



Filière : SMP -- Semestre : VI

Module : Physique des Matériaux II

Chapitre2 : Application – Physique des Semi-conducteurs

Pr Khechoubi El Mostafa

Année universitaire 2023/2024



INTRODUCTION

Chapitre1 : Rappel Théorie des bandes – Propriétés des Semi-conducteur

Chapitre2 : Application – Physique des Semi-conducteurs

Chapitre3 : Vibration des Phonons

Chapitre4 : Défauts dans les cristaux

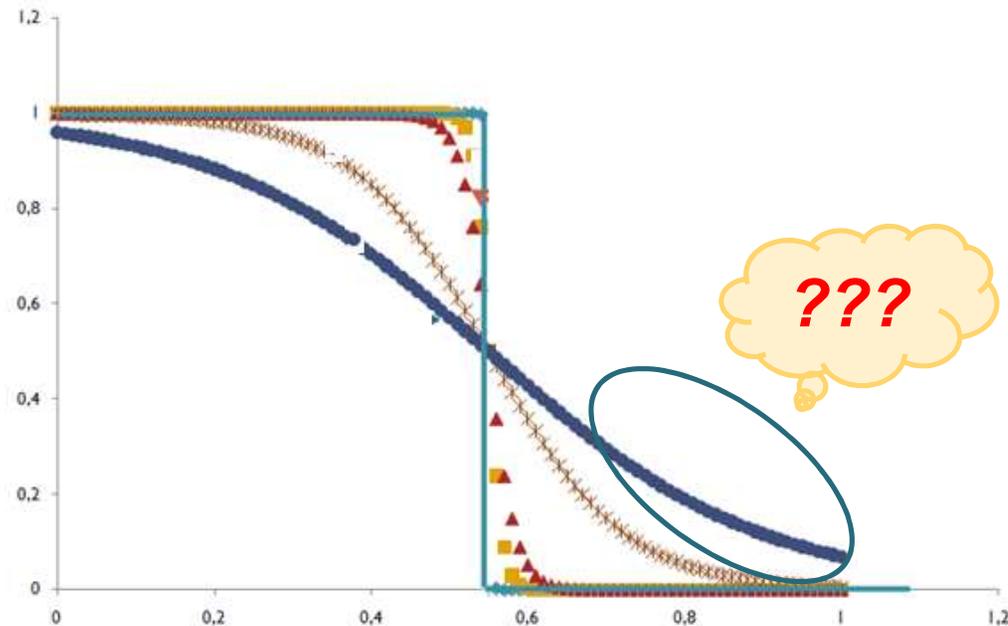
Chapitre5 : Propriétés optiques des matériaux

Chapitre6 : Propriétés électriques, magnétiques, supraconductivité

Dégénérescence dans un Semi conducteur

Semi conducteur dégénéré

On dit qu'un semi conducteur est dégénéré lorsque le niveau de Fermi est situé dans une bande permise, bande de valence ou bande de conduction.



En régime dégénéré on ne peut plus approximer la distribution de Fermi Dirac par une distribution de Maxwell Boltzmann

Les densités des porteurs libres sont données par les expressions

$$n = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_{E_C}^{+\infty} (E - E_C)^{1/2} \cdot f_D(E) \cdot dE \quad P = 2 \int_{-\infty}^{E_V} D_V(E) \cdot (1 - f_D(E)) dE$$

Pour calculer cette expression on utilise les approximations intégrales de type :

$$I(\alpha) = \int_0^{\infty} \frac{x^\alpha}{e^x + 1} \quad I(1/2) = 0,678$$

Semi conducteur non dégénéré

Dans le cas contraire, qui correspond au fonctionnement de la majorité des composants, le niveau de Fermi est situé dans la bande interdite.

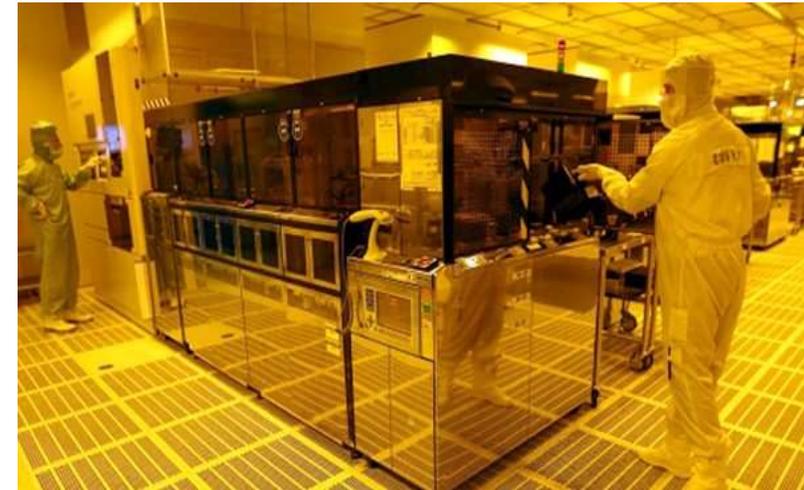
Le niveau de Fermi est situé dans la bande interdite

Semi conducteur intrinsèque

Concentration intrinsèque

Aucun défaut physique

Aucune impureté dans le réseau



Chambres blanches

Chaque électron de la BC est relié à un trou de la BV

$$n = p = n_i \quad n_i = \sqrt{np} = \sqrt{n_C \cdot n_V} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

n_i : concentration intrinsèque

A température ambiante

	Si	Ge	GaAs	InP
n_i (cm^{-3})	10^{10}	$2 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^7$

Position du niveau de Fermi intrinsèque

$$n = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_F - E_C}{k_B T}} \quad p = 2 \left(\frac{m_t k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_V - E_F}{k_B T}}$$

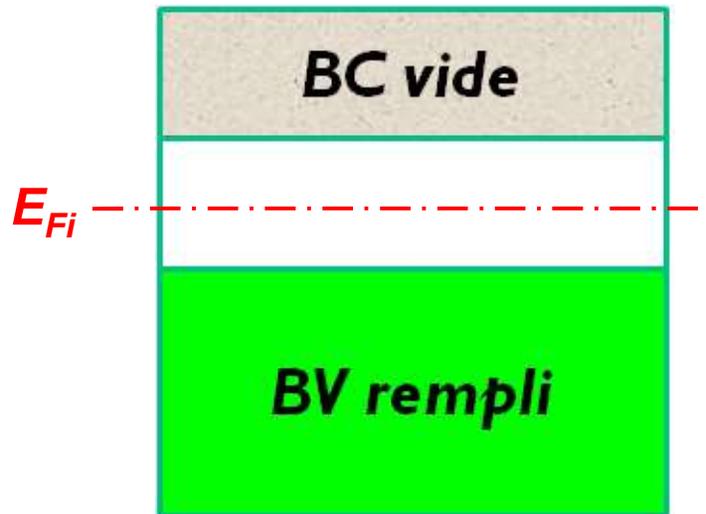
$$m_e^{3/2} e^{\frac{E_F - E_C}{k_B T}} = m_t^{3/2} e^{\frac{E_V - E_F}{k_B T}}$$

$$e^{2\frac{E_F}{k_B T}} = \left(\frac{m_t}{m_e} \right)^{3/2} e^{\frac{E_V + E_C}{k_B T}}$$

$$E_F = \frac{1}{2} (E_V + E_C) + \frac{3}{4} k_B T \ln \left(\frac{m_t}{m_e} \right)$$

$$E_{F_i} = \frac{1}{2}(E_C + E_V) + \frac{3}{4}k_B T \cdot \ln\left(\frac{m_t}{m_e}\right)$$

A T=0K

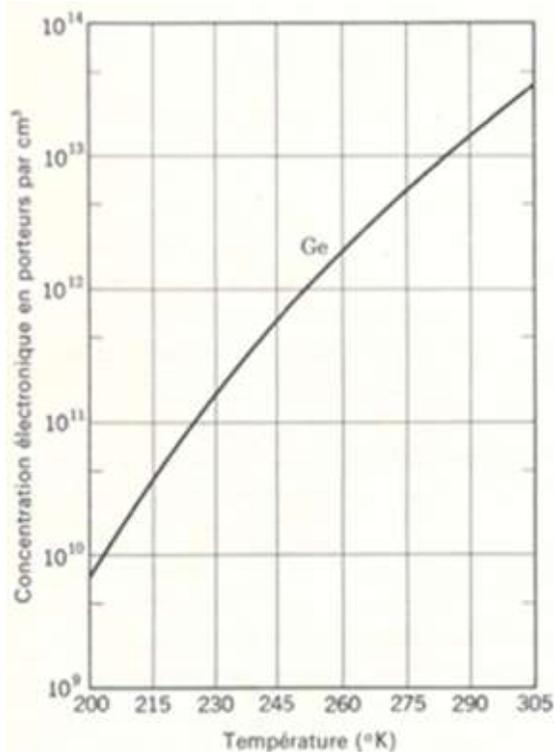


$$E_{F_i} \approx \frac{1}{2}(E_C + E_V)$$

A T≠0K

Le rapport des masses effectives est de l'ordre de 1 dans les Semi conducteurs à gap indirect et de l'ordre de 10 dans les semi conducteurs à gap direct.

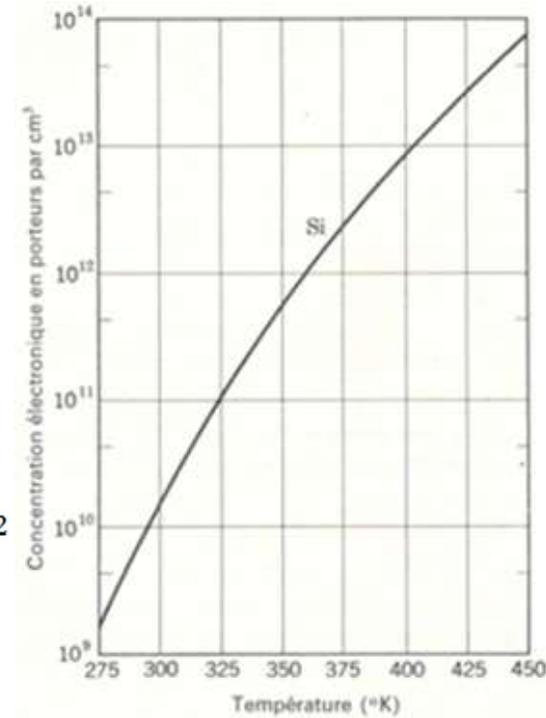
Il en résulte que le niveau de Fermi d'un semi conducteur intrinsèque est toujours très voisin du milieu du gap à la température ambiante



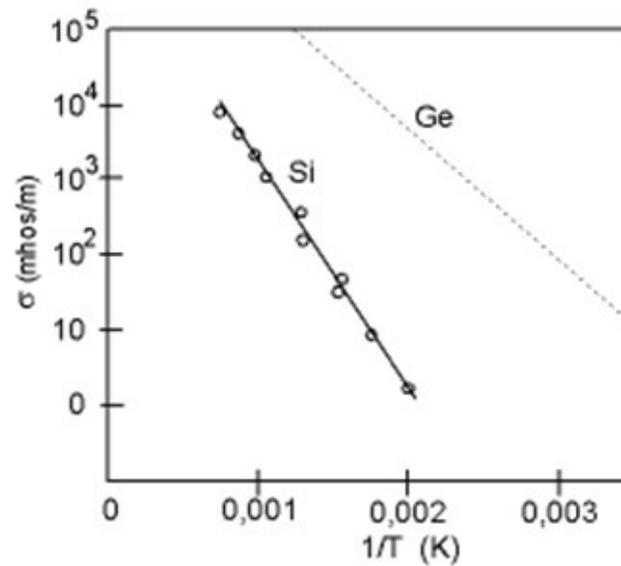
$$n_i = \sqrt{np} = \sqrt{n_c \cdot n_v} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

Le terme exponentielle est prédominant sur le terme puissance

$$n_c = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \quad n_v = 2 \left(\frac{m_t k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$



$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$



Propriétés de conduction

La mobilité dans un conducteur est donnée par la relation : $\vec{v} = -\frac{e\tau}{m}\vec{E} = \mu_n\vec{E}$

$$\text{Soit : } \mu = \frac{v}{E}$$

La conductivité est définie par la relation : $\sigma = ne\mu$

De la même manière on définit la mobilité des trous

La mobilité est positive dans les deux cas

La conductivité électrique dans un matériau semi conducteur est due à la mobilité des porteurs de charge

Cette conductivité électrique est la contribution des deux porteurs de charge

$$\sigma = ne\mu_{\bar{e}} + pe\mu_t$$

Concentration des électrons

Concentration des trous

$$v = v_l = \frac{eE\tau}{m}$$

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

Mobilité et temps de relaxation

$$\mu_{\bar{e}} = \frac{e\tau_{\bar{e}}}{m_e}$$

$$\mu_t = \frac{e\tau_t}{m_t}$$

***Mobilité des porteurs à la température ambiante
(cm²/V.s)***

Cristal	Electrons	Trous
Si	1300	500
Ge	4500	3500
GaAs	8800	400
GaSb	4000	1400

***La Mobilité dans le cuivre métallique à la température ambiante
Est de l'ordre de 35 cm²/V.s***

Semi conducteur extrinsèque

Un semi-conducteur « *extrinsèque* » est un semi-conducteur pour lequel, à l'équilibre thermodynamique, la concentration en électrons n est différente de la concentration en trous p

Cette différence est obtenue le plus souvent en introduisant dans le matériau de manière intentionnelle une faible concentration d'impuretés de nature contrôlée

Cet ajout est appelé « *dopage* »

Ce dopage a une influence considérable sur les propriétés des semi-conducteurs

Par exemple, l'ajout de un atome de bore pour 10^5 atomes de silicium augmente la conductivité du silicium d'un facteur 10^3 à température ambiante



Dans un semi-conducteur composé comme AsGa, une déficience stœchiométrique de l'un des constituants agira comme une impureté. On parle alors de semi-conducteur déficitaire

Les éléments chimiques choisis comme dopant présentent une valence différente de celle du semi-conducteur

Ils se positionnent dans son réseau en site substitutionnel, c'est-à-dire en remplacement de certains atomes

Si après le dopage

la concentration en électrons est supérieure à celle des trous, on qualifiera le semi-conducteur de **type N**

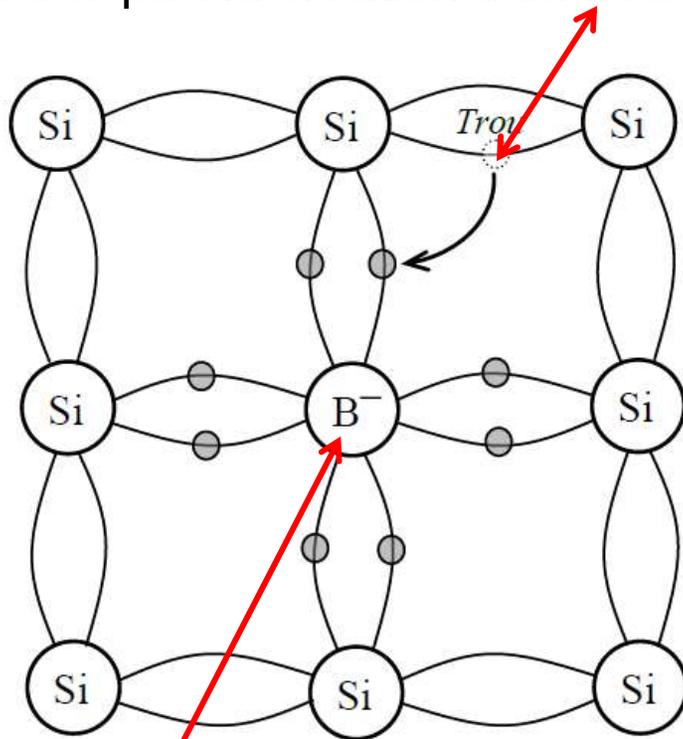
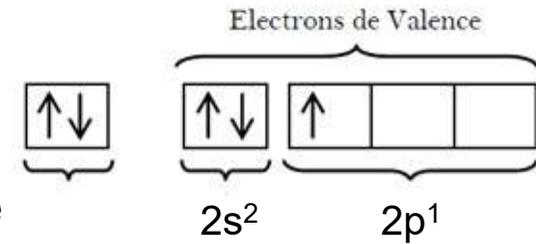
la concentration en trous est supérieure à celle des électrons, on qualifiera le semi-conducteur de **type P**

Semi conducteur de type P

Le dopage d'un semi-conducteur, le silicium par exemple, par des atomes de Bore : 3 électrons dans la couche externe

permet, à température ambiante :

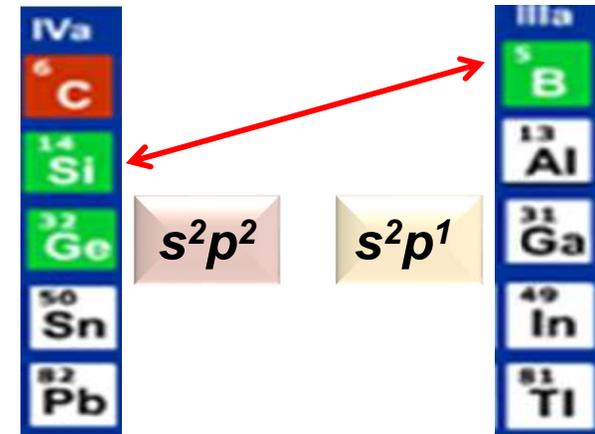
d'une part la création d'un trou dans la bande de valence



d'autre part l'apparition d'une charge négative excédentaire autour de l'atome de Bore

L'atome de Bore est considéré dans ce cas comme **un élément accepteur** d'électrons. le Semi-conducteur dopé par des atomes trivalents est de type P

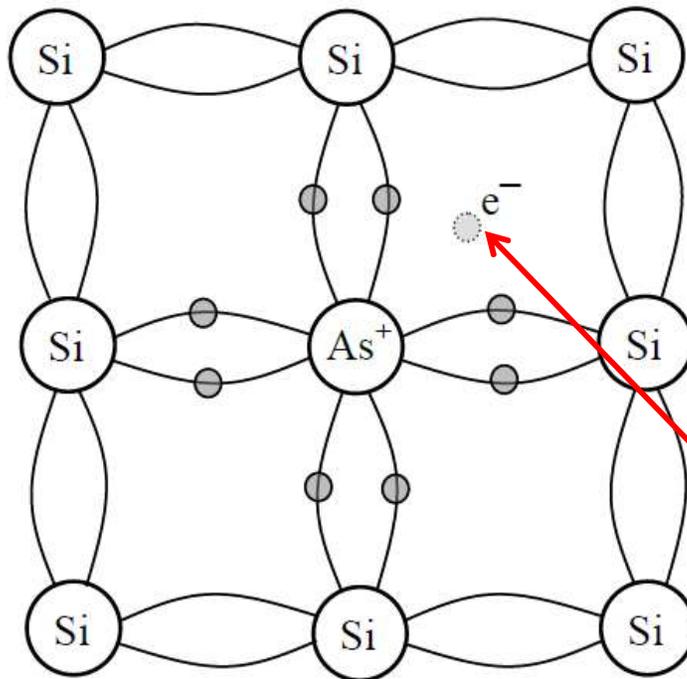
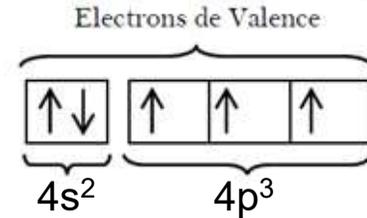
Dopage par un élément de type III



Introduction d'une faible concentration N_a d'atomes accepteurs

Semi conducteur de type N

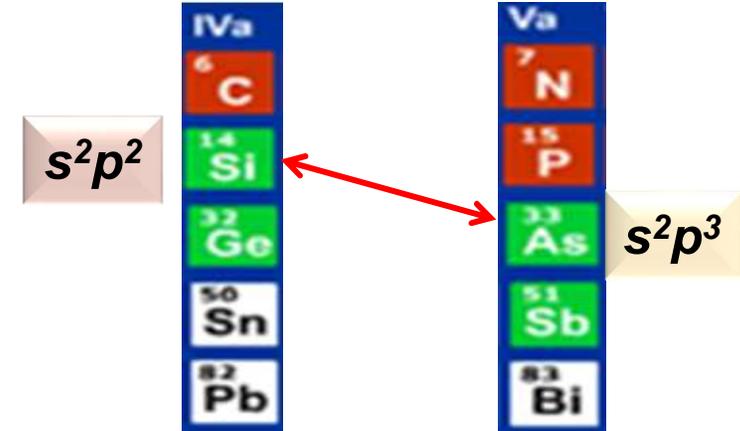
Dans ce cas, les impuretés sont les atomes pentavalents de la colonne V. Les éléments le plus utilisé dans ce type de dopage sont l'arsenic (As) et le phosphore (P) : 5 électrons dans la couche externe.



Dans le réseau cristallin, l'atome d'As est entouré de 9 électrons

8 électrons d'entre eux saturent les orbitales liantes

Dopage par un élément de type V



Introduction d'une faible concentration n_d d'atomes donneurs

L'électron restant occupe une orbitale délocalisée dans le champ positif de l'ion As^+

Concentration des porteurs de charge

Considérons un semi conducteur contenant une concentration N_d de donneurs et une concentration N_a d'accepteurs

Soit N_a^- le nombre d'accepteurs ionisés, c'est-à-dire ayant accepté un électron supplémentaire

Soit N_d^+ le nombre de donneurs ionisés, c'est-à-dire ayant accepté un électron supplémentaire

Le matériau étant neutre, l'ensemble des charges positives est égal à l'ensemble des charges négatives

L'équation de neutralité électrique du matériau s'écrit

$$n + N_a^- = p + N_d^+$$

Etudions tout d'abord le système à la température ambiante. En raison du fait que l'énergie thermique kT est du même ordre de grandeur que les énergies de liaison de l'électron sur le donneur et du trou sur l'accepteur, tous les donneurs et accepteurs sont ionisés.

L'équation de neutralité électrique se réduit donc à : $n + N_a = p + N_d$

Dans le cas d'un semi conducteur

La condition : $N_a = N_d = 0$ n'est jamais réalisée

lors de la cristallogenèse, le semi conducteur est toujours contaminé par des impuretés

En d'autres termes le semi conducteur intrinsèque n'existe pas

Il existe en fait trois types de semi conducteur

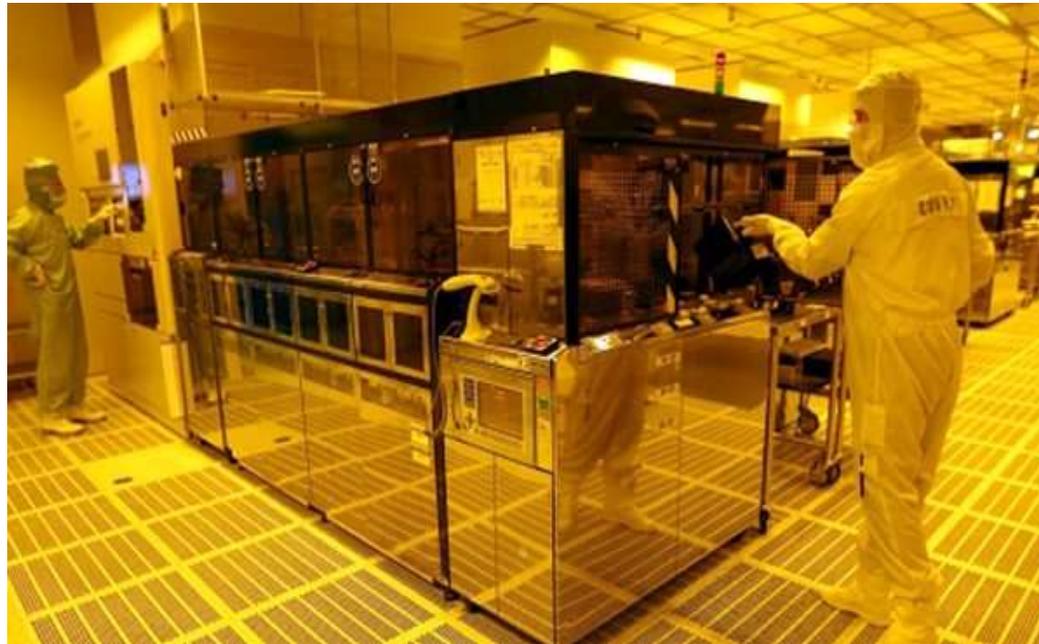
Semi conducteur compensé - Semi-Isolant

Semi conducteur de type **N**

Semi conducteur de type **P**

Semi conducteur compensé - Semi-Isolant

Il existe toujours dans un semi conducteur des impuretés incontrôlées que l'on appelle impuretés résiduelles



Pour compenser ces impuretés, on dope le semi conducteur de manière à se rapprocher le plus possible de la condition :

$$N_a = N_d$$

Niveau de Fermi

Supposons que cette condition soit réalisée : $N_a = N_d$

L'équation de neutralité électrique s'écrit alors : $n + N_a = p + N_d$

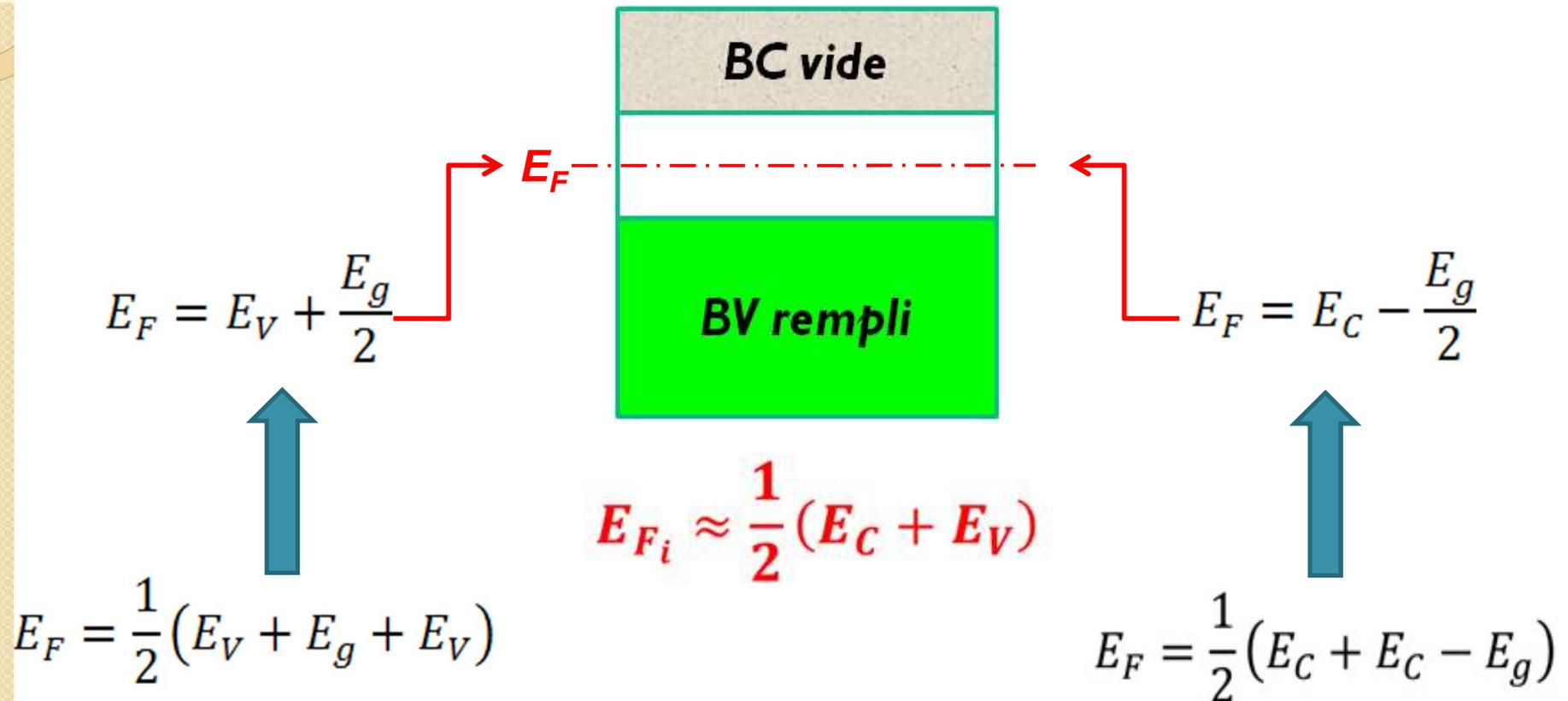
s'écrit alors : $n = p$  $n = p = n_i$

Le semi conducteur est alors considéré comme s'il était intrinsèque

La conductivité électrique est plus proche de l'isolant que du conducteur

On l'appelle alors semi-isolant

Le niveau de Fermi, est donc situé, comme pour un semi conducteur intrinsèque, au voisinage du milieu de la bande interdite



Dans la pratique on choisit l'origine des énergies de telle sorte que

$$E_V = 0 \text{ eV}$$