Chapitre I : Propriété Des Semi-conducteurs :

I- Les Cristaux :

On peut classer la matière en 2 catégories :

- celle où l'état est désordonné : (gaz), (liquide), (solide amorphe).

Cette état est caractérisé par l'arrangement aléatoire des atomes.

- celle où l'état est ordonné : l'état cristallin : où les atomes sont disposés de manière ordonnée.

Il existe différents types des cristaux :

a- les cristaux (ioniques) : Caractérisé par l'association d'atomes

fortement électropositive (en général 1 seul atome périphérique)

Exp : (Li, Na, K, Rb, Cs (les alcalins))

avec des atomes fortement électronégative (en général (07 électrons périphériques))

Exp : F, Cl, Br, I (les halogènes)

Exp : LiF, NaCl, KBr

ces cristaux sont très dans état donné la grande très forte énergie de liaison, n'ya pas d'électrons libre ce sont des isolants

b- les cristaux (métalliques) : formés par des atomes électropositives

sont les métaux alcalins ou bien les métaux nobles (Ag, Al, Au, Cu)

(Na, K)

Les électrons périphériques sont liberés, les cristaux et ainsi formés d'un réseau d'ions positifs et d'un gaz d'électrons libres : ce sont des conducteurs

c : les cristaux covalents : ce sont, en fait, les atomes de la colonne IV (Ex : C, Si, Ge, Sn) où chaque atome participe avec 4 électrons périphériques et accepte 4 électrons des atomes voisins pour former 4 liaisons covalentes

b : les atomes des colonnes 3,5 / ou 2 et 6 (Ex : AsGa, InP, CdS)

Les cristaux (excepté le carbone et l'étain Sn) sont caractérisés par des énergies de liaisons beaucoup moins fortes que pour les cristaux ioniques

II - Les semi conducteurs : (Sc)

Les semi conducteurs sont allotropiques sont dermatériaux qui existent sous forme de cristaux covalents et qui sont caractérisé par une valeur de résistivité intermédiaire entre celle des isolants

$[10^8 - 10^{18}]\ \Omega.cm$ et celle des conducteurs $[10^{-8} - 10^{-3}]\ \Omega.cm$

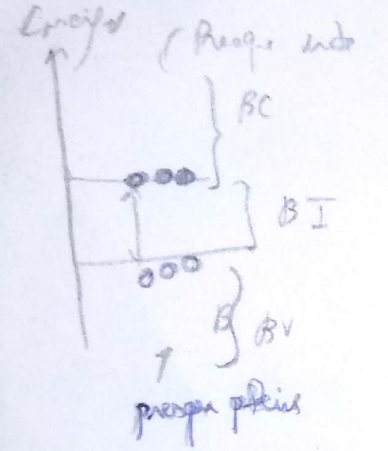
$[10^{-3}, 10^8]\ \Omega.cm$ $\quad \rho = \frac{1}{\sigma}$

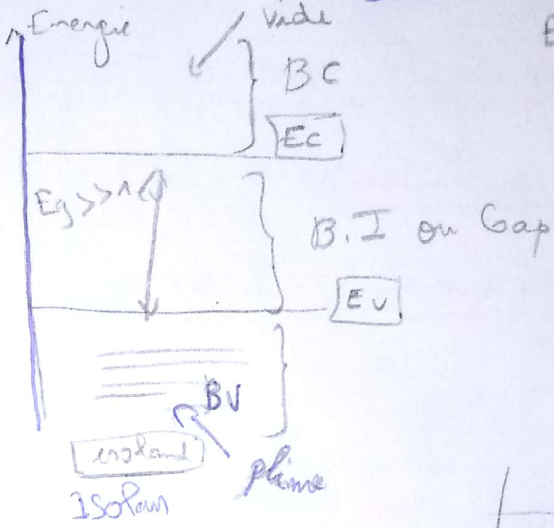
é d'energie:

dans la structure cristalline, les électrons périphériques peuvent avoir des énergies qui appartiennent à deux bandes:

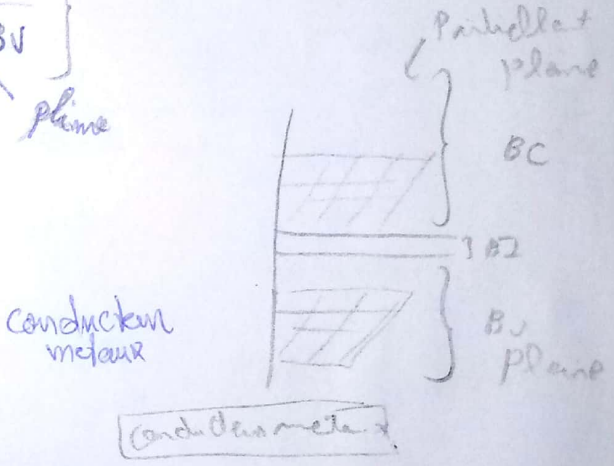
- la bande de valence et la bande de conduction séparés par une bande interdite

B.V B.C B.I





$E_g = E_c - E_v$



Remarque:

La bande d'énergie interdite est constitué d'un ensemble de niveaux discrets qui sont tellement proche que l'on peut considérer comme continue

Lorsque la Température est assez basse (proche de 0°) les électrons ne bougent pas dans les atomes et la conduction n'est pas possible.

Lorsque la Température s'élève, la substitution Thermique peut provoquer la Cassure des liaisons covalentes et donc la libération d'électrons qui peuvent se déplacer et donc donner lieu à un courant

(Semi-conducteur proche de 0°)

Scanné avec CamScanner

Conduction dans le cristal SC

Lorsque l'électron l'donne du réseau, il laisse une vacance qui peut être

sera bonne une charge positive = /à la charge électrique/.

④

un autre électron libre peut combler cette lacune (On dit qu'il se

recombine). Ceci peut être vu comme un déplacement de trou. Après cette

remarque que dans la représentation du diagramme d'énergie d'un Semi-conducteur

nous avons mis des trous dans la BV et les électrons dans la BC

Remarque :

nous allons utiliser dans le cours la masse effective de l'électron (m_n)

(au lieu de la masse propre (m_e)) pour tenir en compte de l'effet du réseau

sur celui (trou (hole)) $m_e \cdot \vec{\gamma} = \vec{F}_{ext} + \vec{Fe} = m_n \cdot \vec{\gamma} = \vec{Fe}$

Il en est de même pour les trous avec la masse effective (m_p)

III - Population des Porteurs :

1 - Densité des états :

La densité des états c'est le nbre d'états (niveaux) d'énergies par

unité de volume compris entre E et $E + dE$.

On montre que $D_n(E) = 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2}$ dans la BC (Pour l'électron)

h : cste de Planck

$6{,}625 \cdot 10^{-34}$ J.s

$P_p(E) = 4\pi \left(\frac{2m_p}{h^2}\right)^{3/2} (E_v - E)^{1/2}$ dans la BV (Pour les trous)

$D(E) = 0$ dans BI

Scanné avec CamScanner

Exercice :

Quelle est le nbre d'etats dans la BC possibles compris entre E_c et $E_c + kT$

(k : cste de Boltzman = $1,38.10^{-23}$ J/K)

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

Scanné avec CamScanner

états d'énergie disponible pour l'électron ne sont pas tous occupés ils sont régit par une loi de probabilité : la fonction de Fermi-Dirac

la fonction de Fermi-Dirac : $F_n(E) = \dfrac{1}{1+\exp\left(\dfrac{E-E_F}{kT}\right)}$

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

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

k est la constante de Boltzmann $k = 1,381.10^{-23}\ J/K$

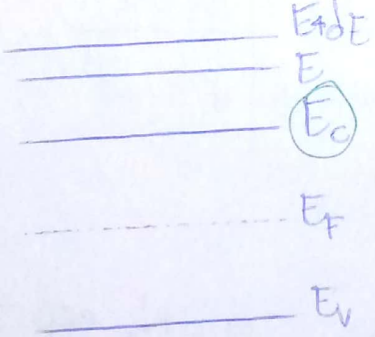
kT est représenté plutôt en eV $1eV = 1,6.10^{-19}\ J$

à $T = 300\ K$, (Température ambiante) on a $kT = 0,0259\ eV$

(voir figure) (A)

III - 3 - Concentration de Porteur dans un sc intrinsèque (pure)

- a - Concentration des électrons dans la BdC :



$dN = D_n dE$

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

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

Ex : Montrer que : $n = N_c \exp\left(-\dfrac{E_c - E_F}{kT}\right)$, identifier alors N_c

sachant que $\int_0^{\infty} x^{1/2} e^{-x} dx = \dfrac{\sqrt{\pi}}{2}$

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

$x = \dfrac{E - E_c}{kT}$

Scanné avec CamScanner

$$n = \int_{E_c}^{\infty} D_n(E) f_n(E)\, dE = \int_{E_c}^{\infty} 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} (E - E_c)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) \quad \text{pour } E < E_F$$

$$x = \frac{E - E_c}{kT} \; ; \; dx = \frac{dE}{kT}$$

$$dE = dx(kT)$$

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

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

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

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

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

$E - E_c \Rightarrow x = 0$

$E'' = \infty \Rightarrow x'' = \infty$

A 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 : $p = N_v \exp\left(\frac{E_F - E_v}{kT}\right)$

avec $N_v = \frac{2}{h^3} \left(2\pi m_p kT\right)^{3/2}$

A 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

Scanné avec CamScanner

Remarque importante :

① Dans un semiconducteur intrinsèque on a $n = p = n_i$

n_i : concentration intrinsèque.

Ex : montrer que pour s.c intrinsèque on a :

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{KT}{2} \ln \frac{N_v}{N_i}$$

Scanné avec CamScanner

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

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

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

$\Rightarrow E_F = \frac{1}{2}\left(kT \ln \frac{N_v}{N_c} + E_v + E_c\right)$ d'où résultat

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 :

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

à l'équilibre thermique

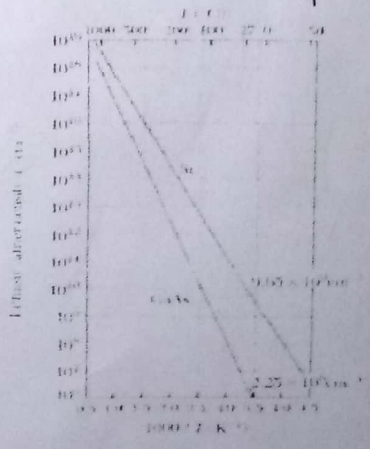
Ex : Montrer que

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

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

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

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



Remarque

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

IV Semiconducteurs extrinsèques

IV-1-Généralités

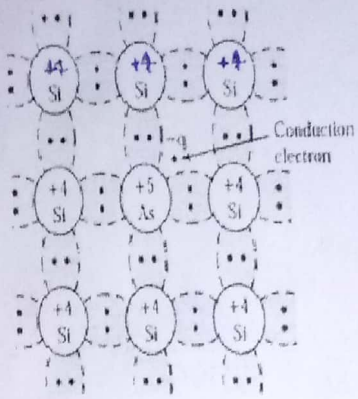
Lorsqu'on introduit des impuretés d'une manière volontaire, dans un semiconducteur après l'avoir purifié, on dit qu'**on le dope**. La proportion d'imputretés est de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-6}; le semiconducteur est alors dit **extrinsèque**. Ainsi, pour cristal semiconducteur Si par ex dans un cm^3, 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.

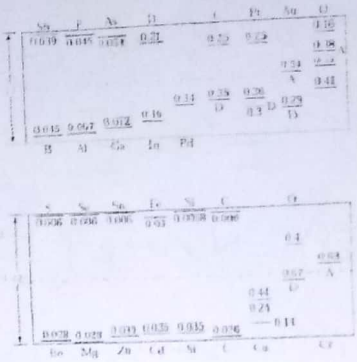
IV-2-Semiconducteur extrinsèque de type N:

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;

Scanné avec CamScanner

commeAs est pentavalent, (5 e périphériques), alors 4 é'lectrons 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.





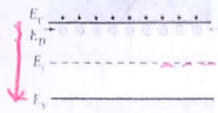
Donc on aura à peu près, autant d'électrons libres que d'atomes dopés.
On dit dans ce cas que As est un **atome donneur** et que **le semiconducteur est dopé N** ou **de type N.**
Les niveaux d'énergie des électrons des atomes donneurs forment une bande étroite qui se situe tout juste au dessous du niveau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

loi d'action de masse
A l'équilibre $np = n_i^2$

Neutralité électrique imposée
Σ charge positive + Σ charge négative

(-q) charge d'é⁻
(+q) charge de trous

$E_g = E_c - E_v$



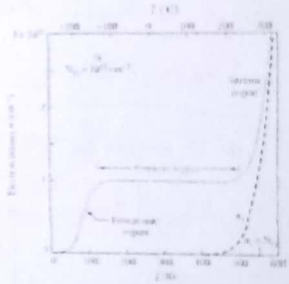
Cherchons l'expression de la concentration de porteurs libres; on a
La loi d'action de masse qui est aussi valable pour une semiconducteur extrinsèque à l'équilibre: $np=n_i^2$
La neutralité électrique impose : $n(-q)+p(+q)+N_D(+q)=0$
Exercice

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*

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

(exp: $N_D = 10^{16}$ cm^{-3} ; $N_D^2 \gg n_i^2$; $n_i^2 = 10^{20}$ cm^{-3})



Pour le semiconducteur extrinsèque de type N on notera le niveau de Fermi E_{Fn} et celui intrinsèque E_i.
On a dans ce cas:
$n_n \approx N_D$ *et donc* $N_D = N_c \exp\left[\frac{E_c - E_{Fn}}{kT}\right] \Rightarrow \ln\frac{N_D}{N_c} = -\left(\frac{E_c - E_{Fn}}{kT}\right) \Rightarrow E_c - E_{Fn} = kT \ln\left(\frac{N_c}{N_D}\right)$

$E_F = E_{Fn}$

Remarque:

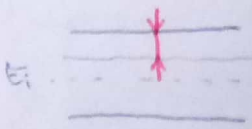
$N_D \nearrow \Rightarrow \frac{N_c}{N_D} \searrow \rightarrow \ln\frac{N_c}{N_D}(\searrow) \Rightarrow E_c - E_{Fn}(\searrow)$

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

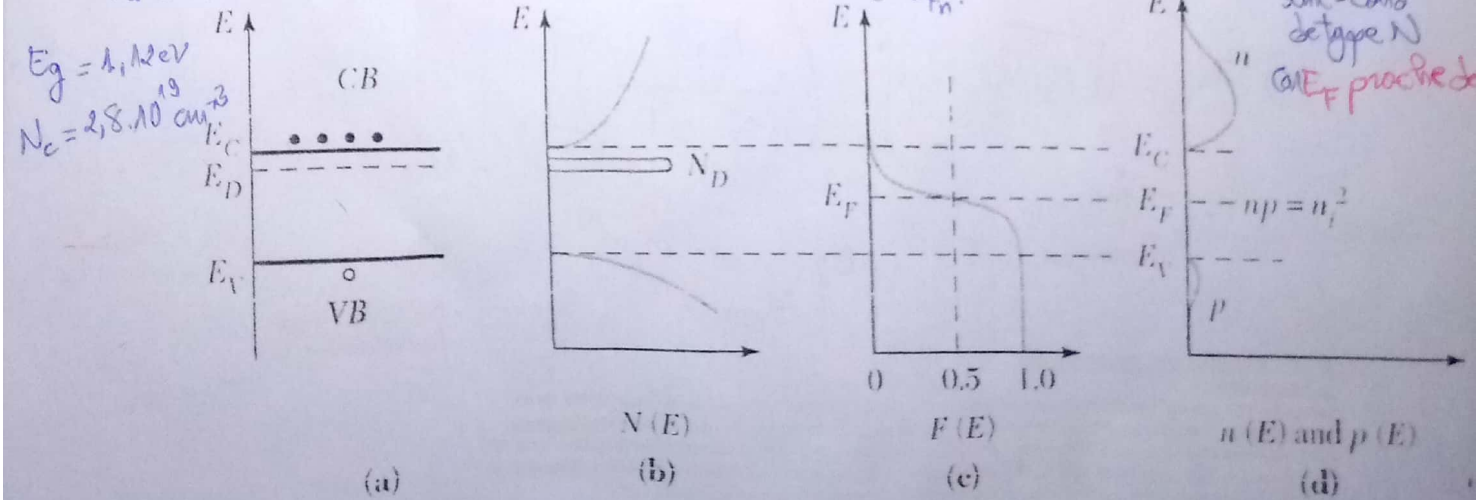
$N_D = 10^{16}$ cm^{-3}
$n_i = 1{,}45 \cdot 10^{10}$ cm^{-3}

$N_D = 10^{16}$ at/cm^3

n ?
p ?
$E_c - E_{Fn}$?

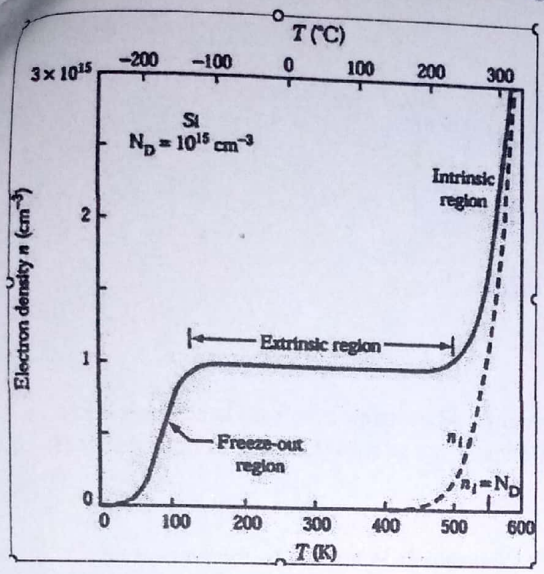


$E_g = 1{,}12$ eV
$N_c = 2{,}8 \cdot 10^{19}$ cm^{-3}

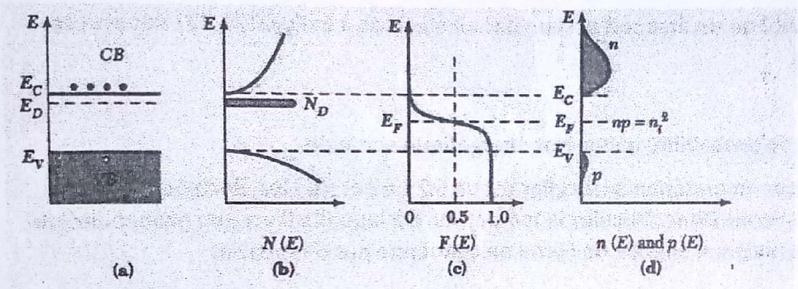


semi-cond de type N
E_F proche de E_C

Scanné avec CamScanner



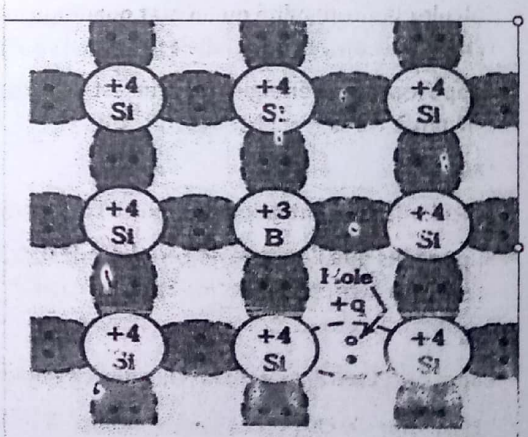
La figure ci-contre, montre la densité électronique en Si en fonction de la température pour une concentration en donneur de $N = 10^{15}\ cm^{-3}$. À basse température, l'énergie thermique dans le cristal n'est pas suffisante pour ioniser toutes les impuretés donneurs présentes. Certains électrons sont «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 bore est donc appelé atome accepteur car il crée un trou

De la même manière que dans le paragraphe précédent, il y a deux sortes de porteurs dans la bande de valence

Exercice

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

Solution:

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

---> l'équation exprimant la neutralité électrique: ..... (oo)

A partir de l'équation (o) on déduit que n=..... Qu'on remplace dans l'éq (oo) ce qui donne:

..... Équation du second degré en .....

Le discriminant Δ =.....

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

Scanné avec CamScanner

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 $p_p \approx$ ..... et n_p=.....

Cherchons, maintenant la position du niveau de Fermi noté E_{Fp}.

Ex: Montrer que: $E_{Fp} - E_V = kT.Ln(N_V/N_A)$

.....

.....

.....

.....

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

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 toutes 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 [illegible] température.

Ex6

[illegible] 300 K.

Les masses effectives des porteurs dans le silicium est $m_n^* = 1,08m_0$ et $m_p^* = 0,56m_0$

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.

Scanné avec CamScanner

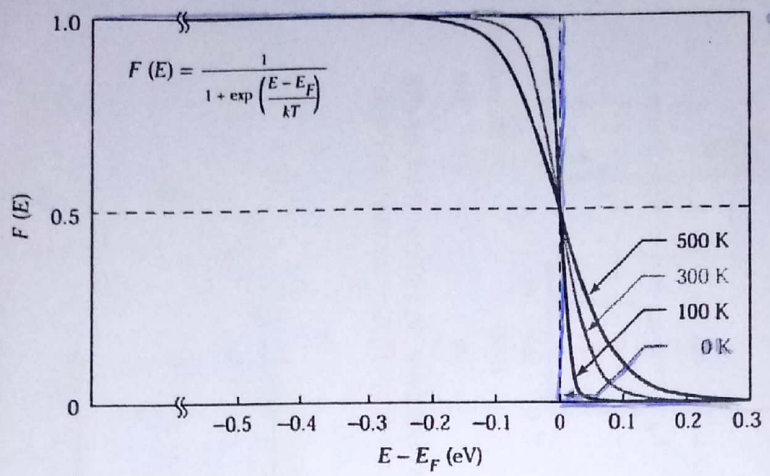


Fig. 14 Fonction de distribution de Fermi F(E) en fonction de (E - E_F) pour différentes températures.

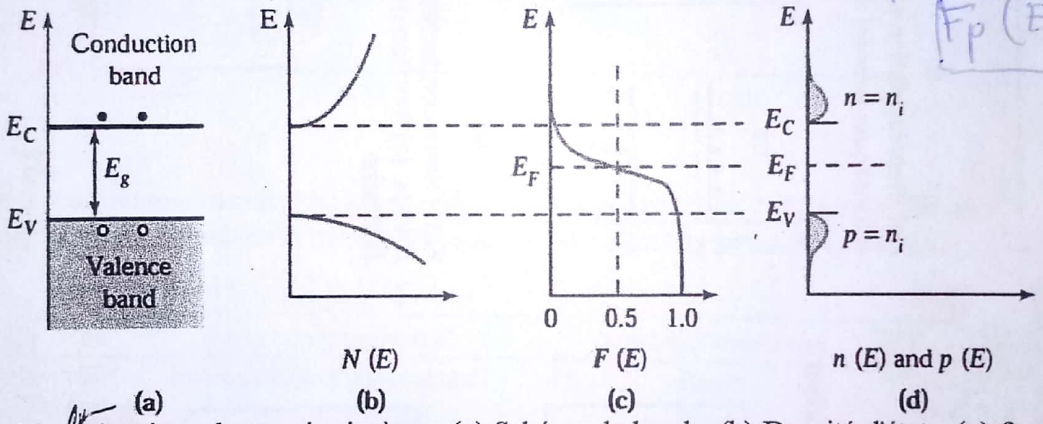
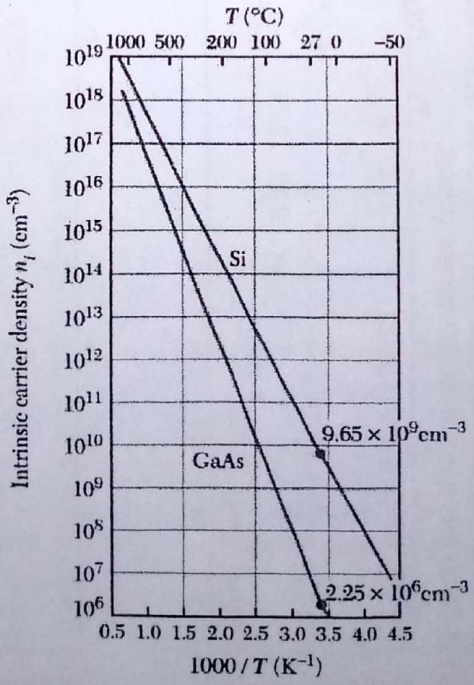


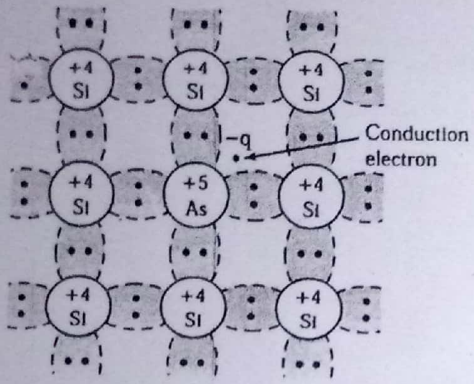
Fig. 15 Semi-conducteur intrinsèque. (a) Schéma de bande. (b) Densité d'états. (c) fonction de distribution de Fermi. d) Concentration de la porteuse.



16

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

Scanné avec CamScanner



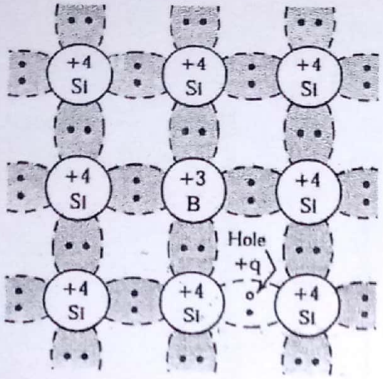
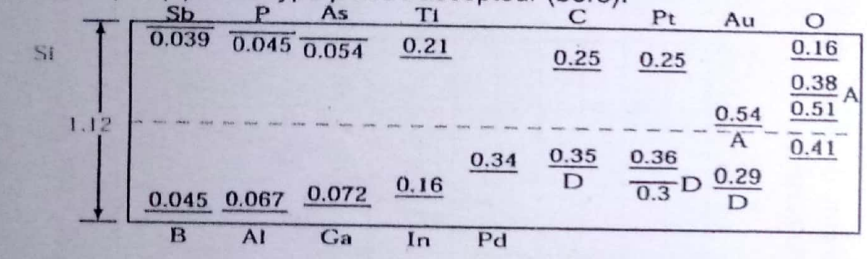


Fig. Images de liaison schématiques pour (a) Si de type n avec donneur (arsenic) et (b) Si de type p avec accepteur (bore).



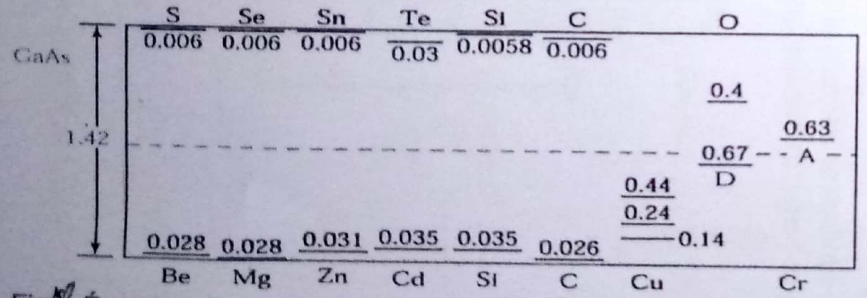


Fig. Énergies d'ionisation mesurées (en eV) pour diverses impuretés

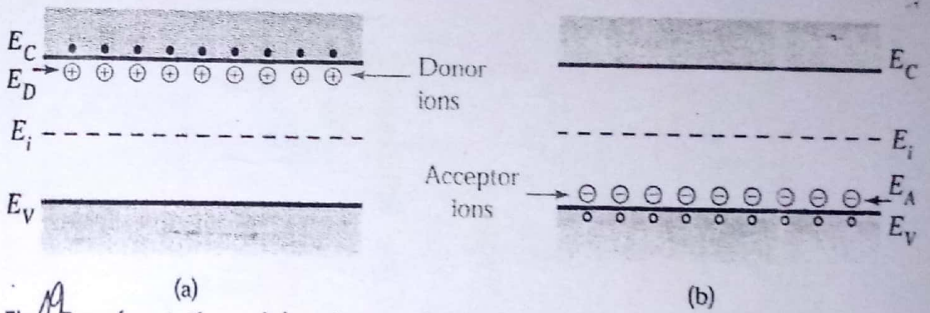


Fig. Représentation schématique en bandes d'énergie de semi-conducteurs extrinsèques avec (a) des ions donneurs et (b) des ions accepteurs.

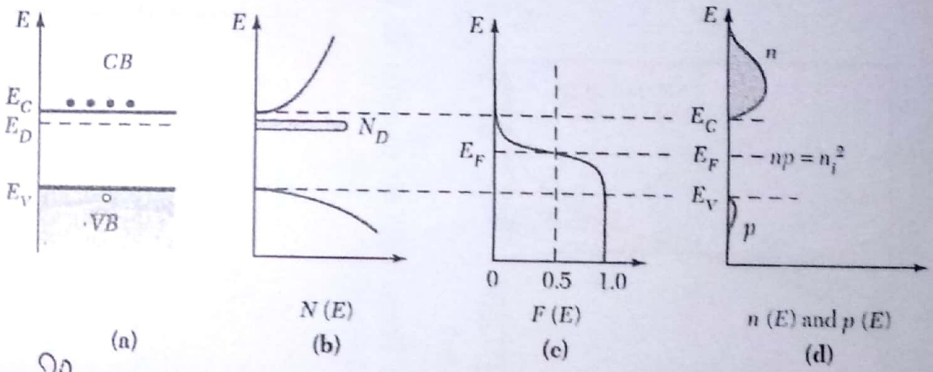
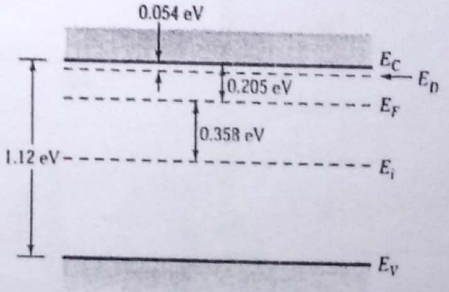


Fig. Semi-conducteur de type n. (a) Schéma de bande. (b) Densité d'états. (c) fonction de distribution de Fermi. d) Concentration de la porteuse



21

Scanné avec CamScanner

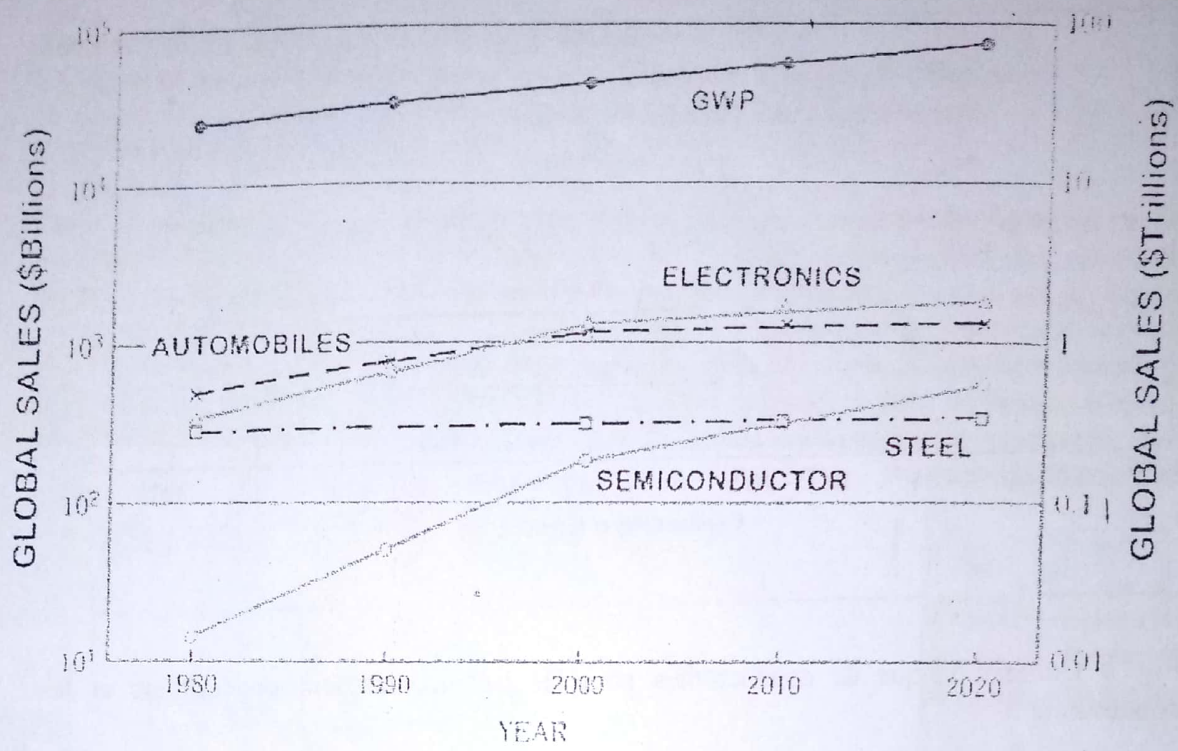


Fig. 1 Produit mondial brut (PRP) et volumes des ventes des industries de l'électronique, de l'automobile, des semi-conducteurs et de l'acier de 1980 à 2010 et prévus jusqu'en 2020.

TABLE 1 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.

Scanné avec CamScanner

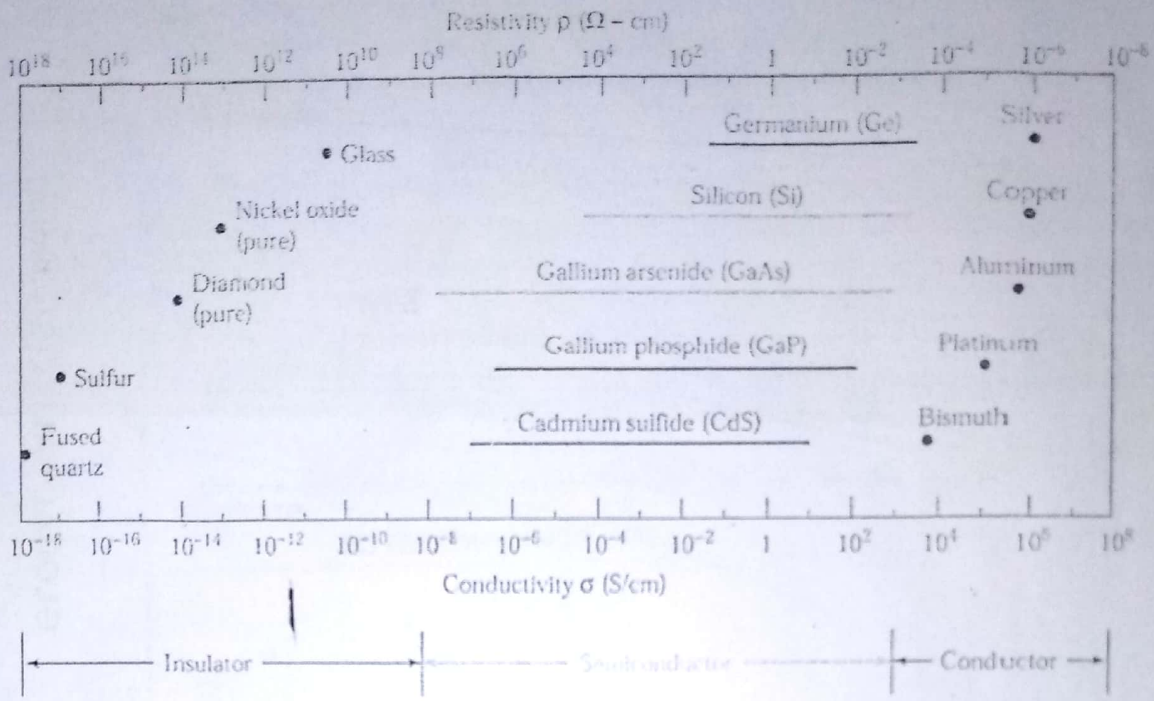


Fig. 9 Gamme typique de conductivités pour les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs.

TABLE 2 Semiconductor Materials[a]

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

Scanné avec CamScanner

Les lignes de transmission.

Introduction :

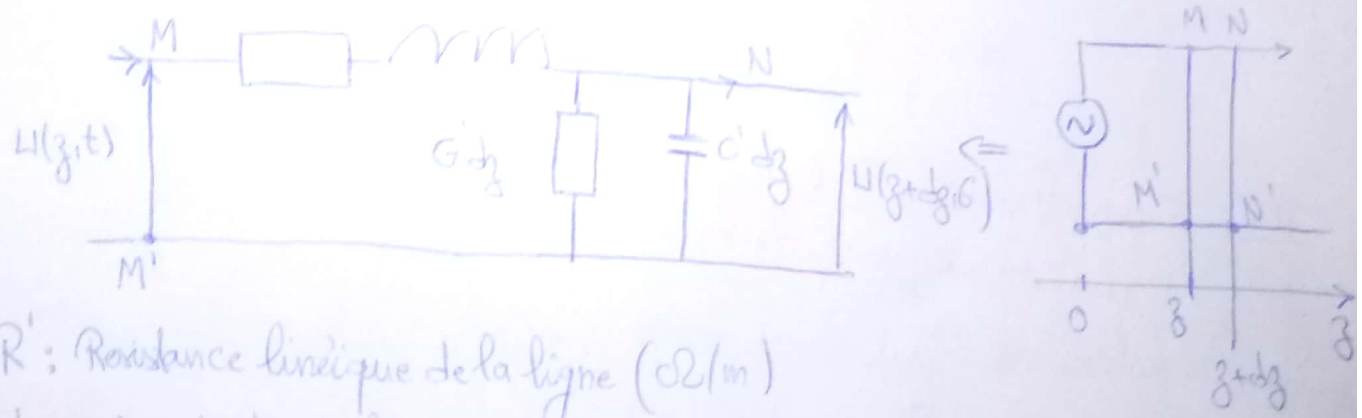
Lorsque un conducteur est parcouru par un signal dans le longueur d'onde est incomparable du conducteur. On doit prendre en compte le fait que deux pts ≠ de ce conducteur ont pas le même tension, ni le même courant

Exp : $\lambda = \frac{c}{f}$; $f = 1\,MHz$; $\lambda = \frac{3.10^8}{10^6} = 3.10^5\,m$; ~~$f = 16\,Hz = 10^3\,Hz$~~

$f = 16\,Hz = 10^3\,Hz$; $\lambda = 0{,}13m = 300m$

Hyperfréquence : micro-ondes.

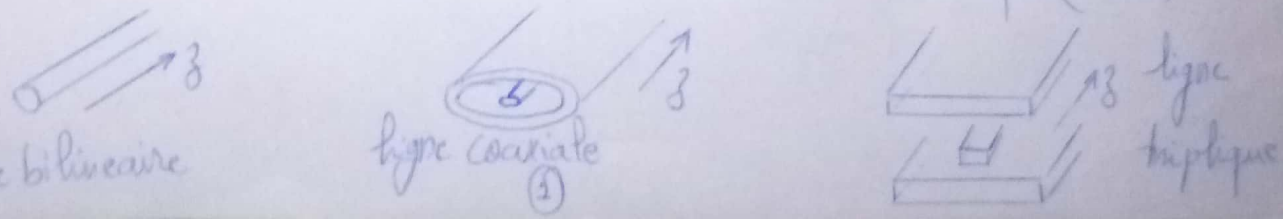
Cette prise en compte se traduit dans les cas de lignes à 2 conducteurs (Exp : lignes bifilaire, ligne coaxiale, ligne triplaque) homogène dans sa direction longitudinale, par la modélisation de chaque portion de longueur dz par quadripole à constantes localisées suivante :



R' : Résistance linéique de la ligne (Ω/m)

L' : ref inductance linéique de la ligne (H/m)

G' : conducteur linéique (Ω^{-1}/m) ; C' : capacitance linéique (F/m)



Scanné avec CamScanner

Appliquons les lois des circuits à ce quadripole :

- a - loi des mailles :

$$u(z,t) - R' dz \cdot I(z,t) - L' dz \frac{dI}{dt} - u(z+dz,t) = 0$$

$$- \frac{\partial u}{\partial z} \cdot dz - R' dz\, I(z,t) - L' dz \frac{dI}{dt} = 0$$

$$- \frac{du}{dz} - R' I(z,t) - L' \frac{dI}{dt} = 0$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{du}{dz} = -R' I(z,t) - L' \frac{dI}{dt}} \quad (1)$$

- b - Lois des noeuds :

lorsque le courant est en sens inverse

$$U = Z \cdot I \iff I = (-) Y \cdot U \qquad U = R.I \Rightarrow I = G \cdot U$$

Impédance — La conductance

$$I(z,t) - I(z+dz,t) - G' dz\, u(z,t) - C' dz \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = 0$$

$$- \frac{dI}{dz} \cdot dz - G' dz\, u(z,t) - C' dz \cdot \frac{du}{dt} = 0$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{dI}{dz} = -G' u(z,t) - C' \frac{du}{dt}} \quad (2)$$

- II - Equations Des Télégraphistes : Equation de propagation :

EX : combiner les équations (1) et (2) pour obtenir une equation en U seulement

on supposera que $\frac{d^2 I}{dt\, dz} = \frac{d^2 I}{dz\, dt}$

$$\frac{d(1)}{dz} = \frac{d^2 u}{dz^2} = -R \frac{dI}{dz} - L \frac{d^2 I}{dz\, dt}$$

Scanné avec CamScanner

$$\frac{d(2)}{dt} \Rightarrow \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial z} = -G' \frac{\partial U}{\partial t} - C' \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -R' \left[-G'U - C' \frac{\partial U}{\partial t} \right] - L' \left[G' \frac{\partial U}{\partial t} - C' \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right]$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - R'G'U - [R'C + L'G] \frac{\partial U}{\partial t} - L'C' \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0}$$

cette equation s'appelle equation des telegraphistes en U

Exp: Montrer qu'on obtient une equation semblable en I en regime sinusoïdale (dite harmonique) $\Rightarrow$ on la notation Complexe :

$$U(z,t) \quad \longrightarrow \quad \underline{U}(z) e^{j\omega t}$$
$$I(z,t) \quad \longrightarrow \quad \underline{i}(z) e^{j\omega t}$$

$$(1) \Rightarrow \frac{d\underline{U}(z)}{dz} e^{j\omega t} = -R' \underline{i}(z) e^{j\omega t} - L' j\omega \underline{i}(z) e^{j\omega t}$$

$$\boxed{\frac{d\underline{U}(z)}{dz} = -(R' + j\omega L') \underline{I}(z)} \quad (1')$$

$$(2) \Rightarrow \boxed{\frac{d\underline{I}(z)}{dz} = -(G' + j\omega C') \underline{U}(z)} \quad (2')$$

$$(1') \text{ et } (2') \Rightarrow \frac{d(1')}{dz} = \frac{d^2 U}{dz^2} = -(R' + j\omega L') \frac{d\underline{I}(z)}{dz}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{d^2 \underline{U}(z)}{dz^2} = (R' + j\omega L')(G' + j\omega C') \underline{U}(z)} \quad (3)$$

Cette équation de propagation en $\underline{U}(z)$ et en posant

$$\underline{\gamma}^2 = (R' + j\omega L')(G' + j\omega C')$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{d^2 \underline{U}(z)}{dz^2} = \underline{\gamma}^2 \underline{U}} \quad (3)$$

Scanné avec CamScanner

EX : obtenir une equation en $i(z)$ seulement pour ce cas là, même indique LI :

$$\frac{d^2 i(z)}{dz^2} = \gamma^2 \, i(z) \quad (BC)$$

Scanné avec CamScanner

L'onde progressive a une double périodicité

$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ : période spatiale longueur d'onde

$W = \frac{2\pi}{T}$; T : période temporelle

EX : Montrer que : $\frac{\underline{u}_+}{\underline{i}_+} = -\frac{\underline{u}_-}{\underline{i}_-} = \underline{Z}_c$; $\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{R' + jwL'}{G' + jwC'}}$

indication : (1') et (2')

$(1)' \Rightarrow \frac{d\underline{u}}{dz} = -(R' + jwL')\underline{i}$ *

et $(4b)$: $\underline{i}(z) = \underline{i}_+ e^{-\underline{\gamma} z} + \underline{i}_- e^{\underline{\gamma} z}$

$(4a)$: $\underline{u}(z) = \underline{u}_+ e^{-\underline{\gamma} z} + \underline{u}_- e^{\underline{\gamma} z}$

et $(2)'$: $\frac{d\underline{i}}{dz} = -(G' + jwC')\underline{u}$

$$* \frac{d}{dz}\left(\underline{u}_+ e^{-\underline{\gamma} z} + \underline{u}_- e^{\underline{\gamma} z}\right) = -(R' + jwL')\left[\underline{i}_+ e^{-\underline{\gamma} z} + \underline{i}_- e^{\underline{\gamma} z}\right]$$

$$\underline{\gamma}\left(-\underline{u}_+ e^{-\underline{\gamma} z} + \underline{u}_- e^{\underline{\gamma} z}\right) = -(R' + jwL')\left[\underline{i}_+ e^{-\underline{\gamma} z} + \underline{i}_- e^{\underline{\gamma} z}\right]$$

$$\begin{cases} -\underline{\gamma}\,\underline{u}_+ = -(R' + jwL')\,\underline{i}_+ \\ \underline{\gamma}\,\underline{u}_- = -(R' + jwL')\,\underline{i}_- \end{cases} \Rightarrow \frac{\underline{u}_+}{\underline{i}_+} = \frac{R' + jwL'}{\underline{\gamma}}$$

$$\frac{\underline{u}_-}{\underline{i}_-} = -\frac{R' + jwL'}{\underline{\gamma}}$$

$$\frac{R' + jwL'}{\underline{\gamma}} = \frac{R' + jwL'}{\sqrt{(R' + jwL')(G' + jwC')}} = \sqrt{\frac{R' + jwL'}{G' + jwC'}} = \underline{Z}_c$$

$\underline{Z}_c$: Impédance caractéristique de la ligne

III - Resolution Des equations de Propagation :

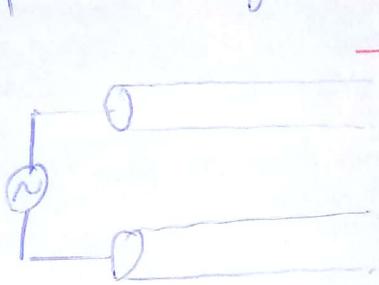
$$\frac{d^2\underline{u}}{dz^2} - \underline{\gamma}^2 \underline{u} = 0 \qquad \underline{u}(z) = \underline{u}_+ e^{-\underline{\gamma} z} + \underline{u}_- e^{\underline{\gamma} z}$$

u_+ et u_- : 2 csts qui ont la dimension d'une tension.

$$\frac{d^2\underline{i}}{dz^2} - \underline{\gamma}^2 \underline{i}(z) = 0 \quad \Rightarrow \underline{i}(z) = \underline{i}_+ e^{-\underline{\gamma} z} + \underline{i}_- e^{\underline{\gamma} z}$$

$\underline{i}_+$ et $\underline{i}_-$ sont 2 csts qui homogènes à un courant

Supposons qu'on a une ligne ∞



en multipliant la dépendance temporelle on aura :

$$\underline{u}(z)\, e^{j\omega t} = \underbrace{u_+ e^{(-\underline{\gamma} z + j\omega t)}}_{\text{onde retournée / aller}} + \underbrace{u_- e^{(\underline{\gamma} z - j\omega t)}}_{\text{onde aller retournée}}$$

$$u_+ e^{-\alpha z} \cdot e^{-j(\beta z - \omega t)}$$

ici $\underline{u}_- = 0$: pas d'onde retournée

- $e^{-\alpha z}$ c'est une fonction ↓ elle représente l'atténuation
- $e^{j(\omega t - \beta z)}$ représente une onde progressive dans le sens de z ↑

Scanné avec CamScanner