Chap I: Propriétés des semiconducteurs

I- les cristaux

on peut classer la matière en deux catégories:

- celle où l'état est désordonnée: gaz, liquide, solide amorphe; cet état est caractérisé par l'arrangement aléatoire des atomes.
- celle où l'état est ordonnée: l'état cristallin - où les atomes sont disposés d'une manière ordonnée.

Il existe différents types de cristaux:

a- les cristaux ioniques:

caractérisé par l'association d'atomes fortement électropositif (en général un seul atome périphérique) (Li, Na, K, Rb, Cs) avec des atomes fortement électronegatifs (en général 7 électrons périphérique exemple: F, Cl, Br, I / halogènes)

ces cristaux sont très durs étant donné les fortes énergies de liaison; il n'y a pas d'électrons libres:

ce sont des isolants

b- Les cristaux métaliques:

formés par des atomes électropositifs qui sont les métaux alcalins ou bien les métaux nobles: exemple: Al, Ag, Au, Cu.

les électrons périphériques sont libérés, les cristals sont ainsi formés d'un réseau d'ion positif et d'un gaz d'électrons libres: ce sont des conducteurs.

C- Cristaux covalents:

Ce sont ou bien les atomes de la colonne quatre (Ca, C, Si...) où chaque atome participe avec quatre électrons périphériques et accepte quatre électrons des atomes voisins pour former quatres liaisons covalentes, ou bien les atomes trois et cinq, deux et six exemple: AsGa, InP, CdS

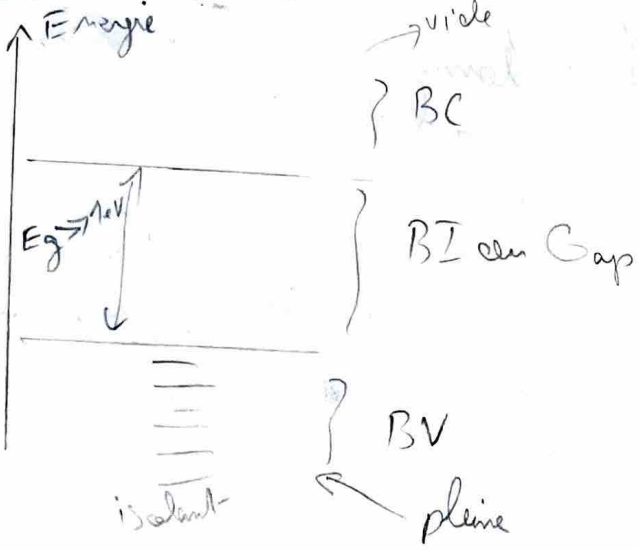
Ces cristaux (l'exception du carbon et d'étain) sont caractérisés par des énergies de liaisons beaucoup moins fortes que les cristaux ioniques

II - Les semi-conducteurs (SC) :

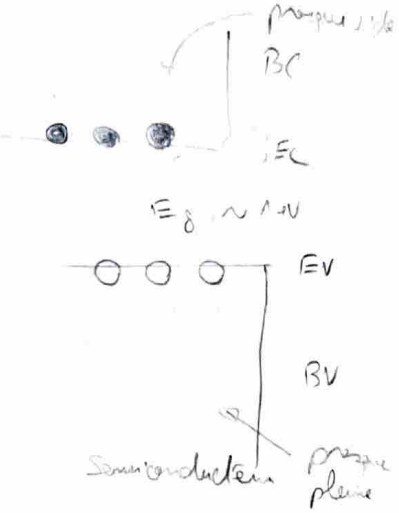
Les semi conducteurs que nous allons étudier, sont des matériaux qui se trouve sous forme de cristaux covalents et qui sont caractérisés par une valeur de résistivité intermédiaire entre celle des isolants ($10^8 \dots 10^{18}$) Ωcm et celle des conducteurs $[10^{-8} \dots 10^{-3}]$ Ωcm
Semi conducteurs $[10^{-3} \dots 10^{8}]$ Ωcm avec $\rho = \frac{1}{\sigma}$ - (ρ : résistivité, σ : conductivité)

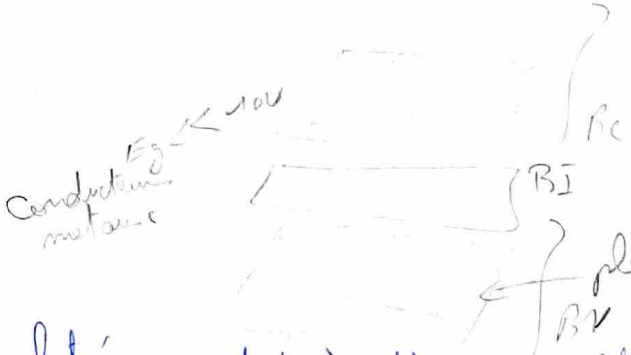
Dans les structures cristalines, les électrons périphériques peuvent avoir des énergies qui appartiennent à deux bandes :
- la bande de valence et la bande de conduction séparés par une bande interdite

bande d'énergie :



$E_g = E_c - E_v$





Rq :
la bande d'énergie est en réalité constitué d'un ensemble de niveaux discrets qui sont tellement proches que l'on peut considérer comme continues.

Rq : Conduction dans les semiconducteurs :
Lorsque la température est assez basse, les électrons sont bien liés aux atomes et la conduction n'est pas possible
Lorsque la température s'élève, les vibrations thermiques peuvent provoquer la rupture de liaisons covalentes et donc la libération (ou génération) d'électrons qui peuvent se déplacer et donner lieu à un courant

Lorsque l'électron quitte l'atome du réseau il laisse une lacune qui peut être vu comme une charge positive (égale en valeur absolue) à la charge de l'électron : on l'appelle trou
un autre électron libre peut combler cette lacune (on dit qu'il se recombine) ceci peut être vu comme un déplacement de trou. C'est pour cette raison que dans la représentation du diagramme de l'énergie d'un semi conducteur nous avons mis des trous dans la bande de valence et des électrons dans la bande de conduction

Rq : nous allons utiliser dans ce cours la masse effective de l'électron : m_n (au lieu de la masse propre) pour tenir compte de l'effet du réseau cristallin

$(m_e \vec{\gamma} = \vec{F}_{Rx} + \vec{F}_e) \Rightarrow m_n \vec{\gamma} = \vec{F}_e$

et on est de même pour les trous avec la masse effective notée m_p

III - Population des trous :

1 - Densité des états :

C'est le nombre d'état (ou niveau) d'énergie par unité de volume comprise entre E et E + dE

on montre que $D_n(E) = 4\pi \left(\frac{2m_n}{\hbar^2}\right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2}$ dans la BC

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

$D_n(E) = 0$ dans la BI

Ex : Quel est le nombre d'états dans la BC possible Comprises entre E_c et $E_c + kT$ (k constante de Boltzmann $= 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

$$N = \int_{E_c}^{E_c + kT} D_n(E)\, dE$$

III - 2- Semi-conducteur Intrinsèque - Fonction Fermi dirac :

à une température donnée, l'agitation thermique provoque l'excitation de certains électrons lesquelles passent de la bande de valence vers la bande de conduction, laissant autant de Trous dans la bande de valence
un semi conducteur intrinsèque est un semi conducteur sans impureté. dans la pratique ces impuretés existent mais ils sont en faible proportion
par exemple : pour le Si, on arrive à 10^{10} atomes d'impuretés / cm^3
AsGa on arrive à 10^7 atome d'impuretés / cm^3

Rappel : Dans 1 cm^3 de Sc on a $\sim 10^{22}$ atomes

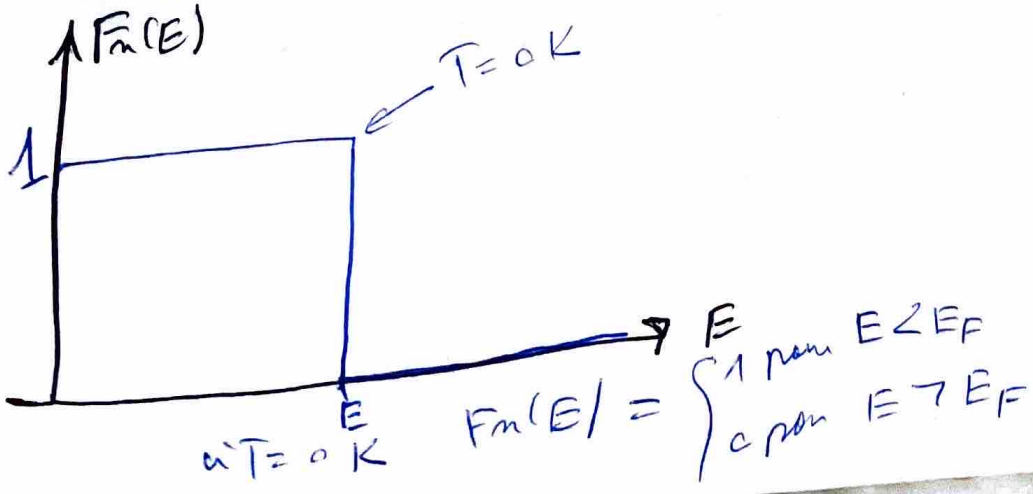
L'effet de ces impuretés est minime
Les états d'énergie disponibles pour l'électrons ne sont pas tous occupés, ils sont régis par une loi de probabilité :
La fonction de Fermi - Dirac :

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

E_F s'appelle le niveau de Fermi
c'est le niveau fictif dont la probabilité est égale à 1/2.

$$0 \leq F_n(E) \leq 1$$

k est la cte de Boltzman $= 1{,}381 \cdot 10^{-23}$ J/K
kT est exprimé plutôt en eV
1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J ;
à T = 300 K (température ambiante) on a $kT = 0{,}0259$ eV



Si $E - E_F = 3kT \Rightarrow F_n(E) = 0{,}05$

$E - E_F = 3kT \quad F_n(E) \simeq 1$

E_C

E_V

Si $E - E_F > 3kT$

$$\frac{1}{\cancel{1} + \exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)} \Rightarrow F_n(E) \simeq \exp -\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)$$

pour le trou :

$F_p(E) = 1 - F_n(E)$

III-3 - Concentrations de porteurs dans SC isentropique

a - Concentration des électrons dans la Bdc :

$E + dE$
E
E_c
E_F
E_V

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

$n = \int_E^{E+dE} D_n(E) F_n(E) dE$

Ex : Montrer que : $n = N_c \exp -\left(\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$ identifier alors N_c sachant que $\int_0^\infty x^{1/2} e^{-x} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$

Rappel : $D_n(E) = 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2}$

$$n = \int_{E_c}^{\infty} D_n(E) F_n(E) dE$$

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

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

$$\begin{cases} x = \frac{E - E_c}{kT} ; \quad dx = \frac{dE}{kT} \quad dE = dx\, kT \\ E = E_c \Rightarrow x = 0 \\ E = \infty \Rightarrow x = \infty \end{cases}$$

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

$$= 4\pi (kT)^{3/2} \left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right) \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

$$\Rightarrow n = N_c \exp\left[\frac{E_c - E_F}{kT}\right]$$

$$\Rightarrow N_c = \frac{2}{h^3} \left(2\pi m_n kT\right)^{3/2}$$

à titre indicatif :

	Si	AsGa
$N_c (cm^{-3})$	$2{,}8 \cdot 10^{19}$	$4{,}7 \cdot 10^{17}$

b) Concentration des trous :

on peut montrer de même que :

$$p = N_V \exp -\left(\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad \text{avec } N_V = \frac{2}{h^3}\left(2\pi m_p kT\right)^{3/2}$$

à titre indicatif :

	Si	AsGa
$N_V (cm^{-3})$	$1{,}04 \cdot 10^{19}$	$7{,}0 \cdot 10^{18}$

N_c s'appelle densité effective des états dans la BdC

N_V s'appelle densité effective des états dans la BdV

Rq importante :

Dans un semi conducteur intrinsèque on a $\boxed{n = p = n_i}$

n_i : concentration intrinsèque

Ex : Mq pour un S.C intrinsèque on a

$$E_F = \frac{E_c + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_V}{N_c}\right)$$

Semiconducteur intrinsèque

$n=p=n_i$; $n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$; $p = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right)$

Ex : montrer que $E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}$

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

$\Rightarrow \frac{N_v}{N_c} = \exp\left(\frac{2E_F - E_v - E_c}{kT}\right) \Rightarrow \ln \frac{N_v}{N_c} = \frac{2E_F - E_v - E_c}{2}$

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

A la température ambiante ; le second terme est très faible devant le premier $\Rightarrow$ le niveau de Fermi intrinsèque est presque au milieu de la BI

Loi d'action de masse :

$np = n_i^2$ (on a $n = n_i$ et $p = n_i \Rightarrow np = n_i^2$)

à l'équilibre thermique

Ex : Montrer que

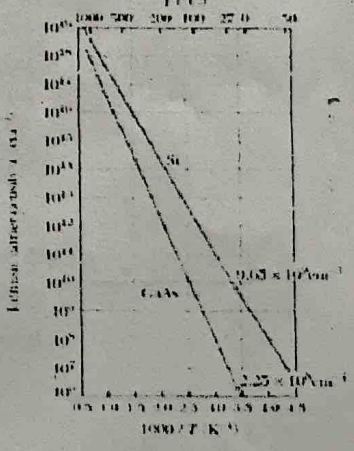
$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left[-\left(\frac{E_g}{2kT}\right)\right] \; ; \; E_g = E_c - E_v$$

Solution

on utilise $np = n_i^2 \Rightarrow N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) \times N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right) = n_i^2$

$\Rightarrow n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\left(\frac{E_g}{kT}\right)\right]$

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



Remarque

Lorsque $T \nearrow$ $E_g \searrow$ et $n_i \nearrow$

IV Semiconducteurs extrinsèques

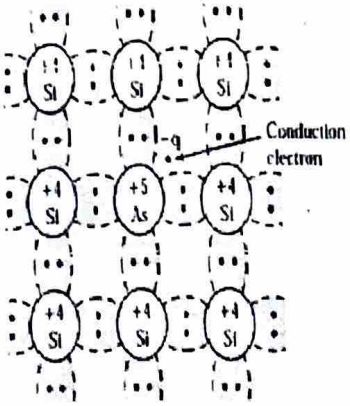
IV-1-Généralités

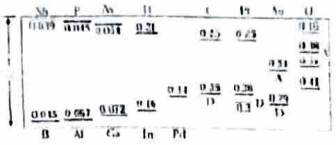
Lorsqu'on introduit des impuretés d'une manière volontaire, dans un semiconducteur après l'avoir purifié, on dit qu'**on le dope**. La proportion d'imputretés est de l'ordre de 10^{-8}-10^{-4}; le semiconducteur est alors dit **extrinsèque**. Ainsi, pour cristal semiconducteur Si par ex, dans un cm^3, on a, à peu près, 10^{22} atomes de semiconducteur, dont 10^{10} atomes sont les impuretés involontaires qui se trouvent là forcément et dont l'effet perturbateur est négligeable; et il y a 10^{16} (par exemple) d'impuretés introduites volontairement dans le processus de dopage.

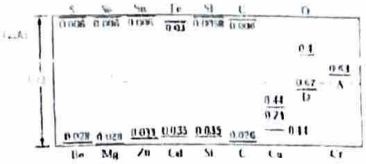
IV 2-Semiconducteur extrinsèque de type N:

Lorsque le semiconducteur appartient à la colonne IV du tableau périodique (Si par ex), et lorsque l'élément dopant appartient à la colonne V (P ou As par ex), alors un atome As remplace un atome Si dans le réseau cristallin;

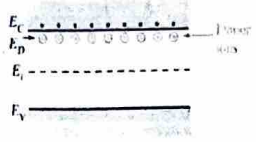
commeAs est pentavalent, (5 e périphériques), alors 4 électrons périphériques vont constituer des liaisons covalentes avec leur voisins directs Si et le cinquième électron se trouve ainsi faiblement lié à l'atome: une petite énergie (énergie d'ionisation) suffit à le libérer.





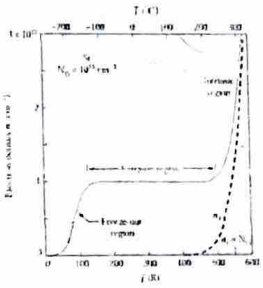


Donc on aura à peu près, autant d'électrons libres que d'atomes dopés.
On dit dans ce cas que As est un **atome donneur** et que **le semiconducteur est dopé N** ou **de type N.**
Les niveaux d'énergie des électrons des atomes donneurs forment une bande étroite qui se situe tout juste au dessous du niveau E_c. Si N_D est le nombre d'atomes donneurs alors cette bande comprend N_D niveaux d'énergie.



Cherchons l'expression de la concentration de porteurs libres; on a
La loi d'action de masse qui est aussi valable pour une semiconducteur extrinsèque à l'équilibre: $np=n_i^2$
La neutralité électrique impose : $n(-q)+p(+q)+N_D(+q)=0$
Exercice Voir le cahier

Montrer que $n = \frac{N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}{2}$



Remarque: Dans le cas pratique de fonctionnement des composants ($100K \leq T \leq 500K$), *on a toujours*

$$ND \gg ni \Longrightarrow \begin{cases} n_n \approx N_D \\ p_n \approx \frac{n_i^2}{N_D} \end{cases}$$

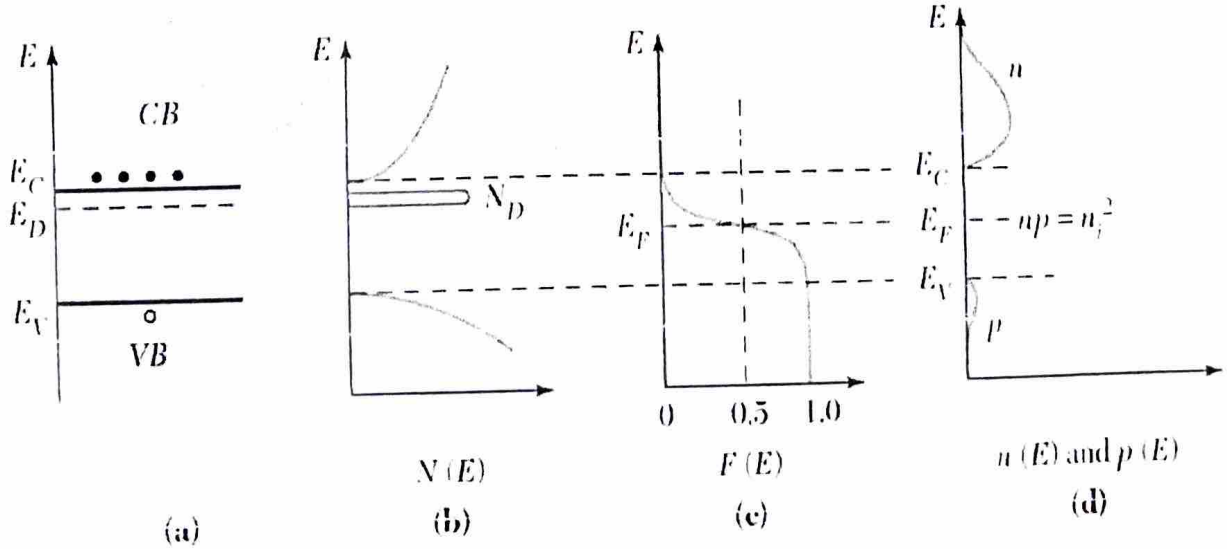
Pour le semiconducteur extrinsèque de type N on notera le niveau de Fermi E_{Fn} et celui intrinsèque E_{fi}.
On a dans ce cas:
$n_n \approx N_D$ *et donc* $N_D =$;

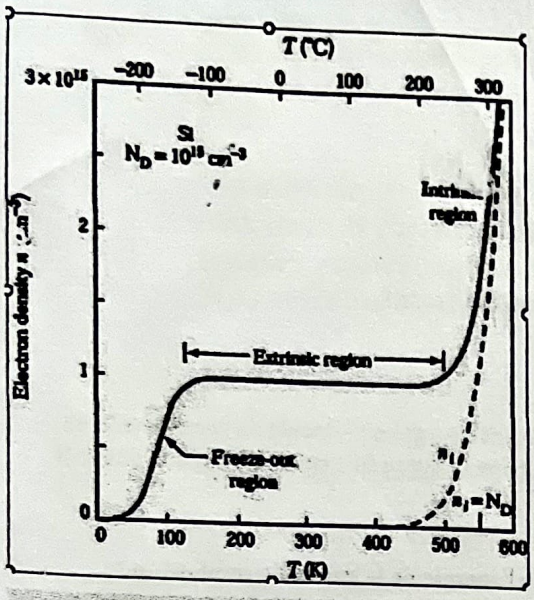
$$N_c \exp\left[\frac{E_C - E_{Fn}}{kT}\right] \Rightarrow \ln\frac{N_D}{N_c} = -\left(\frac{E_c - E_{Fn}}{kT}\right) \Rightarrow E_c - E_{Fn} = kT \ln\frac{N_c}{N_D}$$

Remarque:

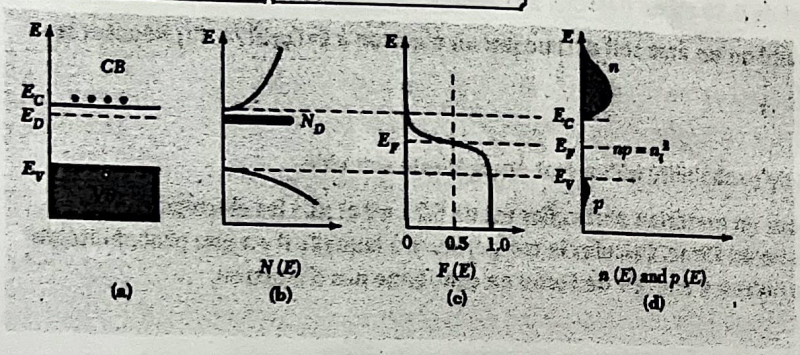
$$N_D \nearrow \Rightarrow \frac{N_c}{N_D} \searrow \rightarrow \ln\frac{N_c}{N_D}(\searrow) \Rightarrow E_c - E_{Fn}(\searrow)$$

Ex: un lingot de silicium est dopé à l'arsenic à hauteur de 10^{16} atomes/cm^3, trouver la concentration des porteurs et le niveau de Fermi à la température ambiante $N_D = 10^{16}\ cm^{-3}$
Sachant que $n_i = 1{,}45 \cdot 10^{10}\ cm^{-3}$





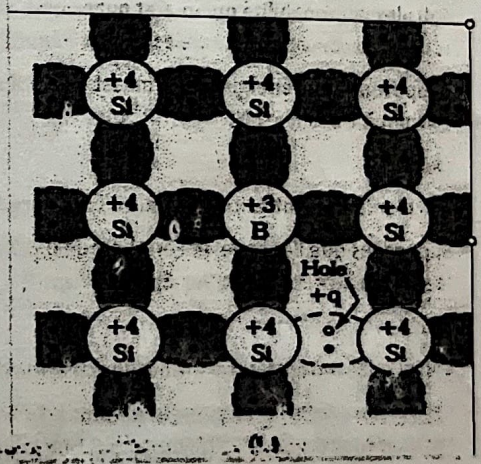
La figure ci-contre, montre la densité électronique en Si en fonction de la température pour une concentration en donneur de $N = 10^{15}\ cm^{-3}$. À basse température, l'énergie thermique dans le cristal n'est pas suffisante pour ioniser toutes les impuretés donneurs présentes. Certains électrons sont «congelés» au niveau du donneur et la densité électronique est inférieure à la concentration du donneur. Lorsque la température augmente, la condition d'ionisation complète est atteinte,(c'est-à-dire, $n_n = N_D$). Lorsque la température augmente encore, la concentration en électrons reste essentiellement la même sur une large plage de températures. C'est la région extrinsèque. Cependant, à mesure que la température augmente encore, nous atteignons un point où la concentration intrinsèque en porteurs devient comparable à la concentration en donneur. Au-delà de ce point, le semi-conducteur devient intrinsèque. La température à laquelle le semi-conducteur devient intrinsèque dépend des concentrations d'impuretés et de la valeur de la bande interdite et peut être obtenue à partir de la figure 18 en réglant la concentration en impuretés égale à n_i.



La figure ci-dessous illustre la procédure d'obtention des concentrations en porteurs pour un semi-conducteur de type n. Cette figure est similaire à celle représentée à la Fig vue précédemment pour un sc intrinsèque.. Cependant, le niveau de Fermi est plus proche du bas de la bande de conduction et la concentration en électrons (zone ombrée supérieure) est beaucoup plus grande que la concentration en trous (zone ombrée inférieure).

IV-3 Semiconducteur de type p:

Lorsqu'un sc de la colonne IV soit par ex Si se dope par une impureté de la colonne III, soit par exemple le B (Bore) qui est donc un atome trivalent. Le B prend la place d'un Si dans le cristal et se trouve au voisinage direct de 4 Si. Il va participer avec ses trois électrons périphériques dans trois liaisons covalentes et il se trouve dans une situation où il accepte facilement un électron libre qui va compléter son édifice électronique tout en laissant un trou dans l'atome voisin qui a libéré l'électron.



Le semi-conducteur dopé p est le semi-conducteur de type p, dopé p.

De la même manière que dans le paragraphe précédent, le même acceptera une [illegible] de la bande [illegible]

Trouver l'expression de la concentration des trous p_p dans ce cas ci

Solution:

On va avoir de deux équations:—> la loi d'action de masse $n_p \cdot p_p = n_i^2$ (o)

----> l'équation exprimant la neutralité électrique: $n_p + N_A^- = p_p$ (oo)

A partir de l'équation (o) on déduit que $n = \frac{n_i^2}{p}$. Qu'on remplace dans l'éq (oo) ce qui donne:

$p_p^2 - p_p N_A - n_i^2 = 0$ Équation du second degré en p_p

Le discriminant $\Delta = N_A^2 + 4n_i^2$

Et la solution $p_p = \frac{N_A + \sqrt{N_A + 4n_i^2}}{2}$

TD : SC1

Et la solution p=

Comme pour le cas de sc de type n, on a aussi le fait que le cas d'utilisation pratique des sc on a: NA>>ni
Ce qui permet d'écrire que $p_p \approx N_A$ et $n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$

Cherchons, maintenant la position du niveau de Fermi noté E_{Fp}.
Ex: Montrer que: $E_{Fp} - E_V = kT \cdot \ln(N_V / N_A)$

$p_p = N_V \exp\left(-\frac{E_{Fp} - E_V}{kT}\right)$

$N_A = N_V \exp\left(-\frac{E_{Fp} - E_V}{kT}\right)$

$\ln\left(\frac{N_A}{N_V}\right) = -\left(\frac{E_{Fp} - E_V}{kT}\right) \Rightarrow E_{Fp} - E_V = kT \cdot \ln(N_V / N_A)$

On peut voir que plus le sc est dopé p (N_A) plus le niveau de Fermi se rapproche de E_V.

Remarque:
-L'As et le B sont les plus utilisés pour le dopage du Si.
-Pour l'AsGa, les éléments de la colonne VI (ex : Te) dopent N en se substituant à As et les éléments de la colonne II (ex: Zn) dopent P en se substituant à Ga. Mais il y a aussi les éléments de la colonne IV qui se substituent à Ga pour doper N et à As pour doper P.

Ex1

Supposons que le niveau d'énergie de Fermi est de 0,30 eV en dessous de l'énergie de la bande de conduction Ec.

Supposons T= 300 K. (a) Déterminez la probabilité qu'un état soit occupé par un électron à E=Ec+kT/4. (b) Répétez la partie (a) pour un état énergétique à E= Ec +kT.

Ex2

Déterminez la température à laquelle il y a 1% de probabilité qu'un état énergétique soit vide.

Supposons que le niveau d'énergie de Fermi pour un matériau particulier est de 6,25 eV et que les électrons de ce matériau suivent la fonction de distribution de Fermi-Dirac. Calculez la température à laquelle il y a une probabilité de 1 pour cent qu'un état à 0,30 eV en dessous du niveau d'énergie de Fermi ne contienne pas d'électron.

Ex3

Calculez la probabilité qu'un état quantique dans la bande de conduction à E =Ec+ kT/ 2 soit occupé par un électron et calculez la concentration d'électrons à l'équilibre thermique dans le silicium à T 300 K.

Supposons que l'énergie de Fermi est de 0,25 eV en dessous de la bande de conduction. La valeur de Nc pour le silicium à T 300 K est Nc =2,8 10^{19} cm^{-3}

Ex4

Calculer la concentration de trous d'équilibre thermique dans le silicium à T= 400 K.

Supposons que l'énergie de Fermi est de 0,27 eV au-dessus de l'énergie de la bande de valence. La valeur de Nv pour le silicium à T= 300 K est Nv =1,04 10^{19} cm^{-3} $\Rightarrow 6,43 \cdot 10^{15}\ cm^{-3}$

Ex5

Calculer la concentration intrinsèque des porteurs dans le silicium à T= 250 K et à T =400 K.

Les valeurs de Nc et Nv pour le silicium à T= 300 K sont respectivement de 2,8 10^{19} cm^{-3} et 1,04.$10^{19}$$cm^{-3}$. Nc et Nv varient tous deux en $T^{3/2}$. Supposons que l'énergie de la bande interdite du silicium soit de 1,12 eV et qu'elle ne varie pas sur cette plage de température. $\Rightarrow 7,00 \cdot 10^{9}\ cm^{-3}$

Ex6

Si la position du niveau de Fermi se situe à 0,25 eV au-dessus de la bande de valence à T= 300 K, déterminez la position du niveau de Fermi à T= 400 K.

Les masses effectives de porteurs dans le silicium à T= 300 K sont $m_n = 1,08\, m_0$ et $m_p = 0,56 m_0$

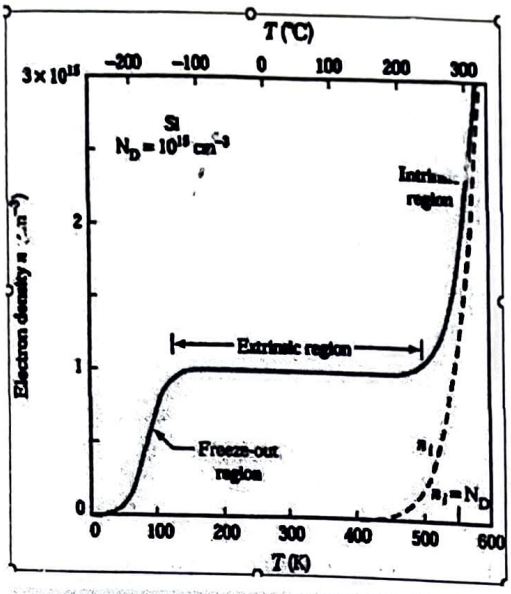
Ex7

Calculez les concentrations d'équilibre thermique des électrons et des trous pour une énergie de Fermi donnée.

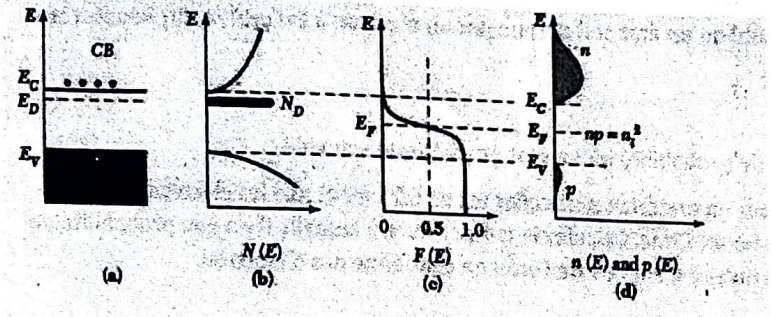
Considérons le silicium à T= 300 K de sorte que Nc= 2,8 10^{19} cm^{-3} et Nv= 1,04 10^{19} cm^{-3}.

Supposons que l'énergie de Fermi est de 0,25 eV en dessous de la bande de conduction. Si nous supposons que l'énergie de la bande interdite du silicium est de 1,12 eV, alors l'énergie de Fermi sera de 0,87 eV au-dessus de la bande de valence.

$1\ eV = 1,6 \cdot 10^{-19}\ J$



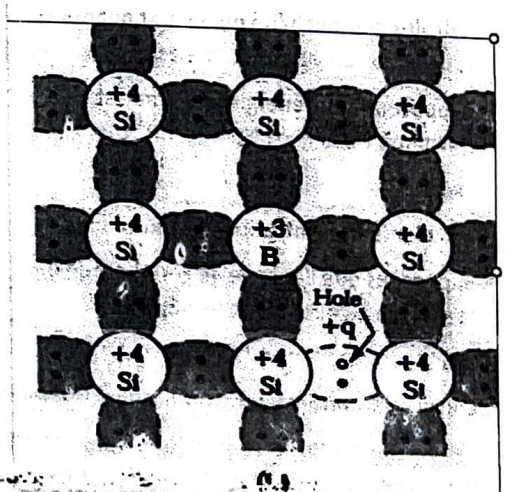
La figure ci-contre, montre la densité électronique en Si en fonction de la température pour une concentration en donneur de $N = 10^{15}$ cm^{-3}. À basse température, l'énergie thermique dans le cristal n'est pas suffisante pour ioniser toutes les impuretés donneurs présentes. Certains électrons sont «congelés» au niveau du donneur et la densité électronique est inférieure à la concentration du donneur. Lorsque la température augmente, la condition d'ionisation complète est atteinte,(c'est-à-dire, $n_n = N_D$). Lorsque la température augmente encore, la concentration en électrons reste essentiellement la même sur une large plage de températures. C'est la région extrinsèque. Cependant, à mesure que la température augmente encore, nous atteignons un point où la concentration intrinsèque en porteurs devient comparable à la concentration en donneur. Au-delà de ce point, le semi-conducteur devient intrinsèque. La température à laquelle le semi-conducteur devient intrinsèque dépend des concentrations d'impuretés et de la valeur de la bande interdite et peut être obtenue à partir de la figure 18 en réglant la concentration en impuretés égale à n_i.



La figure ci-dessous illustre la procédure d'obtention des concentrations en porteurs pour un semi-conducteur de type n. Cette figure est similaire à celle représentée à la Fig vue précédemment pour un sc intrinsèque.. Cependant, le niveau de Fermi est plus proche du bas de la bande de conduction et la concentration en électrons (zone ombrée supérieure) est beaucoup plus grande que la concentration en trous (zone ombrée inférieure).

IV-3 Semiconducteur de type p:

Lorsqu'un sc de la colonne IV soit par ex Si se dope par une impureté de la colonne III, soit par exemple le B (Bore) qui est donc un atome trivalent. Le B prend la place d'un Si dans le cristal et se trouve au voisinage direct de 4 Si. Il va participer avec ses trois électrons périphériques dans trois liaisons covalentes et il se trouve dans une situation où il accepte facilement un électron libre qui va compléter son édifice électronique tout en laissant un trou dans l'atome voisin qui a libéré l'électron.



Le sure électrons ... le matériau ... le ... de type p, dopé p.
... le phénomène ... dans le paragraphe précédent, ... accepte ... un électron libre ... de la bande ...

Trouver l'expression de la concentration des trous p_p dans ce cas ...

solution:

On va avoir de deux équations:--> la loi d'action de masse $n_p p_p = n_i^2$ (o)

----> l'équation exprimant la neutralité électrique: $n_p + N_A^- = p_p$ (oo)

A partir de l'équation (o) on déduit que $n = \frac{n_i^2}{p}$. Qu'on remplace dans l'éq (oo) ce qui donne:

$p^2 - p N_A - n_i^2 = 0$. Équation du second degré en p.

Le discriminant $\Delta = N_A^2 + 4n_i^2$

Et la solution $p = \frac{N_A + \sqrt{N_A + 4n_i^2}}{2}$

Ex1

Supposons que le niveau d'énergie de Fermi est de 0,30 eV en dessous de l'énergie de la bande de conduction Ec et que T= 300 K. (a) Déterminez la probabilité qu'un état soit occupé par un électron à E=Ec+kT/4. (b) Répétez la partie (a) pour un état énergétique à E= Ec +kT.

Ex2

Supposons que le niveau d'énergie de Fermi pour un matériau particulier est de 6,25 eV et que les électrons de ce matériau suivent la fonction de distribution de Fermi-Dirac. Calculez la température à laquelle il y a une probabilité de 1 pour cent qu'un état à 0,30 eV en dessous du niveau d'énergie de Fermi ne contienne pas d'électron.

Ex3

Sachant que l'énergie de Fermi est de 0,25 eV en dessous de la bande de conduction, calculez la concentration d'électrons à l'équilibre thermique dans le silicium à T=300 K.

On donne La valeur de Nc pour le silicium à T=300 K est Nc =2,8 10^{19} cm^{-3}

Ex4

Sachant que l'énergie de Fermi est de 0,27 eV au-dessus de l'énergie de la bande de valence, calculer la concentration de trous d'équilibre thermique dans le silicium à T= 400 K.

On donne pour le silicium à T= 300 K , Nv =1,04 10^{19} cm^{-3}

Ex5

Sachant que l'énergie de la bande interdite du silicium soit de 1,12 eV et en supposant qu'elle ne varie pas sur cette plage de température, calculer la concentration intrinsèque des porteurs dans le silicium à T= 250 K et à T =400 K.

Les valeurs de Nc et Nv pour le silicium à T= 300 K sont respectivt de 2,8 10^{19} cm^{-3} et 1,04.$10^{19}$$cm^{-3}$.

Ex6

Sachant que les masses effectives de porteurs dans le silicium est m_n= 1,08m_0 et m_p=0,56m_0, calculer la position du niveau de Fermi intrinsèque par rapport au centre de la bande interdite dans le silicium à T= 300 K.

Ex7

Sachant que l'énergie de Fermi est de 0,25 eV en dessous de la bande de conduction et que l'énergie de la bande interdite du silicium est de 1,12 eV.

Calculez les concentrations d'équilibre thermique des électrons et des trous.

On donne pour le silicium à T= 300 K de sorte que Nc= 2,8 10^{19} cm^{-3} et Nv= 1,04 10^{19} cm^{-3}.

$\log = \log_{10}$

$\log = \ln$

Table 3.1 | Typical mobility values at $T = 300$ K and low doping concentrations

	μ_n (cm²/V-s)	μ_p (cm²/V-s)
Silicon	1350	480
Gallium arsenide	8500	400
Germanium	3900	1900

Ex8

Considérons un échantillon d'arséniure de gallium à T =300 K avec la concentration en dopants de $N_D=10^{16}$ cm $^{-3}$. Supposons une ionisation complète et supposons les mobilités des électrons et des trous sont données dans le tableau ci dessus. Calculez la densité de courant de dérive si le champ électrique appliqué est E=10V/cm.

Ex9

Une densité de courant de dérive de J_c =75 A / cm^2 est requise dans un appareil utilisant du silicium de type p lorsqu'un champ électrique de E= 120 V / cm est appliqué. Déterminez la concentration de dopage d'impureté requise pour atteindre cette spécification. On supposera que les mobilités des électrons et des trous indiquées dans le tableau ci dessus s'appliquent

Ex10

Sachant que, dans un semi-conducteur en arséniure de gallium de type n à T=300 K, la concentration en électrons varie linéairement de 1.10^{18} à 7.10^{17} cm^{-3} sur une distance de 0,10 cm. Calculer la densité du courant de diffusion si le coefficient de diffusion électronique est Dn= 225 cm^2 / s.

EX11

La densité des trous dans le silicium est donnée par $p(x) = 10^{16} e^{-(x/Lp)}$ ($x \geq 0$) où Lp =2.10^{-4}cm. Sachant que le coefficient de diffusion des trous soit Dp= 8 cm^2/s. Déterminez la densité du courant de diffusion des trous à (a) x= 0, (b) x= 2.10^4 cm et (c) x=10^3 cm.

Densité des états d'énergie:

$$\begin{cases} D(E) = 0 & \text{dans la B.I} \\ D_n(E) = 4\pi\left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}(E - E_C)^{\frac{1}{2}} & \text{dans la BdC} \\ D_p(E) = 4\pi\left(\frac{2m_p}{h^2}\right)^{3/2}(E_V - E)^{1/2} & \text{dans la BdV} \end{cases}$$

Extrait du tableau périodique :

Période	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
						He
2	B	C	N	O	F	Ne
3	Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7						

Constantes

Masse de l'électron libre : $m_0 = 9{,}11.10^{-31}$kg ;
Constante de Planck : $h = 6{,}625.10^{-34}$J.s
Constante de Boltzman : $k = 1{,}38.10^{-23}$ J/K
$kT = 0{,}0259$ eV à 300K
Charge de l'électron : $q = 1{,}6.10^{-19}$C.
Permittivité du vide : $\varepsilon_0 = 8{,}854.10^{-12}$ F/m

Fonction de distribution de Fermi-Dirac:

$$F_n(E) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right]} \; ; \; \int_0^\infty x^{1/2} e^{-x} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

Semiconducteur intrinsèque :

$$n = N_C \, exp - \frac{(E_C - E_F)}{kT}$$

$$N_C = \frac{2}{h^3}(2\pi m_n kT)^{3/2}$$

$$p = N_V \, exp - \frac{(E_F - E_V)}{kT}$$

Loi d'action de masse: $np = n_i^2$
$n = p = n_i$

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2}\text{Log}\left(\frac{N_V}{N_C}\right) ;$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V}\exp - \frac{E_g}{2kT}$$

Semiconducteur extrinsèque :

Cas usuel !

Type N : $n_n \approx N_D$; $p_n \approx {n_i^2}/{N_D}$

Type P : $p_p \approx N_A$; $n_p \approx {n_i^2}/{N_A}$

Conduction dans les semiconducteurs :

$$\langle E_{cn} \rangle = \frac{3}{2}kT \; ; \; l_n = \tau_n v^*_{thn} \; ; \; l_p = \tau_p v^*_{thp}$$

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

$$\vec{v}_{dp} = \mu_p \vec{E} \; ; \; \mu_p = \frac{q\tau_p}{m_p} \; ;$$

Loi d'Ohm microscopique :

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

Courant de diffusion pour les électrons:

$$\vec{J}_n(x) = qD_n \, \vec{\text{grad}}(n)$$

Loi d'Einstein : $\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}$

Cas général pour les trous :

$$\vec{J}_p(x) = \mu_p\left(qp\vec{E} - kT\,\text{grad}(p)\right)$$

Génération- recombinaison des porteurs :

Régime de faible injection
$\Rightarrow \Delta n = \Delta p << N_D$ pour un sc de type N
pour un sc de type N (cas de recombinaison directe),

on a : $\frac{dp_n}{dt} = G - R = G_L + G_{th} - R = G_L - U; U = R - G_{th}$

U : taux net de recombinaison

En régime stationnaire et de faible injection :

$$G_L = U = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$$

Equation de continuité :

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \mu_n \frac{\partial n_p}{\partial x}E + \mu_n n_p \frac{\partial E}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}$$

JONCTION PN

Equation de Poisson:

$$E = -\frac{d\psi}{dx}; \; div\,\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

$p = n_i \, exp[(E_i - E_F)/kT]$; $n = n_i \, exp[(E_F - E_i)/kT]$;

$\frac{dE_F}{dx} = 0$; $V_b = \frac{kT}{q} Ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$;

Hypothèses : Dans la RCE on a : n« et p« ; Dans les régions neutres, on a E=0 ;

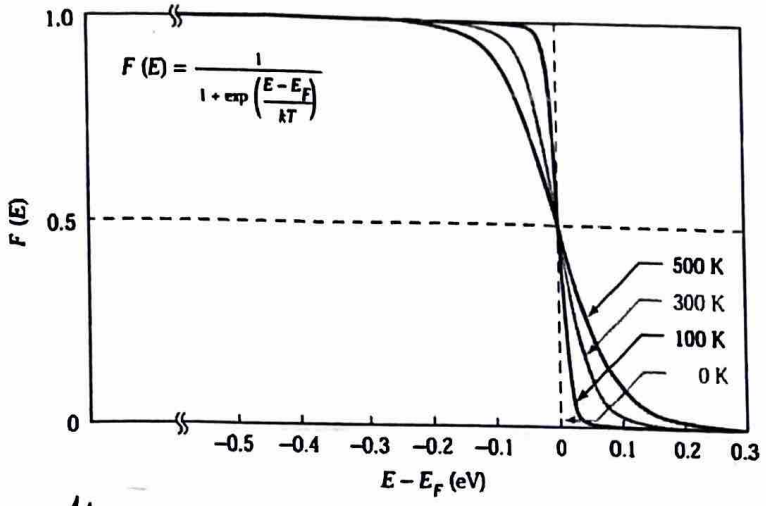


Fig. Fonction de distribution de Fermi F(E) en fonction de (E - E_F) pour différentes températures.

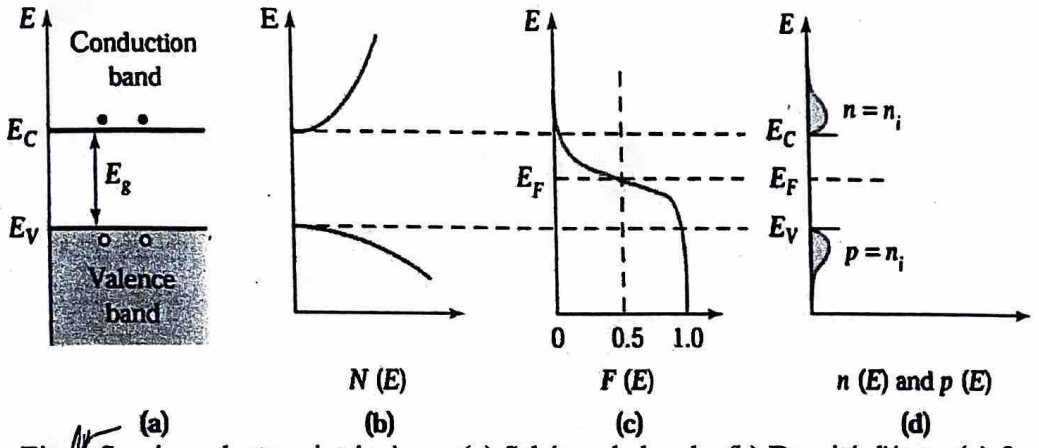


Fig. Semi-conducteur intrinsèque. (a) Schéma de bande. (b) Densité d'états. (c) fonction de distribution de Fermi. d) Concentration de la porteuse.

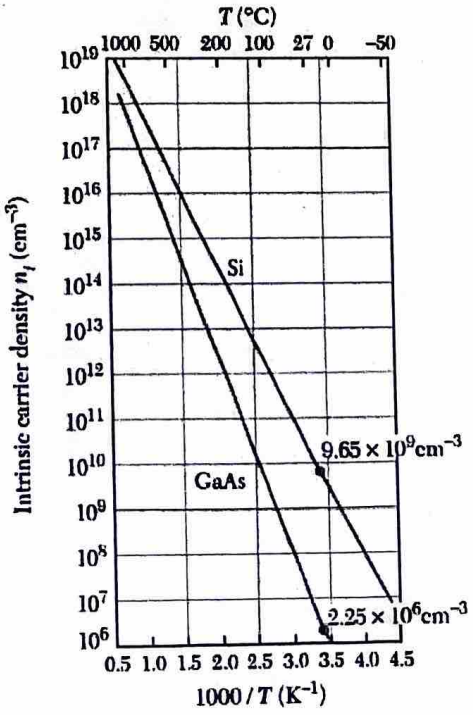


Fig. Densité de porteurs intrinsèques en Si et AsGa en fonction de l'inverse de la température.

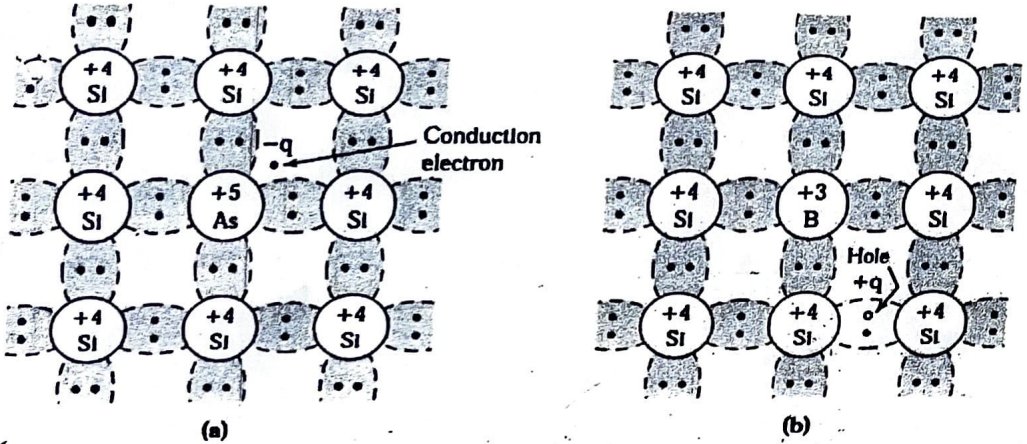
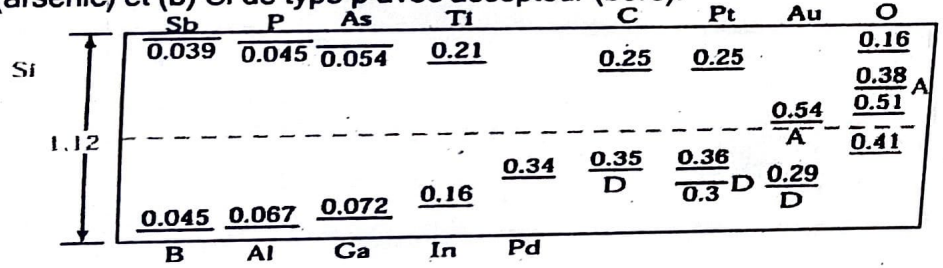


Fig. 17 Images de liaison schématiques pour (a) Si de type n avec donneur (arsenic) et (b) Si de type p avec accepteur (bore).



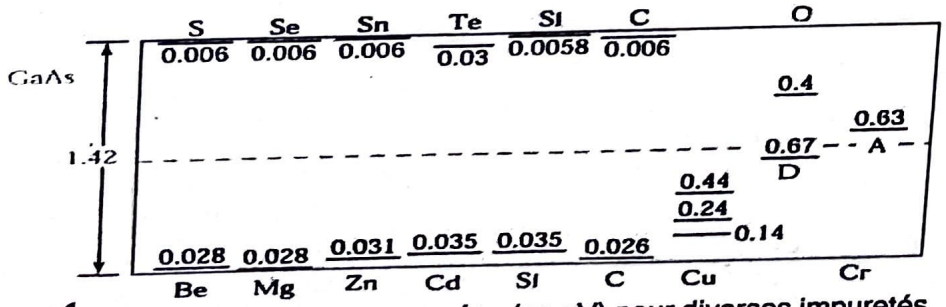


Fig. 18 Énergies d'ionisation mesurées (en eV) pour diverses impuretés

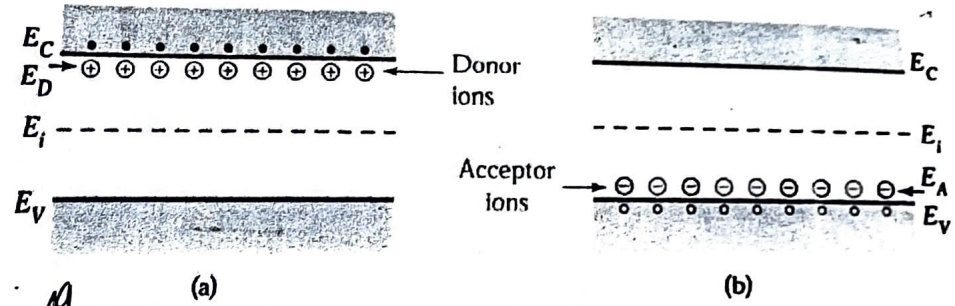


Fig. 19 Représentation schématique en bandes d'énergie de semi-conducteurs extrinsèques avec (a) des ions donneurs et (b) des ions accepteurs.

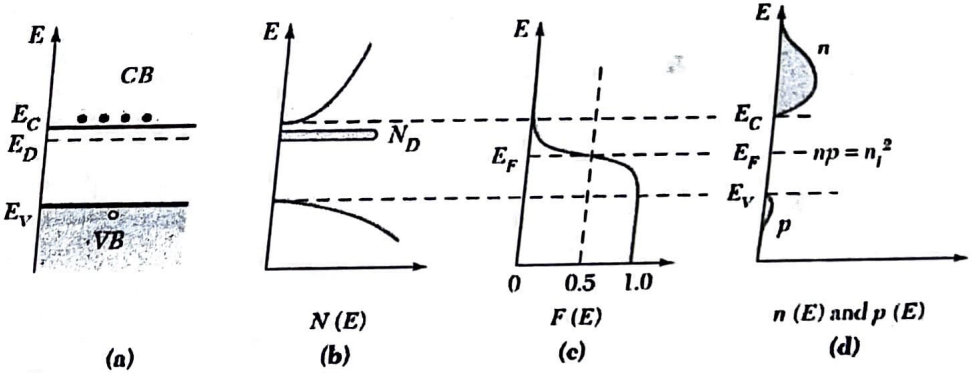
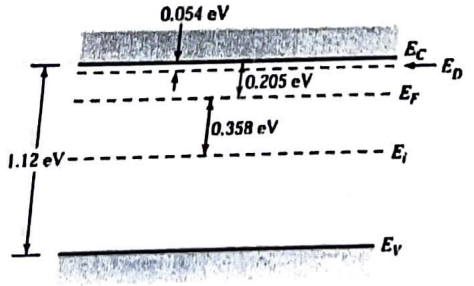


Fig. 20 Semi-conducteur de type n. (a) Schéma de bande. (b) Densité d'états. (c) fonction de distribution de Fermi. d) Concentration de la porteuse



21

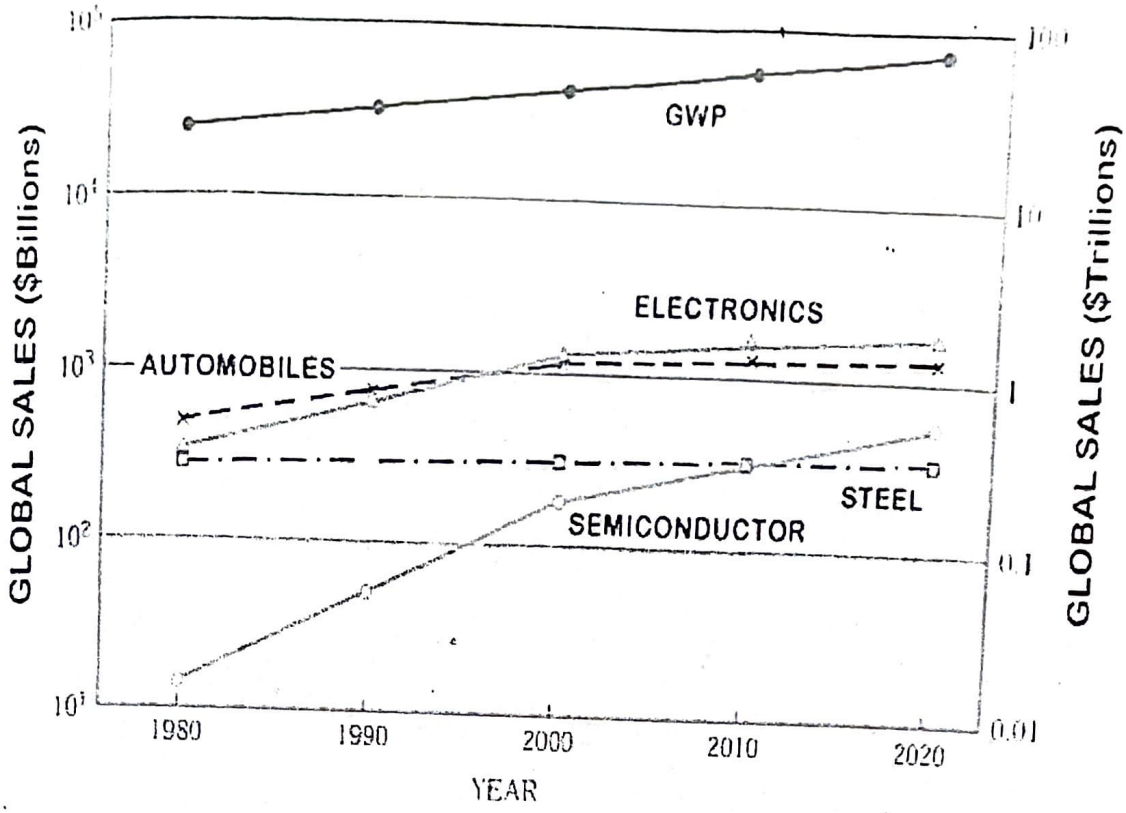


Fig. 1 Produit mondial brut (PRP) et volumes des ventes des industries de l'électronique, de l'automobile, des semi-conducteurs et de l'acier de 1980 à 2010 et prévus jusqu'en 2020.

TABLE1 Major Semiconductor Devices

Year	Semiconductor Device[a]	Author(s)/Inventor(s)
1874	Metal-semiconductor contact[b]	Braun
1907	Light emitting diode[b]	Round
1947	Bipolar transistor	Bardeen, Brattain, and Shockley
1949	*p-n* junction[b]	Shockley
1952	Thyristor	Ebers
1954	Solar cell[b]	Chapin, Fuller, and Pearson
1957	Heterojunction bipolar transistor	Kroemer
1958	Tunnel diode[b]	Esaki
1960	MOSFET	Kahng and Atalla
1962	Laser[b]	Hall et al.
1963	Heterostructure laser[b]	Kroemer, Alferov and Kazarinov
1963	Transferred-electron diode[b]	Gunn
1965	IMPATT diode[b]	Johnston, DeLoach, and Cohen
1966	MESFET	Mead
1967	Nonvolatile semiconductor memory	Kahng and Sze
1970	Charge-coupled device	Boyle and Smith
1974	Resonant tunneling diode[b]	Chang, Esaki, and Tsu
1980	MODFET	Mimura et al.
2004	5 nm MOSFET	Yang et al.

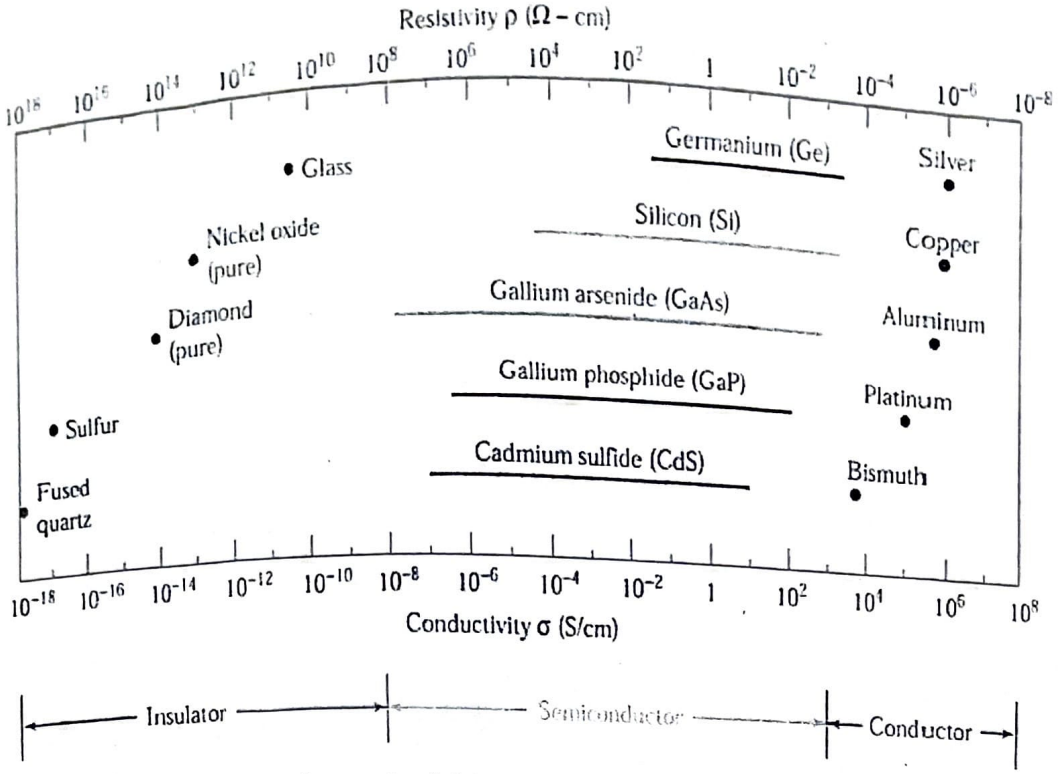


Fig. 9 Gamme typique de conductivités pour les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs.

TABLE 2 Semiconductor Materials[2]

General Classification	Semiconductor	
	Symbol	Name
Element	Si	Silicon
	Ge	Germanium
Binary compound		
IV-IV	SiC	Silicon carbide
III-V	AlP	Aluminum phosphide
	AlAs	Aluminum arsenide
	AlSb	Aluminum antimonide
	GaN	Gallium nitride
	GaP	Gallium phosphide
	GaAs	Gallium arsenide
	GaSb	Gallium antimonide
	InP	Indium phosphide
	InAs	Indium arsenide
	InSb	Indium antimonide
II-VI	ZnO	Zinc oxide
	ZnS	Zinc sulfide
	ZnSe	Zinc selenide
	ZnTe	Zinc telluride
	CdS	Cadmium sulfide
	CdSe	Cadmium selenide
	CdTe	Cadmium telluride
	HgS	Mercury sulfide
IV-VI	PbS	Lead sulfide
	PbSe	Lead selenide
	PbTe	Lead telluride
Ternary compound	$Al_xGa_{1-x}As$	Aluminum gallium arsenide
	$Al_xIn_{1-x}As$	Aluminum indium arsenide
	$GaAs_{1-x}P_x$	Gallium arsenic phosphide
	$Ga_xIn_{1-x}N$	Gallium indium nitride
	$Ga_xIn_{1-x}As$	Gallium indium arsenide
	$Ga_xIn_{1-x}P$	Gallium indium phosphide
Quaternary compound	$Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$	Aluminum gallium arsenic antimonide
	$Ga_xIn_{1-x}As_{1-y}P_y$	Gallium indium arsenic phosphide