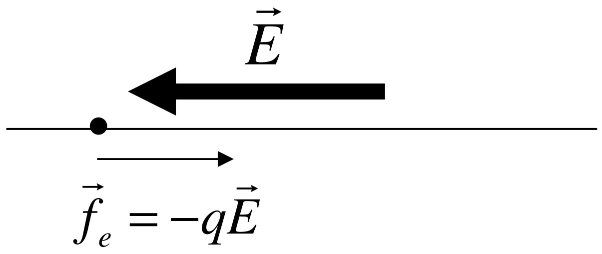
Rappels :

- énergie thermique à température ambiante k_BT=25 meV
- énergie d'un photon dans le visible : de 1.5 à 3 eV

C. Koeniguer 2009/2010

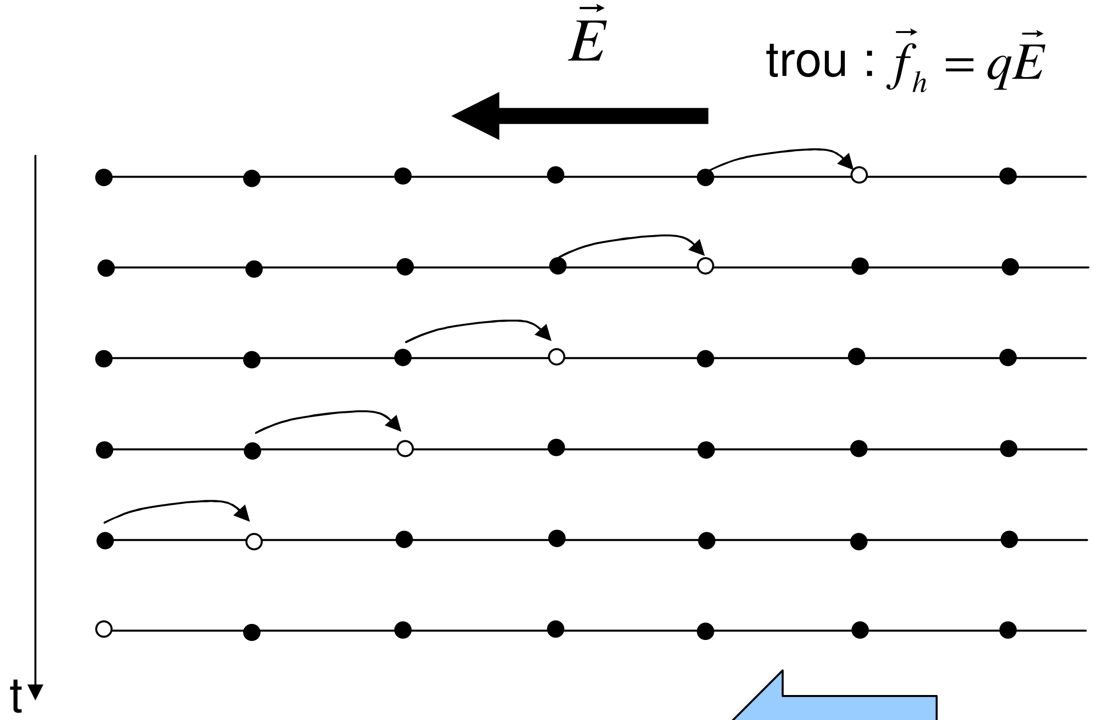
Déplacement des trous

Electrons dans la bande de conduction



Courant d'électrons

Electrons/trous dans la bande de valence

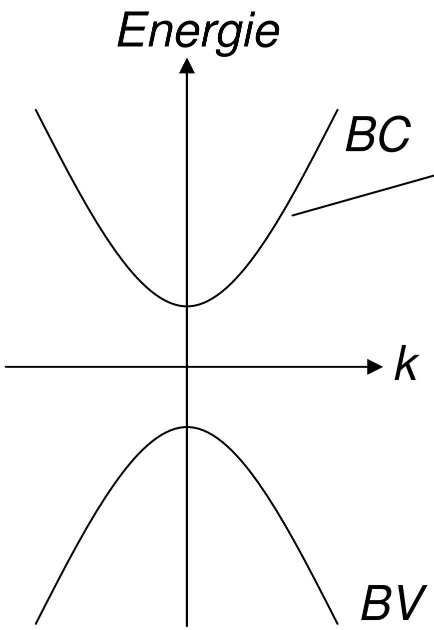


Courant de trous

Les électrons de la BC **<u>et</u>** les trous de la BV participent à un courant :
Il existe 2 types de porteurs (électrons et trous)

C. Koeniguer 2009/2010

Notion de masse effective



k faible : $E(k) = E_c + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 E}{\partial k^2} k^2$

$$E(k) = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$$

$$m^* = \frac{1}{\hbar^2} \frac{1}{\partial^2 E / \partial k^2} k^2$$

$\Rightarrow$ analogue à un électron dans le vide

idem pour les trous

La masse effective influence la mobilité des porteurs

Exemple : masse effective des électrons dans GaAs : $m^*=0.067\ m_0$

($m_0=9.1\ 10^{-31}$ kg)

Statistique de Fermi-Dirac

Répartition des électrons en fonction de l'énergie : fonction de Fermi Dirac liée à la nature des porteurs (mais pas au matériau)

$$\boxed{f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{k_B T}}}}$$

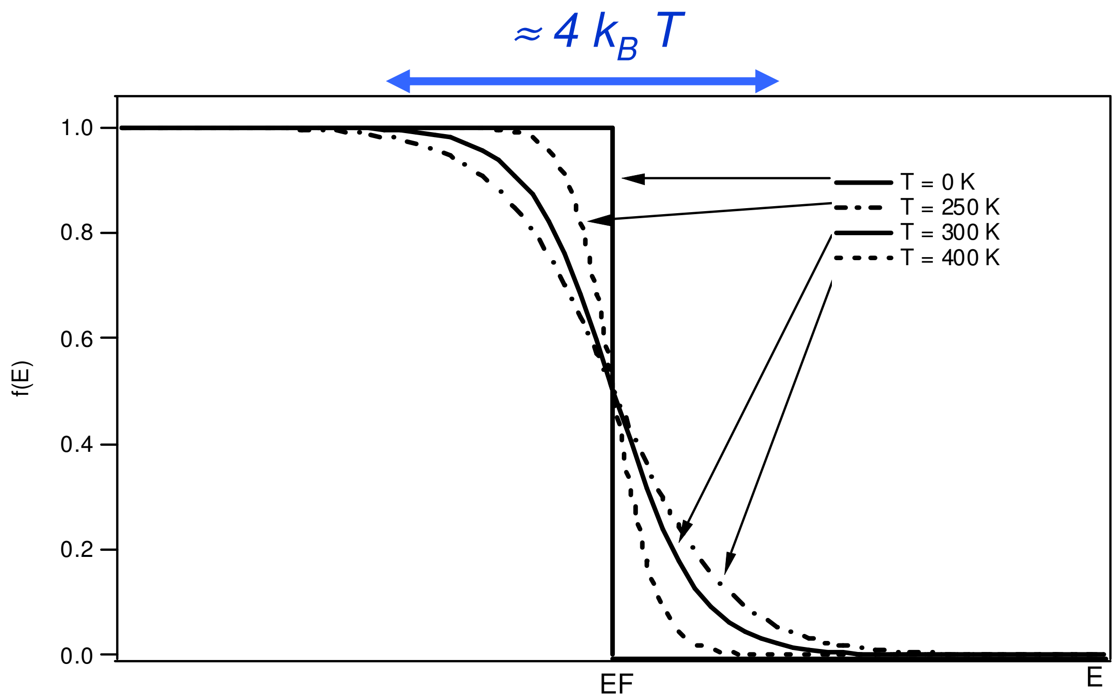
$$\begin{cases} (E - E_F) << k_B T : f(E) \approx 1 \\ (E - E_F) >> k_B T : f(E) \approx \exp(-(E - E_F)/k_B T) \end{cases}$$

E_F : niveau de Fermi (énergie)

- <u>dans la bande interdite</u> (dans la plupart des SC)
- rend compte de la densité d'électron à l'énergie E

Répartition des trous :

1-f(E)



C. Koeniguer 2009/2010

POLYTECH PARIS-SUD

Densité d'états et densité de porteurs dans un SC

Selon les matériaux, on peut stocker plus ou moins d'électrons (de trous)

entre E et E+dE : c'est lié la densité d'états d'énergie Nc(E) (électrons) et Nv(E) (trous)

Densité de porteurs :
- dépend de la statistique de Fermi (dû à la nature des porteurs)
- dépend du matériau

$$\begin{cases} n = \int_{BC} \overbrace{Nc(E)\, f(E) dE}^{\text{densité de porteurs entre E et E+dE}} & \text{(densité d'électrons)} \\ p = \int_{BV} Nv(E)\big(1 - f(E)\big)\, dE & \text{(densité de trous)} \end{cases}$$

Densité de porteurs dans un SC

On peut montrer que si $E_V<E_F<E_C$:

$$\begin{cases} n = N_C \, e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} \\ p = N_V \, e^{\frac{E_V - E_F}{k_B T}} \end{cases}$$

N_C, N_V : densités équivalentes d'états

- dépend du matériau et de T
- ordres de grandeur : 10^{17} à 10^{19} cm^{-3}

Rem : $$p \times n = N_C N_V \, e^{-E_G / k_B T}$$

II. Propriétés des semiconducteurs

1) Caractérisation d'un SC

2) Dopage

3) Semiconducteur hors équilibre :

- a) Généralités
- b) Génération/recombinaison
- c) Transport électronique
- d) Quasi-niveaux de Fermi
- e) Répartition des porteurs minoritaires

Notion d'équilibre thermodynamique

Définition :

- *Pas de perturbation externe (pas d'éclairement, pas de tension appliquée)*
- *équilibre thermique (régime permanent)*

équilibre thermodynamique ⟺ *E_F est constant*

⟺ $p \times n = \text{constante} = n_i^2$

⟹ $$n_i = \sqrt{N_c N_v}\, e^{-E_g / 2k_B T}$$

Grandeurs caractéristiques

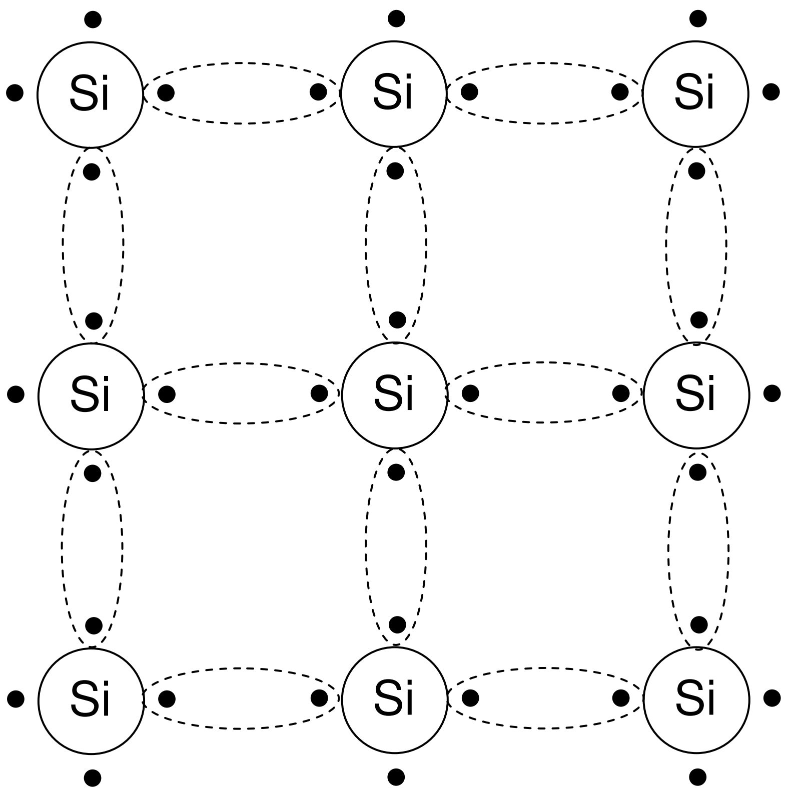
- *énergies :* E_C, E_V
- *énergie de Gap* E_G
- *densités de porteurs : n et p*
  - *porteurs majoritaires (électrons si n>p ou les trous si p>n)*
  - *porteurs minoritaires (électrons si n<p ou les trous si p<n)*
- *conductivité* σ *et résistivité* ρ *d'un matériau :*

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \sigma_n + \sigma_p$$

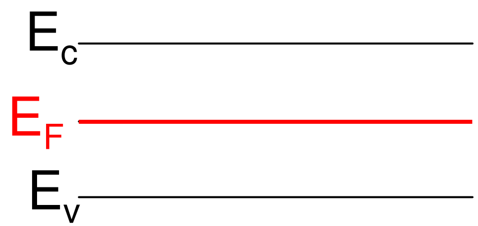
- *Caractéristiques électriques : I(V), C(V) et optiques*

Silicium intrinsèque

Ex : Silicium schématisé dans un plan



$\boxed{n=p=n_i}$ ⇒ $E_F \approx (E_C+E_V)/2$



Ordres de grandeur :

SC	Si	Ge	GaAs
$n_i(T=300\text{ K})$ cm^{-3}	10^{10}	10^{13}	10^{6}

Niveau de Fermi intrinsèque

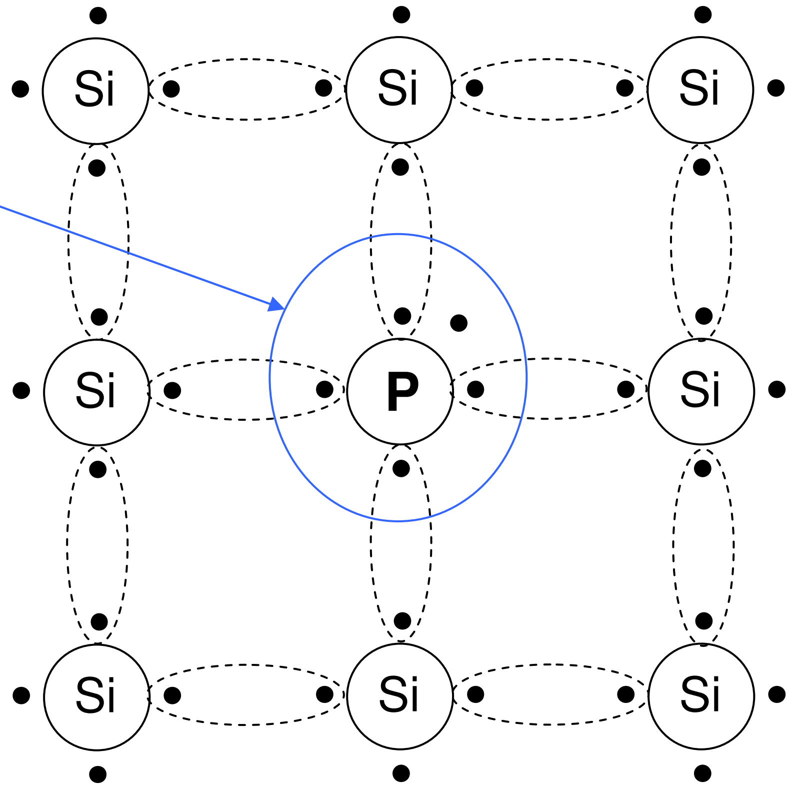
On définit E_i , niveau de Fermi intrinsèque : niveau constant, $E_i = (E_C+E_V)/2$

Quel que soit le SC :

$$\boxed{\begin{cases} n = n_i \; e^{-\frac{E_i - E_F}{k_B T}} \\ p = n_i \; e^{\frac{E_i - E_F}{k_B T}} \end{cases}} \Rightarrow \begin{cases} E_F > E_i : n > n_i > p \\ E_F = E_i : n = p = n_i \\ E_F < E_i : n < n_i < p \end{cases}$$

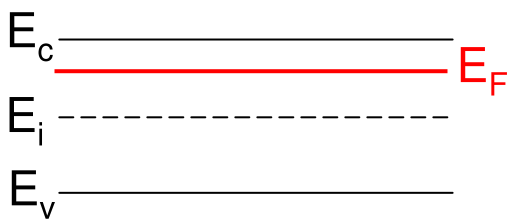
Dopage de type N

Si -> P (colonne V)



N_d : densité d'atomes donneurs

$$\left.\begin{aligned} n &= N_d >> n_i \\ p &= \frac{n_i^{\,2}}{N_d} << n_i \end{aligned}\right\} \quad E_F > E_i$$



Ordres de grandeur : N_{Si} # 10^{22} cm^{-3} ; N_d # 10^{15} -> 10^{18} cm^{-3}

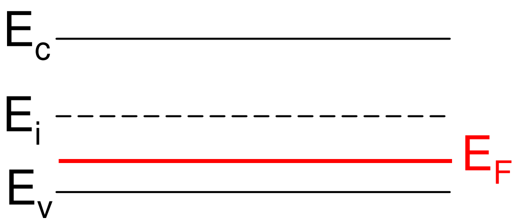
C. Koeniguer 2009/2010

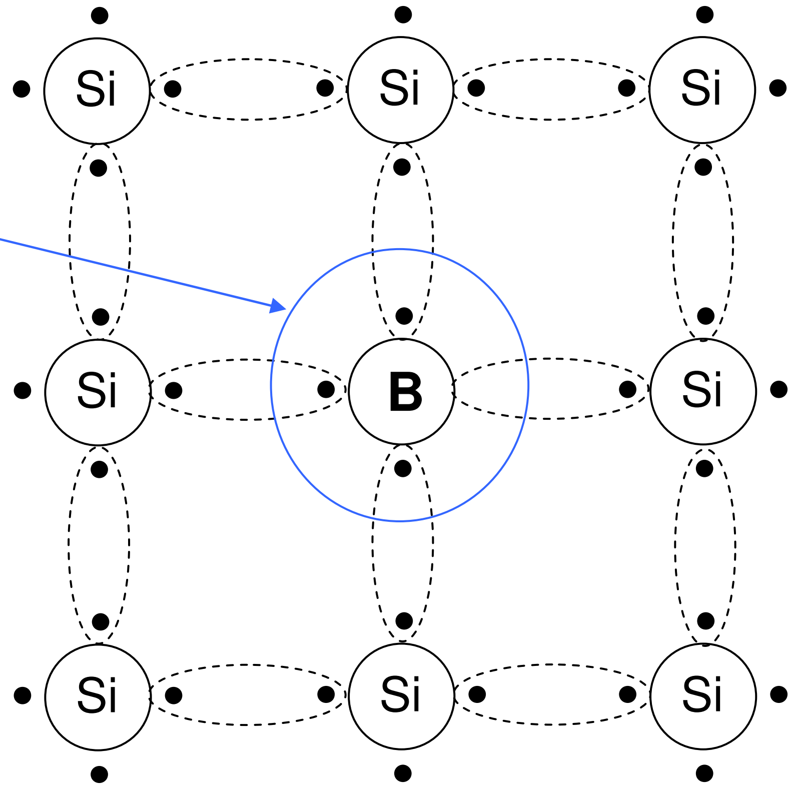
Dopage de type P

Si -> B (colonne III)

N_a : densité d'atomes accepteurs

$$\left.\begin{aligned} p &= N_a \gg n_i \\ n &= \frac{n_i^2}{N_a} \ll n_i \end{aligned}\right\} \quad E_F < E_i$$

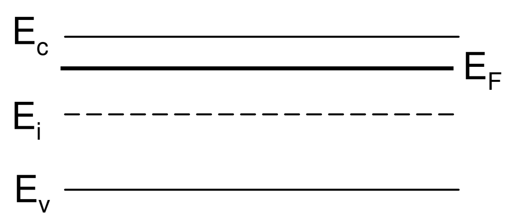




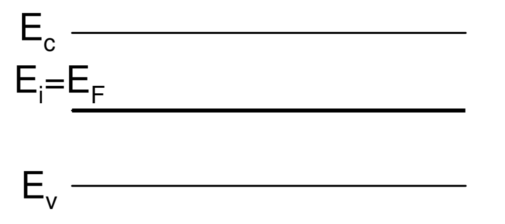
Ordres de grandeur : N_{Si} # 10^{22} cm^{-3} ; N_a # 10^{15} -> 10^{18} cm^{-3}

Bilan

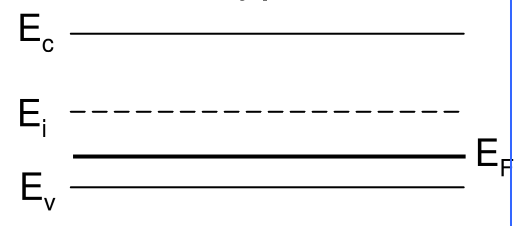
SC type N :



SC intrinsèque :



SC type P :



A l'équilibre et hors équilibre : $E_{C,V,i} = -q\,V + \text{constante}$

$$\begin{cases} n = N_C\, e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} = n_i\, e^{-\frac{E_i - E_F}{k_B T}} \\ p = N_V\, e^{\frac{E_V - E_F}{k_B T}} = n_i\, e^{\frac{E_i - E_F}{k_B T}} \end{cases}$$

Généralités : hypothèse de faible injection

Etude des dispositifs uniquement sous **hypothèse de faible injection**

• tension appliquées faibles ou rayonnements incidents faibles

• excès de porteurs Δn et Δp (par rapport à l'équilibre) tels que :

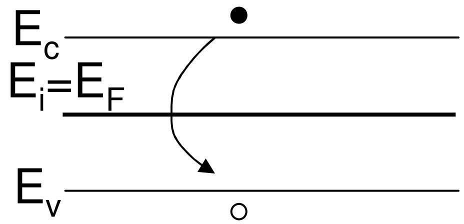
- pour un type N : $\Delta n \, , \Delta p << n_0 = N_d$
- pour un type P : $\Delta n \, , \Delta p << p_0 = N_a$

$\Rightarrow$ on ne perturbe pas les porteurs majoritaires.

Recombinaison de porteurs

Recombinaison de porteurs :

- radiatives (émission de photons) : émission spontanée ou stimulée
ex : LED, Laser
- non radiatives (pas d'émission de photons) : recombinaison Auger, vibration du réseau (phonon)



Taux de recombinaison :

• Pour les minoritaires :

$$\boxed{r_n = \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad ou \quad r_p = \frac{\Delta p}{\tau_p}}$$

τ_n ou τ_p : durée de vie des porteurs minoritaires

ordres de grandeurs : 1µs à 10 µs

•Pour les majoritaires : $r_n \approx 0$ ou $r_p \approx 0$

Génération de porteurs

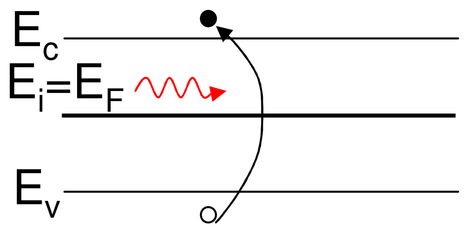
<u>Génération de porteurs</u> :

- activation thermique (peu efficace, lent)

ex: bruit en ISO élevée sur les APN

- éclairement ($h\nu > E_g$)

ex : conversion photons/porteurs dans un APN



$\boxed{\text{Création de paires } e^-/\text{trous} \Rightarrow \Delta n \approx \Delta p}$

<u>Taux de génération</u> :

$$g = \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad ou \quad g = \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

Transport électronique : conduction

Conduction = mouvement des porteurs sous champ $\vec{E}$

• Pour les électrons (de la BC) : $\vec{j}_{n\,cond} = \sigma_n \vec{E} = qn\mu_n \vec{E}$

• Pour les trous (de la BV) : $\vec{j}_{p\,cond} = \sigma_p \vec{E} = qp\mu_p \vec{E}$

• Densité de courant totale :

$$\boxed{\vec{j}_{cond} = \vec{j}_{n\,cond} + \vec{j}_{p\,cond} = \sigma\,\vec{E} = \left(qp\mu_p + qn\mu_n\right)\vec{E}}$$

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*}$$

µ mobilité du porteur, où
• τ : temps de relaxation
• m* : masse effective

Transport électronique : diffusion

diffusion = mouvement des porteurs dû à une <u>inhomogénéité</u> de leur quantité

• Pour les électrons (de la BC) : $\vec{j}_{n\,diff} = q\,D_n\,\overrightarrow{\mathbf{Grad}}(n)$

• Pour les trous (de la BV) : $\vec{j}_{p\,diff} = -q\,D_p\,\overrightarrow{\mathbf{Grad}}(p)$

Attention au signe

• D_n et D_p : coefficients de diffusion ($m^2.s^{-1}$)

• Densité de courant totale :

$$\boxed{\vec{j}_{diff} = \vec{j}_{n\,diff} + \vec{j}_{p\,diff} = qD_n\overrightarrow{\mathbf{Grad}}(n) - qD_p\overrightarrow{\mathbf{Grad}}(p)}$$

Transport électronique : courant total

$$\boxed{\vec{j} = \vec{j}_{diff} + \vec{j}_{cond}}$$

Lien entre la conduction et la diffusion : relations d'Einstein

$$\boxed{D_n = \mu_n \frac{k_B T}{q}} \qquad \boxed{D_p = \mu_p \frac{k_B T}{q}}$$

Transport électronique : équations de continuité

Bilan des porteurs dans un volume élémentaire, pendant dt :

• Pour les électrons (de la BC) :

$$\boxed{\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q}\operatorname{div}(\vec{j}_n) + g_n - r_n}$$

• Pour les trous (de la BV) :

$$\boxed{\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q}\operatorname{div}(\vec{j}_p) + g_p - r_p}$$

Attention au signe

Quasi-niveaux de Fermi : problématique

Soit un SC de type N à l'équilibre :

$$\begin{cases} n_0 = N_C \, e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} = N_d & \longrightarrow \quad E_F^{\,eq} - E_C = k_B T \ln(n_0 / N_C) \\ p_0 = N_V \, e^{\frac{E_V - E_F}{k_B T}} = n_i^{\,2} / N_d & \longrightarrow \quad E_F^{\,eq} - E_C = k_B T \ln(N_V / p_0) \end{cases}$$

Si on injecte des porteurs sous l'hypothèse de faible injection :

$$\left.\begin{array}{ll} n = n_0 + \Delta n \approx n_0 & \longrightarrow \quad E_F = E_F^{\,eq} \\ p = p_0 + \Delta p \approx \Delta p >> p_0 & \longrightarrow \quad E_F < E_F^{\,eq} \end{array}\right\} \text{contradiction !}$$

Quasi-niveaux de Fermi : définition

Hors équilibre : il faut un niveau de Fermi par porteur :

- quasi-niveau de Fermi pour les électrons : E_{Fn}
- quasi-niveau de Fermi pour les trous : E_{Fp}

$$\begin{cases} n = N_C \; e^{-\frac{E_C - E_{Fn}}{k_B T}} = n_i \; e^{-\frac{E_i - E_{Fn}}{k_B T}} \\ p = N_V \; e^{\frac{E_V - E_{Fp}}{k_B T}} = n_i \; e^{\frac{E_i - E_{Fp}}{k_B T}} \end{cases}$$

Longueur de diffusion des porteurs minoritaires (1)

SC de type N à l'équilibre, homogène, de longueur L très grande

$$\begin{cases} n_0 = N_d \\ p_0 = n_i^2 / N_d \end{cases}$$

On considère ce SC hors équilibre :

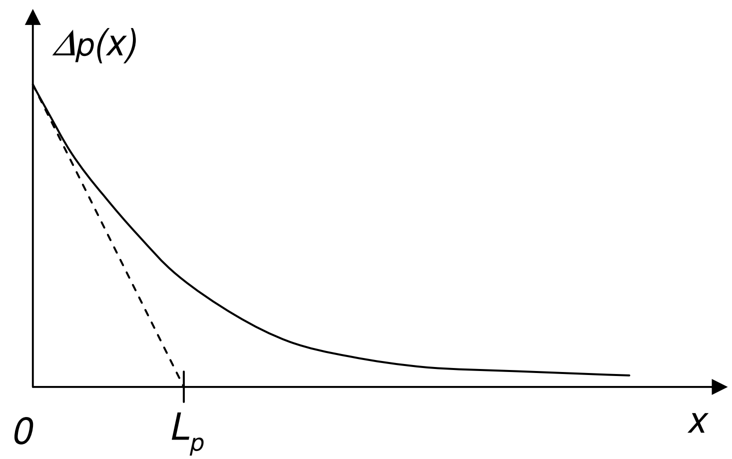
- on génère des porteurs en x=0 uniquement : g(x)=0 pour x>0
- hypothèse de faible injection

Que vaut n(x) et p(x) ?

Longueur de diffusion des porteurs minoritaires (2)

$$\begin{cases} n = n_0 + \Delta n \approx N_d & \text{(faible injection)} \\ p = p_0 + \Delta p \end{cases}$$

On montrera en TD (cf TD2) que : $\Delta p(x) = \Delta p(0)\, e^{-x/L_p}$



avec $\boxed{L_p = \sqrt{D_p \tau_p}}$: longueur de diffusion des trous