

Chapitre 1

Introduction à la physique des semi- conducteurs

Buts du chapitre = compléter ELEC-H301

Physique du semi-conducteur

- ▶ notions fondamentales
 - ◆ bandes d'énergie dans un cristal
 - ◆ électro-neutralité
- ▶ lois fondamentales
 - ◆ conductivité
 - ◆ concentrations de porteurs à l'équilibre

vue simplifiée et axiomatique

Ce chapitre se veut un complément à l'introduction à la physique des semi-conducteurs vue au cours ELEC-H301.

Une bonne connaissance de cette base est donc indispensable à la compréhension de ce qui suit...

Nous allons ici donner les lois fondamentales nécessaires à une première approche, de manière axiomatique et souvent dans une version simplifiée. Pour leur justification rigoureuse, se référer au cours de physique des semi-conducteurs pour ingénieurs physiciens. Les cours de micro-électronique ultérieurs apporteront également des précisions sur ce sujet.

Physique du semi-conducteur

PLAN

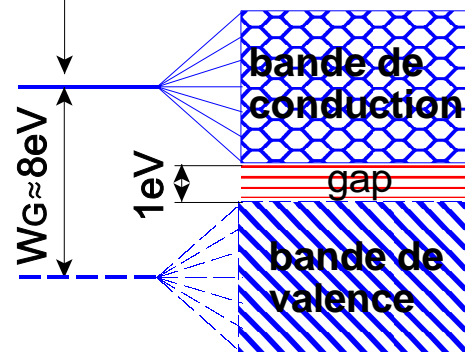
- ▶ **conducteur/semi-conducteur/isolant**
 - ◆ **définition par les niveaux énergétiques**
 - ◆ **rappel sur la notion paire électron-trou**
- ▶ le silicium intrinsèque
- ▶ le silicium dopé

Niveaux d'énergie des électrons

dans un cristal, les niveaux deviennent des bandes

- ▶ atome
 - ◆ chaque électron possède son propre niveau d'énergie dépendant de son orbitale
 - ◆ il faut $\approx 8\text{eV}$ pour arracher un e^- de valence à un atome de Si isolé à 25 le transformer en **électron libre**
- ▶ cristal
 - ◆ interactions entre électrons des différents atomes => chaque niveau éclate en une **bande d'énergie** (quasi-continuum)
 - ◆ e^- libres : **bande de conduction**
 - ◆ e^- de valence : **bande de valence**
 - ◆ gap moyen $\approx 1\text{eV}$ pour arracher un e^- de valence à un atome d'un cristal de Si à

Cet



52 C

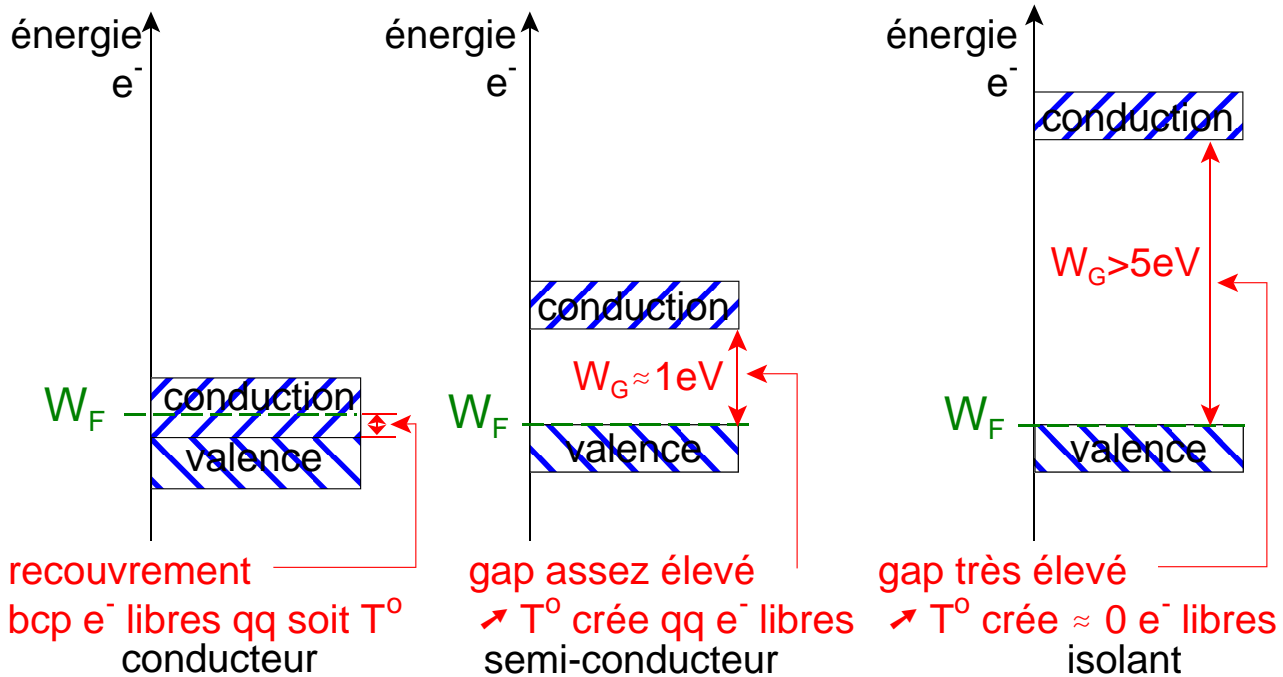
En fournissant environ 8eV à un électron de périphérie d'un atome de Si, on le rend **libre**.

Lorsque les atomes font partie d'un **réseau cristallin**, ils sont proches les uns des autres et les orbites de leurs électrons interagissent. Le principe de Pauli indique que chaque niveau ne peut-être occupé que par 2 électrons de spin opposé. Les électrons de même orbitale des différents atomes sont donc contraints d'occuper des niveaux d'énergie différents. Le nombre de niveaux devient énorme et il est impossible de les considérer un par un. Heureusement, ce n'est pas nécessaire, car on constate que les niveaux se répartissent de manière non uniforme, occupant des **bandes** constituées de niveaux quasi infiniment voisins.

Les électrons de valence occupent la **bande de valence** et les électrons libres la **bande de conduction**. En dehors de ces bandes, les niveaux d'énergie ne peuvent pas être occupés. L'écart énergétique W_G entre les bandes, appelé aussi "**gap**", est une caractéristique du matériau. On voit que les électrons les plus énergétiques de la bande de valence, n'ont cette fois plus qu'un eV à acquérir pour passer dans la bande de conduction.

Conducteur / semi-conducteur / isolant

c'est le gap qui fait la distinction: exemples à 0°K



Les bandes d'énergie définies précédemment se peuplent en commençant par les niveaux les plus bas. Au zéro absolu, tous les électrons sont situés en dessous d'un niveau appelé **niveau de Fermi W_F** .

- à la figure de gauche le niveau de Fermi est dans la bande de conduction et il y a recouvrement entre bandes de valence et de conduction, on a affaire à un **conducteur**. Le **nombre d'électrons libres** dans la bande de conduction est **indépendant de la température**
- à la figure de droite, le corps est un **isolant**. Seule l'agitation thermique va pouvoir donner à quelques électrons du sommet de la bande de valence l'énergie nécessaire pour atteindre le bas de la bande de conduction. La **conductivité va donc dépendre de la température**. La probabilité qu'un électron passe dans la bande de conduction est d'autant plus faible que l'écart énergétique W_G à franchir est important ; il est supérieur à 5eV pour les isolants
- la figure du milieu représente les **semi-conducteurs** ; on ne remarque aucune différence de principe par rapport à celle de droite ; la seule différence est que le "gap" est de l'ordre de 1eV. Le terme "semi-conducteur" est donc peut-être mal choisi. En considérant la structure du diagramme d'énergie les semi-conducteurs sont plutôt des isolants de qualité inférieure.

Conducteur / semi-conducteur / isolant

tableau récapitulatif

	métaux	semi-cond.	isolants
conductivité [$\Omega^{-1}m^{-1}$]	5E+7	1 à 1E+3	1E-12
composition	pur	pur+dopants	molécules complexes
valence	1	4	
gap	recouvrement	$\approx 1eV$	$>5eV$
exemples	Au,Ag,Cu,Al	Si,Ge,GaAs SiC, GaN	verre, céramique, PVC, PTFE

Ce tableau reprend les différents critères de comparaison des conducteurs, semi-conducteurs et isolants. Remarquer l'importante diminution de conductivité lorsque le gap s'accroît, traduisant ainsi la difficulté de création d'électrons libres.

Les principaux cristaux à la base des semi-conducteurs actuels sont

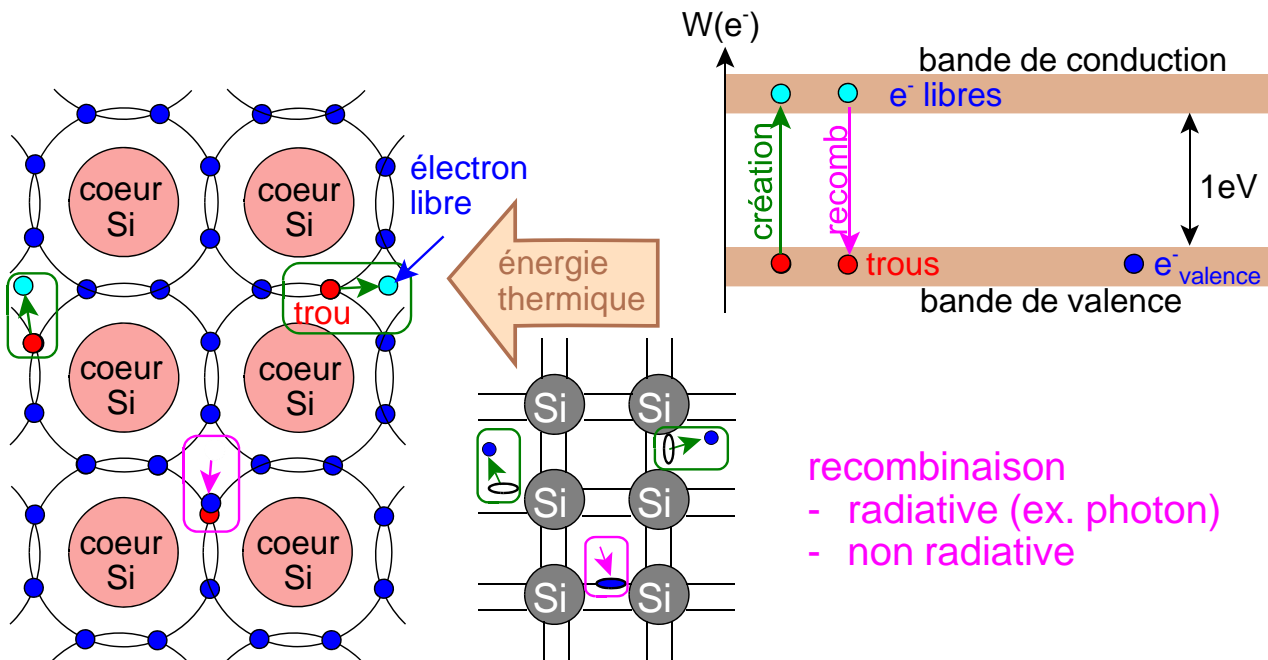
- Ge: Germanium; (historiquement le premier, mais peu utilisé aujourd'hui)
- Si: Silicium; de loin le plus courant
- GaAs: Arséniure de Gallium; utilisé pour certains transistors haute fréquence
- GaN: Nitrure de Gallium; utilisé pour des diodes lumineuses, de la haute fréquence et des transistors de puissance
- SiC: Carbure de Silicium; utilisé pour l'électronique de puissance

Les deux derniers matériaux sont caractérisés par un *gap* plus élevé, autorisant, une température plus élevée, comme nous le verrons par la suite.

Tout le cours sera basé sur le Silicium.

Si pur à 300°K : agitation thermique

$T^{\circ} \Rightarrow$ création/recombinaison de paires électron-trou



Cette diapositive nous rappelle la notion de paire électron-trou.

Le "coeur" de l'atome représente ici le noyau, plus toutes les couches électroniques, sauf la dernière. Nous nous intéressons ici exclusivement à des phénomènes propres à la dernière couche électronique.

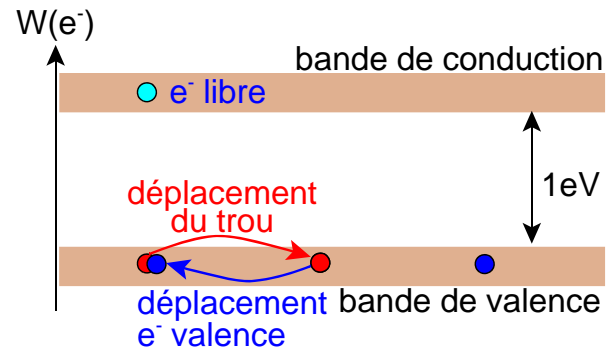
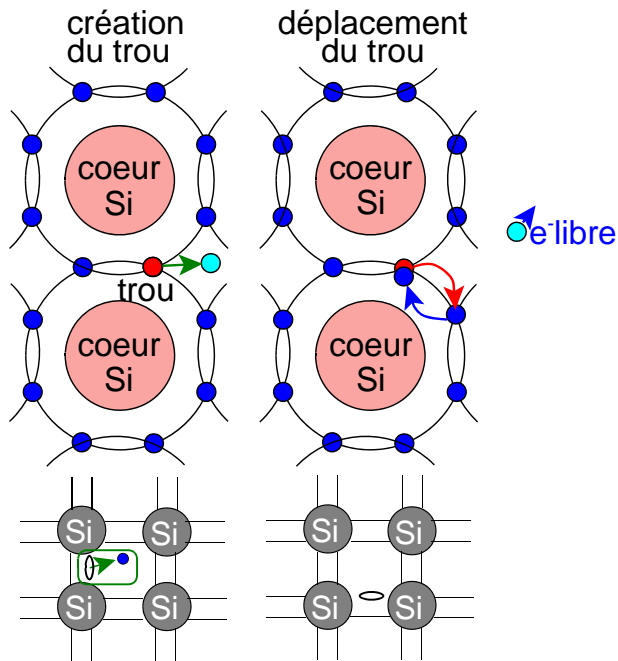
A température ambiante, l'agitation thermique dans le cristal apporte aux électrons de valence les plus énergétiques le supplément d'énergie de l'ordre de 1eV qui les fait passer dans la bande de conduction : ils deviennent alors des **électrons libres**. Ils laissent dans la bande de valence une place libre pour un électron appelée **trou** : il y a donc **création d'une paire électron-trou**.

Inversement, un électron de la bande de conduction perdant de l'énergie peut retomber dans la bande de valence en "comblant un trou" au voisinage duquel il passe : c'est la **recombinaison électron-trou**. Dans certains cas, cette recombinaison peut être *radiative* c'est-à-dire s'accompagner de l'émission d'un rayonnement (photon), sinon l'énergie est restituée au cristal sous forme thermique (phonon).

Dans les diodes électroluminescentes (LED ou Light Emitting Diode) les recombinaisons émettent des photons dans l'infrarouge ou dans le visible (typiquement rouge, vert, jaune, plus récemment le bleu et donc une large palette de couleurs si l'on combine rouge-vert-bleu).

Si à 300°K : les trous se déplacent

les électrons de valence sont aussi mobiles



! mobilité des trous => ne pas considérer des ions Si^+

Une fois le trou créé, il peut également être comblé par un électron de valence provenant d'une liaison covalente adjacente. Dans ce cas, cet électron laisse derrière lui un nouveau trou. Il y a donc un **déplacement physique d'un électron de valence qui peut être vu comme le déplacement d'un trou**.

Dès lors, nous considérerons dans la suite du cours que le **trou est une charge mobile** au sein de la bande de valence (en oubliant que c'est en réalité un électron qui fait le déplacement en sens inverse).

REM1 : les propriétés de déplacement des électrons libres et des trous ne sont pas identiques, parce qu'ils ont lieu dans des bandes d'énergie différentes. En particulier, les électrons sont environ trois fois plus **mobiles** que les trous. (Nous donnerons plus loin la définition précise de la mobilité).

REM2 : l'atome de Silicium qui a perdu un électron libre **n'est pas devenu** pour autant **un ion positif**, en raison de la mobilité des trous dans la bande de valence.

Conduction dans un semi-conducteur

bipolaire = basée sur 2 types de charge

- ▶ l'agitation thermique crée des paires électron-trou
- ▶ les semi-conducteurs possèdent 2 types de charges mobiles
 - ◆ **négatives** : électrons libres se déplaçant dans la bande de conduction
 - ◆ **positives** : trous se déplaçant dans la bande de valence

Physique du semi-conducteur : plan

PLAN

- ▶ conducteurs, semi-conducteurs et isolants
- ▶ **le silicium intrinsèque**
 - ◆ **électro-neutralité**
 - ◆ **densités de porteurs**
 - ◆ **conductivité**
- ▶ le silicium dopé

Le Silicium est électriquement neutre

vue globale

- ▶ soit, dans un volume donné
 - ◆ N le nombre d'électrons libres
 - ◆ P le nombre de trous
- ▶ principe d'**électro-neutralité globale**
 - ◆ le cristal est neutre au départ
 - ◆ la création de paires électron-trou ne crée pas de charges => $P=N$

Le Silicium est électriquement neutre

vue locale

- ▶ soit, dans un petit élément de volume
 - ◆ n la densité d'électrons libres [m^{-3}]
 - ◆ p la densité de trous [m^{-3}]
- ▶ principe d'électro-neutralité locale
 - ◆ si on suppose $p \neq n$
 - la densité de charge n'est pas nulle : $\rho = e(p-n) \neq 0$
 - $\text{div}E = \rho/\epsilon$ apparition d'un champ E très important
 - E déplace les charges mobiles très rapidement (10^{-12} s) et rétablit $p=n$, ce qui annule E

dans un cristal on peut considérer que tout élément de volume contenant des charges **mobiles** est **électriquement neutre**

Prenons maintenant un élément de volume arbitrairement petit (mais contenant suffisamment d'atomes pour pouvoir négliger certains effets quantiques).

Tout déséquilibre dans les charges mobiles engendre un champ électrique ; celui-ci provoque un mouvement des charges par les forces de Laplace, jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli et que le champ disparaisse.

Ces phénomènes sont extrêmement rapides (de l'ordre de la picoseconde) et donc nous pouvons considérer notre élément de volume comme neutre : c'est le principe d' **électro-neutralité locale**.

Attention, ce principe n'est valable que dans un élément de volume qui contient des **charges mobiles** ; nous verrons au chapitre sur la jonction pn qu'il existe dans les semi-conducteurs des zones dépourvues de charges mobiles (dites zones déplétées) qui jouent un rôle très important. Dans ces zones se développe un champ électrique qui peut prendre une valeur significative, voire destructrice.

∃ équilibre (T) des densités de porteurs

notion de densité intrinsèque $n_i(T)$

- ▶ soit par unité de volume et de temps
 - ♦ nbre paires **générées** : fonction de la température T
$$g = G(T) \quad [m^{-3}s^{-1}]$$
 - ♦ nbre paires se **recombinant** : fonction de T et de pn
$$r = pn.R(T) \quad [m^{-3}s^{-1}]$$
- ▶ équilibre $\Rightarrow g = r \Rightarrow pn = G(T)/R(T)$

$$pn = G/R = n_i^2(T) \propto T^3 e^{-\frac{W_G}{kT}} \quad \text{ne dépend que de T}$$

- ▶ électro-neutralité

$$p = n = n_i(T) \quad \text{densité de porteurs intrinsèques}$$

Prenons un cristal de Silicium pur à l'équilibre. Suite à l'agitation thermique, il y a continuellement création et recombinaison de paires électron-trou.

La création est un processus qui dépend uniquement de la température ; nous allons la caractériser par un **taux de création** par unité de temps et de volume

$$g = G(T)$$

La recombinaison, par contre, dépend non seulement de la température mais aussi de la concentration actuelle des 2 types de porteurs présents. Le **taux de recombinaison** est alors

$$r = p.n.R(T)$$

Pour qu'il y ait équilibre ces deux taux doivent être égaux. On en déduit que

$$p.n = G(T) / R(T)$$

Dans la suite de ce cours nous appellerons $n_i^2(T)$ cette fonction de la température.

La raison de cette notation avec un exposant 2 vient du fait que l'électro-neutralité impose que $p=n$ donc

$$p = n = n_i \quad n_i \text{ est donc la densité intrinsèque de trous (ou d'électrons)}$$

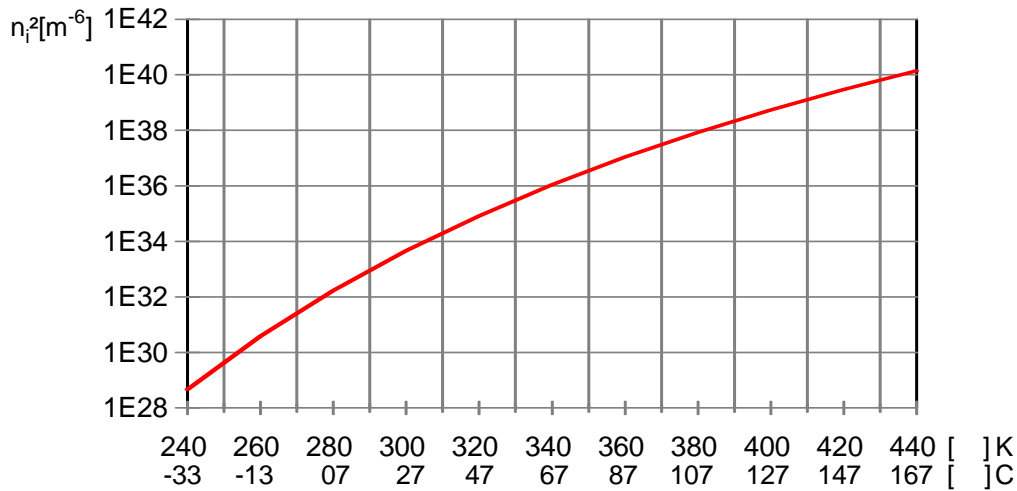
L'indice i et l'adjectif "**intrinsèque**" signifient que les propriétés de densité de charges et de conductivité correspondent à celles du Silicium pur.

On retiendra donc que

dans un cristal de semi-conducteur à l'équilibre, le produit pn des densités de charges mobiles ne dépend que de la température

La fonction $n_i^2(T)$ varie énormément

exemple du Si



$$pn = G/R = n_i^2(T) = A_0 T^3 e^{-\frac{W_G}{kT}}$$

On peut démontrer que la fonction $n_i^2(T)$, dépend

- du cube de la température T
- d'une exponentielle faisant intervenir la température et le "gap énergétique" W_G entre la bande de conduction et la bande de valence. (Rem: W_G varie lui-même légèrement avec la température)

Ce graphique présente l'allure de cette dépendance pour le Silicium avec comme valeurs

$$\begin{aligned} W_G &= 1.12 \text{ [eV]} && \text{(en négligeant sa variation avec } T) \\ k &= 1.38 \text{ E-23 [J/K]} && \text{(constante de Boltzman)} \\ A_0 &= 1.077\text{E+45 [m}^{-6}\text{K}^{-3}] \end{aligned}$$

On voit que la variation de $n_i^2(T)$ s'étend sur 12 ordres de grandeur entre 240 °K (-33°C) et 440°K (167°C), ce qui explique pourquoi les propriétés des semi-conducteurs sont aussi dépendantes de la température.

A titre indicatif, la gamme de température des composants spatiaux et militaires va de -40 °C à +125°C.

Si intrinsèque : très peu de charges mobiles

exemple numérique à 300°K

$$pn = n_i^2 = 4.6E+33 \quad [m^{-6}] \quad (1)$$

$$n = p = n_i = 6.8E+16 \quad [m^{-3}] \quad (2)$$

$$N_{Si} = 5 E+28 \quad [m^{-3}] \quad (3)$$

(3)/(2)=> seulement 1 atome sur 10^{12} fournit une paire électron-trou à température ambiante !!

Pour le Cu, $n=10^{29} [m^{-3}]$ car quasi chaque atome fournit un électron libre

La raison pour laquelle le Si est un aussi mauvais conducteur à température ambiante est sa faible densité de porteurs mobiles.

En calculant la densité de porteurs $p=n=n_i = \sqrt{n_i^2(T)}$, on voit que seul **un atome de Si sur mille milliards fournit une paire électron-trou** à 300°K !!!!

Par comparaison, dans un cristal de Cuivre, on peut considérer que chaque atome fournit un électron libre; la densité d'électrons libres est donc égale à la densité atomique soit $10^{29}[m^{-3}]$, c'est-à-dire **$1,5 \cdot 10^{12}$ fois plus que le Si.**

Conductivité due à la vitesse moyenne

vitesse instantanée \neq vitesse moyenne - mobilité

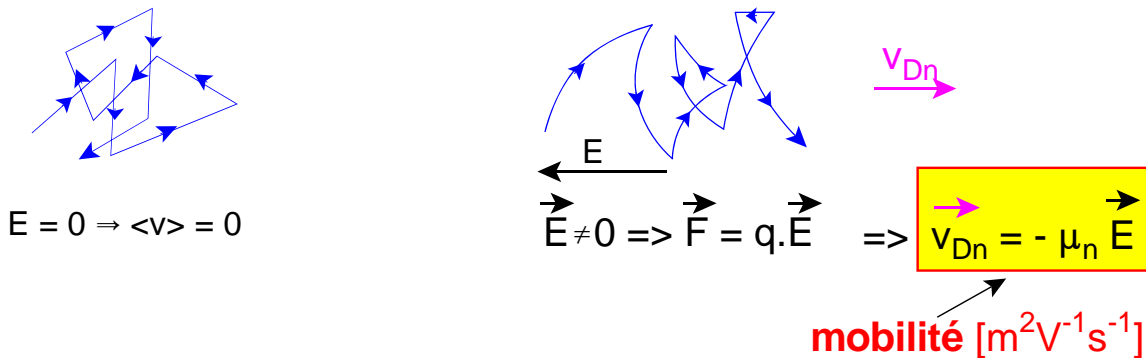
▶ analogie avec un gaz

- ◆ agitation thermique \Rightarrow mouvement ininterrompu
- ◆ cinétique des gaz

$$mv^2/2 = 3kT/2 \text{ soit } v=10^5 \text{ m/s à } 300^\circ\text{K}$$

- ◆ déviations continues par le cristal

▶ vitesse de déplacement moyenne (dérive)



On compare souvent les porteurs de charge d'un semi-conducteur aux molécules d'un gaz. Comme ces dernières, les électrons et les trous sont animés d'un mouvement ininterrompu dû à l'agitation thermique. La théorie cinétique des gaz nous indique qu'une particule qui possède 3 degrés de liberté possède une énergie cinétique $mv^2/2 = 3/2kT$. On en déduit que la vitesse de déplacement est donnée par $v^2 = 3kT/m$. Compte tenu de la masse de l'électron, on obtient une **vitesse instantanée très élevée de l'ordre de 10^5 m/s**.

Animés de cette vitesse, les porteurs de charge ne parcourent pas un trajet rectiligne dans le cristal. Entre autres causes (que nous ne détaillerons pas ici), les imperfections du réseau cristallin constituent des obstacles qui dévient les trajectoires en tous sens, de manière aléatoire. Le chemin parcouru par les charges est donc une ligne brisée, représentée sur la figure en bas à gauche. Comme il n'y a aucune direction préférentielle, le déplacement moyen est nul et aucun courant macroscopique de charges n'apparaît. (Figure en bas à gauche : déplacement des électrons)

Appliquons une source de tension aux deux extrémités d'un barreau de cristal semi-conducteur. La différence de potentiel va engendrer un champ électrique longitudinal E , qui exerce une force de Coulomb $F = qE$ dans le sens du champ pour les trous ($q=+e$) et en sens inverse du champ pour les électrons ($q=-e$). Cette force va

- incurver les trajectoires (figure en bas à droite)
- induire une **vitesse moyenne** de déplacement v_{Dn} dans le sens du champ pour les électrons,
- induire une vitesse moyenne de déplacement v_{Dp} en sens opposé pour les trous.

Cette vitesse moyenne est appelée aussi **vitesse de dérive** ou "**drift velocity**"

On peut montrer que, dans les conditions normales, cette vitesse est **proportionnelle au champ E** ; les coefficients de proportionnalité sont appelés **mobilités** qui dépendent de la nature du semi-conducteur et du type de charge. En définissant le sens positif de déplacement dans le sens du champ électrique nous avons

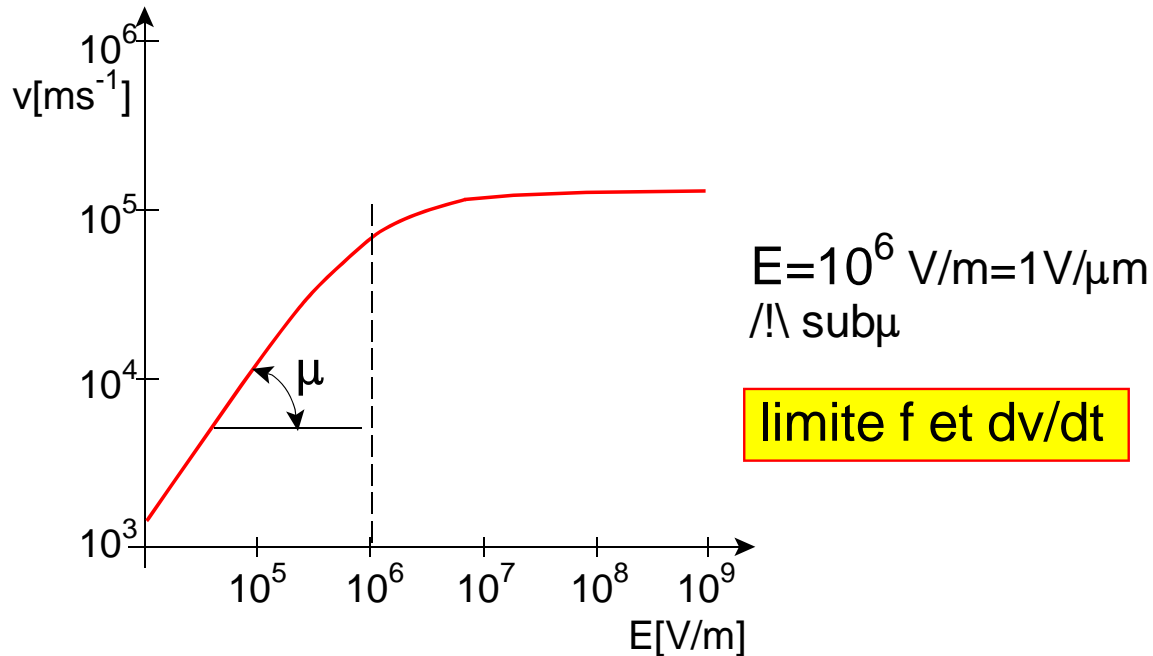
- pour les électrons $v_{Dn} = -\mu_n E$ vitesse de dérive dans la bande de conduction
- pour les trous $v_{Dp} = +\mu_p E$ vitesse de dérive dans la bande de valence

Les deux mobilités ne sont pas identiques car elles correspondent physiquement à des déplacements d'électrons qui ne sont pas dans la même bande d'énergie. La mobilité des électrons est environ 3 fois plus élevée que celle des trous.

Le mouvement de ces charges correspond à un **courant électrique macroscopique** que nous allons calculer.

Conductivité du Si

la mobilité sature pour E élevé



La notion de mobilité n'a de sens qu'en dessous d'un seuil de champ électrique. Au-delà de ce seuil, les interactions entre les charges mobiles et le réseau cristallin (substrat et dopants) engendrent une diffusion particulière liée à des excitations de résonances mécaniques absorbant des quanta d'énergie mécanique (*optical phonon scattering*).

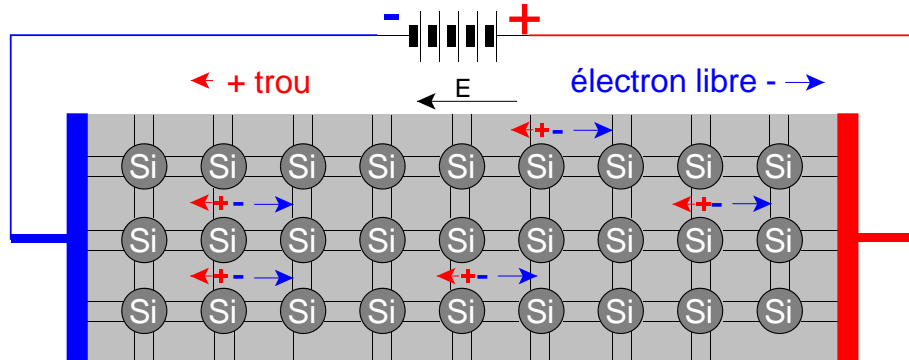
La saturation de la mobilité est un phénomène qui est **plafonne les performances** des transistors au niveau **vitesse** de commutation (circuits logiques) et **fréquence** (circuits HF) et qui est plus d'autant plus sensible que l'on miniaturise les transistors.

On voit que cet effet est sensible pour un champ E supérieur à 10^6 V/m . Une telle valeur est aisément atteinte dans les technologies actuelles largement **submicroniques** (*deep submicron*) où les longueurs peuvent descendre largement sous les 100nm pour des tensions de l'ordre du Volt.

Les technologies largement submicroniques seront vues au cours de micro-électronique.

Conductivité du Si

la conductivité est proportionnelle aux mobilités



$$\vec{v}_{Dp} = \mu_p \cdot \vec{E} \Rightarrow \vec{J}_p = e \cdot p \cdot \vec{v}_{Dp} = e \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{E} \quad [\text{Am}^{-2}]$$

$$\vec{v}_{Dn} = -\mu_n \cdot \vec{E} \Rightarrow \vec{J}_n = -e \cdot n \cdot \vec{v}_{Dn} = -e \cdot n \cdot (-\mu_n \cdot \vec{E}) = e \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E}$$

$$\vec{J}_T = \vec{J}_n + \vec{J}_p = e \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n) \cdot \vec{E} = \sigma \vec{E}$$

$$\sigma = e \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n) \quad [\Omega^{-1} \text{m}^{-1}]$$

Si intrinsèque $\mu_n = 3 \cdot \mu_p \Rightarrow J_n = 3 \cdot J_p$
 $p = n = n_i \Rightarrow \sigma = e \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p)$

La figure ci-dessus représente un barreau de Si relié à une source de tension continue, qui engendre un champ électrique $E = -\text{grad}V$, dirigé par conséquent dans le sens du potentiel décroissant.

Pour éviter de faire intervenir les dimensions du barreau, nous allons considérer une section unitaire et calculer les courants par unité de surface, c'est-à-dire les densités de courant. La présence de deux types de porteurs de charges engendre 2 densités de courant :

- J_p courant de trous se déplaçant dans le sens du champ (ils sont attirés par le pôle négatif de la source)
- J_n courant d'électrons se déplaçant en sens opposé du champ (ils sont attirés par le pôle positif de la source)

Par convention, le **sens positif du courant électrique est celui du déplacement des trous**. Remarquons que, les trous et les électrons transportant des charges de signe opposé en direction opposée, engendrent des courants de même signe qui s'additionnent par conséquent pour former le courant total J_T .

Prenons un élément de volume de surface ΔS et de longueur $\Delta L = v_{Dp} \cdot \Delta t$; il contient, par définition de la densité

- une quantité de trous	$P = p \cdot \Delta S \cdot \Delta L$
- une charge	$\Delta Q = e \cdot P = e \cdot p \cdot \Delta S \cdot \Delta L \quad [\text{C}]$
- un courant (débit de trous)	$I_p = \Delta Q / \Delta t = e \cdot p \cdot \Delta S \cdot \Delta L / \Delta t = e \cdot p \cdot \Delta S \cdot v_{Dp} \quad [\text{A}]$
- une densité de courant	$J_p = I_p / \Delta S = e \cdot p \cdot v_{Dp} = e \cdot p \cdot \mu_p \cdot E \quad [\text{Am}^{-2}]$

On trouve de même $J_n = e \cdot p \cdot v_{Dn} = e \cdot p \cdot \mu_n \cdot E \quad [\text{Am}^{-2}]$

Et le courant total est donné par $J_T = J_p + J_n = e \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n) \cdot E = \sigma \cdot E \quad [\text{Am}^{-2}]$

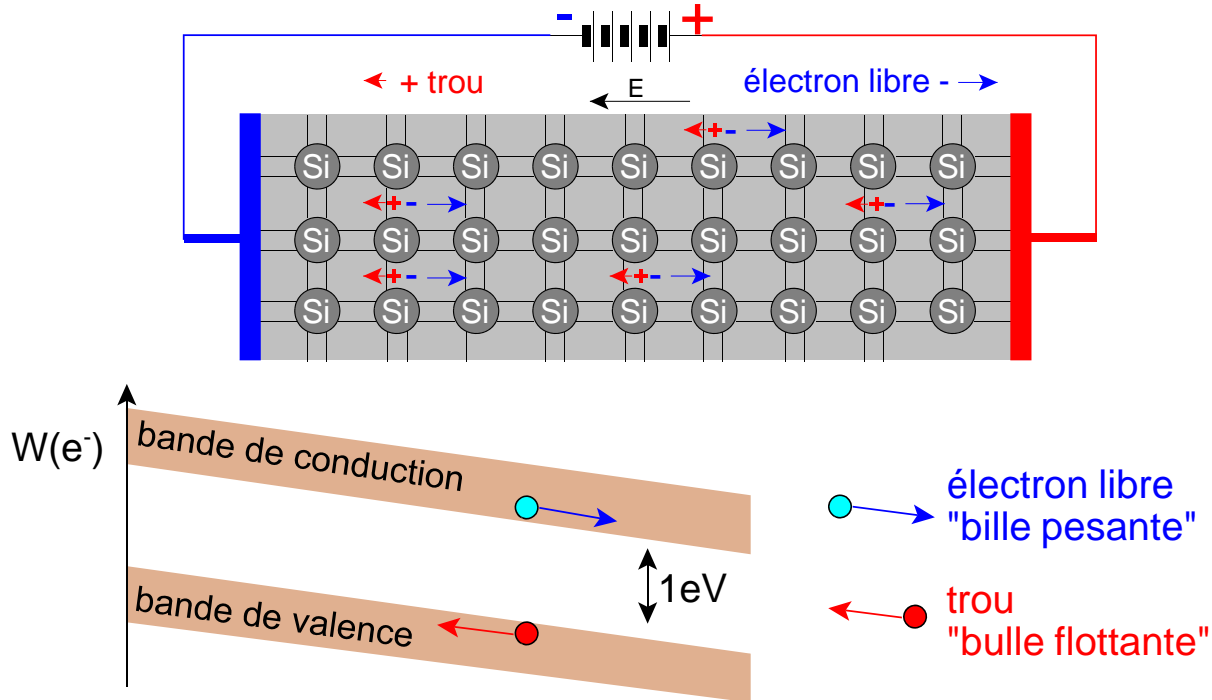
La conductivité $\sigma \quad [\Omega^{-1} \text{m}^{-1}]$ est définie comme le quotient de la densité de courant macroscopique par le champ électrique qui a créé ce courant.

On voit ici que la conductivité est proportionnelle à la somme des densités des charges mobiles pondérées par leur mobilité.

Dans le Silicium intrinsèque, $p=n$ et $\mu_n \approx 3\mu_p$ donc les **électrons contribuent pour 3/4 au courant total**.

Conductivité du Si

E incline les bandes d'énergie



Reprenons notre diagramme avec les bandes d'énergie des électrons. L'ordonnée W va dans le sens de l'énergie croissante pour les électrons.

La présence du champ électrique incline les bandes d'énergie sur la longueur du semi-conducteur. En effet, les électrons sont attirés par le pôle positif de la source de tension, ce qui doit se traduire par une tendance à aller vers un niveau d'énergie potentielle plus bas ; les bandes d'énergie des électrons s'abaissent donc du côté du pôle positif. Par analogie avec un champ de pesanteur, on peut voir les **électrons libres** comme des "**billes pesantes**" qui dévalent la bande de conduction.

Les trous ont évidemment tendance à se déplacer dans l'autre direction et leur énergie potentielle décroît vers le pôle négatif de la source. Il faudrait dès lors tracer un autre graphique d'énergie pour les trous en inversant l'ordonnée. On préfère garder le même diagramme et imaginer les **trous** comme des "**bulles**" ayant tendance à "flotter" dans la bande de valence.

Conductivité du Si

conclusions : ohmique ($J \propto V$) et faible

- ▶ la température engendre une densité d'équilibre de paires électron-trou donnée par

$$p=n=n_i(T)$$

$$pn = \frac{G}{R} = n_i^2(T) \propto T^3 e^{-\frac{W_G}{kT}}$$

- ▶ par agitation thermique, les porteurs se répartissent de manière uniforme dans tout le cristal (cf molécules d'un gaz)
- ▶ **la loi d'Ohm s'applique aux semi-conducteurs**

$$\vec{J}_T = \vec{J}_n + \vec{J}_p = e \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n) \cdot \vec{E} = \sigma \vec{E} \quad \sigma = e \cdot (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n) \text{ [}\Omega^{-1} \text{m}^{-1}\text{]}$$

- ▶ **σ est faible** car seulement 1 atome sur 10^{12} fournit en moyenne une paire électron-trou

On peut maintenant tirer les conclusions sur la conductivité du Silicium intrinsèque, c'est-à-dire pur.

- la température engendre des **créations** continues de **paires électron-trou**, ainsi que des **recombinaisons** continues
- il existe **un état d'équilibre** entre créations et recombinaisons qui engendre des densités non nulles de trous et d'électrons notées p et n
- pour des raisons d'électro-neutralité globale et locale, ces densités sont égales $p = n$
la valeur $p = n = n_i$ est appelée **densité intrinsèque**
- le produit $pn=n_i^2$ ne dépend que de la température, mais très fortement
- la **conductivité est médiocre** aux températures usuelles car seulement un atome sur mille milliards fournit une paire électron-trou
- l'agitation thermique très rapide et aléatoire des porteurs de charge répartit ces porteurs de manière uniforme dans tout le cristal, comme les molécules d'un gaz
- **la loi d'Ohm s'applique aux semi-conducteurs** ; les collisions des porteurs de charge au sein du cristal limitent leur vitesse moyenne et déterminent ainsi la conductivité ; sans ces collisions, le champ électrique accélérerait continuellement ces porteurs et la loi d'Ohm ne serait plus vérifiée

Physique du semi-conducteur

PLAN

- ▶ conducteurs, semi-conducteurs et isolants
- ▶ le silicium intrinsèque
- ▶ **le silicium dopé**
 - ◆ **notion de dopage**
 - ◆ **atomes donneurs et accepteurs**
 - ◆ **changement des densités de charges dû au dopage**
 - ◆ **électro-neutralité**
 - ◆ **conductivité**

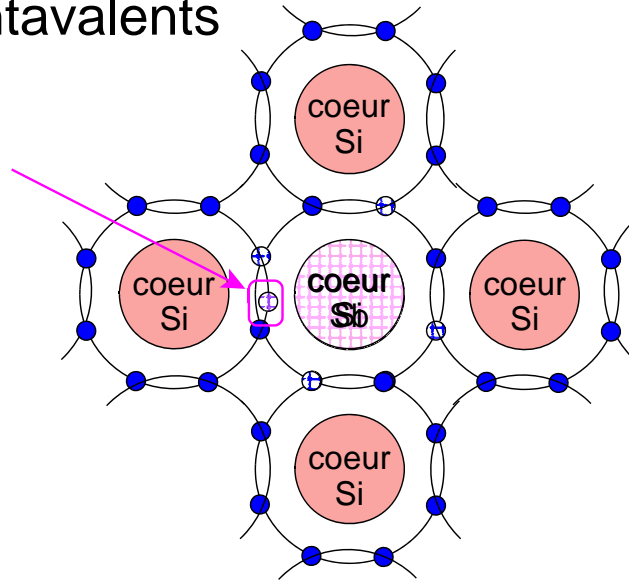
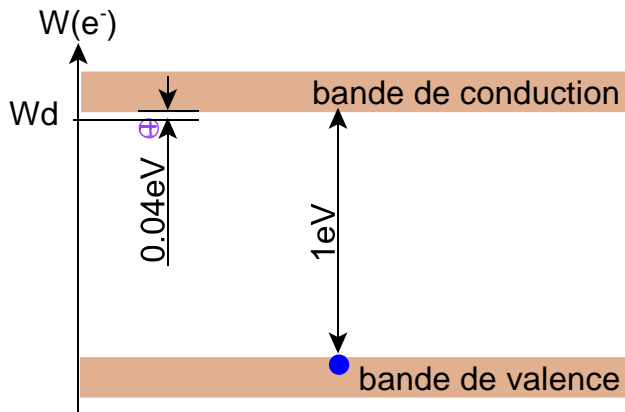
Notion de dopage

- ▶ doper = modifier considérablement les propriétés par une faible dose d'un "dopant"
- ▶ semi-conducteur **intrinsèque** : propriétés dépendant uniquement de ses caractéristiques propres
- ▶ semi-conducteur **extrinsèque** : propriétés dépendant quasi-uniquement de la présence du dopant

Dopage

(1) par un donneur d'électron pentavalent => e libre

- ▶ adjonction d'atomes pentavalents
 - ◆ P, As, Sb
- ▶ électron excédentaire



! Sb devient un ion Sb⁺

L'introduction au sein du cristal de Silicium d'un **atome pentavalent** (phosphore, arsenic ou antimoine) laisse à cet atome un électron de valence qui ne participe pas aux liaisons covalentes.

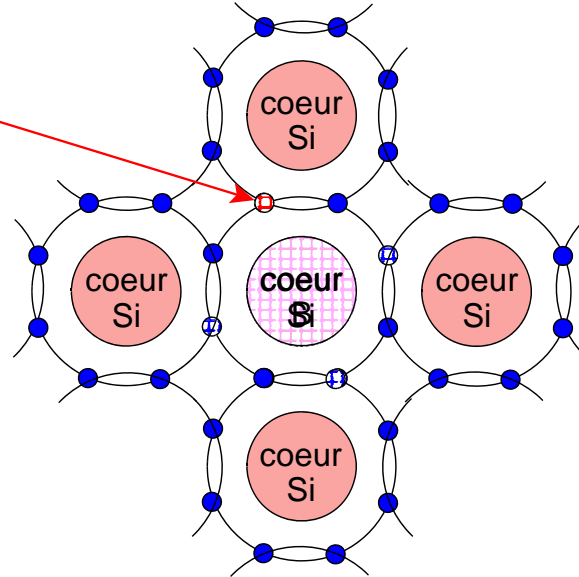
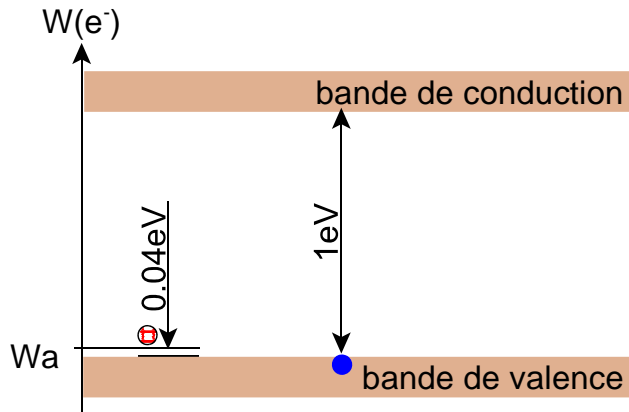
C'est **quasiment un électron libre**, car son niveau énergétique W_d est 25 fois plus proche de la bande de conduction que ne le sont les électrons de valence du Silicium. Cet électron participe donc facilement à la conduction.

L'**atome** étranger pentavalent est dit "**donneur**" (sous-entendu d'électrons libres) il **devient un ion positif fixe** car sa bande de valence est complète et donc aucun trou n'est créé (contrairement aux atomes de Silicium du réseau cristallin porteur).

Dopage

(2) par un accepteur d'électron = donneur de trou libre

- ▶ adjonction d'impuretés trivalentes
 - ◆ Al, B, Ga
- ▶ trou excédentaire



L'introduction au sein du cristal de Silicium d'un atome **trivalent** (Aluminium, Bore ou Gallium) laisse une **liaison covalente incomplète**, comme lorsqu'un trou est créé.

C'est **quasiment un trou**, car son niveau énergétique est W_a très proche de la bande de valence et il peut donc facilement être comblé par un électron de valence ce qui équivaut, comme on l'a déjà vu, au déplacement du trou. Ce "quasi-trou" participe donc facilement à la conduction.

L'**atome étranger** est dit "**accepteur**" ou "receveur" (sous-entendu d'électrons de valence), il devient alors un **ion négatif fixe**.

Dopage par atomes donneurs

le nombre d'électrons augmente

Soit un cristal de silicium à 300⁰K et de densité atomique
 $N_{Si} = 5 \text{ E}+28 \quad [\text{m}^{-3}]$

Dopons le par des donneurs à raison de **1 atome donneur par 50 millions !!**

$$N_d = 1 \text{ E}+21 \quad [\text{m}^{-3}]$$

Chaque donneur fournit un électron libre => **la densité d'électrons libres croît considérablement et ne dépend plus que de la densité des donneurs**

$$n = n_i + N_d = (6.8\text{E}+16) + (1\text{E}+21) \approx 1\text{E}+21 \quad [\text{m}^{-3}]$$

1ère approximation : encore moins en réalité

La proportion d'atomes de silicium qui fournissent un électron libre est tellement minime que l'apport d'un très faible nombre de donneurs va faire croître de manière spectaculaire la densité d'électrons : c'est le **dopage**. En **première approximation**, chaque atome donneur fournit un électron, donc la densité intrinsèque d'électrons libres n_i se voit augmentée de la densité de donneurs N_d .

Dopage par atomes donneurs

le nombre de trous diminue

La relation d'équilibre est toujours valable:

$$pn = n_i^2 = 4.6E+33 \quad [m^{-6}]$$

Or on vient de voir que n vient surtout des donneurs

$$n = N_d = 1E+21 \quad [m^{-3}]$$

Donc la densité de trous devient :

$$p = n_i^2 / N_d = 4.6E+33 / 1E+21 = 4.6E+12 \quad [m^{-3}]$$

	$n [m^{-3}]$	$p [m^{-3}]$
avant dopage	6.8E+16	6.8E+16
après dopage	1.0E+21	4.6E+12

La réalité est légèrement différente; la présence massive (du moins par rapport aux charges intrinsèques) des électrons venant des donneurs bouleverse l'ensemble de la population de charges :

- la loi d'équilibre $pn=n_i^2(T)$ entraîne une diminution de la densité de trous d'origine thermique; p devient largement inférieur à n_i .
- ceci renforce le caractère majoritaire des électrons

On trouvera aux pages 55 et 56 un tableau des densités de porteurs dans le silicium avec et sans dopage.

Dopage par donneurs

conclusions

- ▶ le dopage par une faible quantité de donneurs modifie radicalement la composition des porteurs mobiles
 - ◆ la densité d'électrons devient celle des donneurs et croît dans une proportion importante ($\times 10^4$ ou plus)
 - ◆ la densité de trous baisse dans la même proportion
- ▶ les **électrons** sont devenus **majoritaires**
- ▶ les **trous** sont devenus **minoritaires**
- ▶ le **crystal** est devenu **extrinsèque**
- ▶ on parle de **semi-conducteur de type n**

Dopage par accepteurs

conclusions

- ▶ le dopage par une faible quantité d'accepteurs modifie radicalement la composition des porteurs mobiles
 - ◆ la densité de trous devient celle des accepteurs et croît dans une proportion importante ($\times 10^4$ ou plus)
 - ◆ la densité d'électrons baisse dans la même proportion
- ▶ les **trous** sont devenus **majoritaires**
- ▶ les **électrons** sont devenus **minoritaires**
- ▶ le **crystal** est devenu **extrinsèque**
- ▶ on parle de **semi-conducteur de type p**

un semi-conducteur extrinsèque ...

... est limité en Température

▶ au-delà d'une certaine T^0 ($\approx 200^\circ\text{C}$)

- ◆ n_i devient $> N_a$ ou N_d
- ◆ le Si redevient intrinsèque, il n'y a plus de type p ou n
- ◆ toutes les propriétés acquises par le dopage sont perdues !

$$pn = n_i^2(T) \propto T^3 e^{-\frac{W_G}{kT}}$$

▶ à température trop basse p et n sont trop faibles

▶ gammes usuelles des composants

- ◆ standard : 0 à 70°C
- ◆ industrielle : -40°C à 85°C
- ◆ militaire, spatiale : -55°C à 125°C

La notion de semi-conducteur extrinsèque n'a des sens que dans une gamme de température limitée, à cause de la loi $n_i^2(T)$.

A trop basse température, le nombre de porteurs mobiles est insuffisant pour rendre le semi-conducteur utilisable.

A **trop haute température**, le nombre de porteurs thermiques devient tellement élevé qu'il dépasse celui des porteurs provenant du dopage ; dès lors **le semi-conducteur redevient intrinsèque**, c'est à dire que ses propriétés électriques ne dépendent plus du dopage et la notion de type p ou n disparaît. Comme tous les composants électroniques résultent de la juxtaposition de couches de type p et n, ils finissent par perdre leurs propriétés quand leur température devient excessive et les montages cessent de fonctionner.

La figure donne les trois gammes de température du marché de l'électronique.

- la **gamme standard** convient pour des applications domestiques, bureautiques ou les laboratoires, où la température ambiante est généralement régulée à cause de la présence humaine.
- la **gamme industrielle** tient compte d'application dans des conditions plus sévères (équipement extérieur soumis au soleil et au gel, conditions tropicales ou sibériennes)
- la **gamme militaire**, également utilisée dans le domaine **spatial**, est celle des conditions extrêmes.

Le respect de ces gammes de température peut le cas échéant imposer un chauffage ou une réfrigération auxiliaire au niveau des composants et/ou des équipements, thème qui sera abordé au cours d'électronique de puissance.

Enfin on voit que les composants dont la base n'est pas le Silicium comme le GaN et le SiC résistent mieux à la température parce que leur gap W_G est plus élevé.

un semi-conducteur extrinsèque ...

... reste globalement neutre

- ▶ soit, dans un volume donné
 - ◆ N le nbre d'électrons libres
 - ◆ P le nombre de trous
- ▶ principe d'électro-neutralité globale
 - ◆ le cristal est neutre au départ
 - ◆ les atomes dopants sont neutres
 - ◆ la création de paires électron-trou ne crée pas de charges => $P=N$
 - ◆ lorsqu'un atome **donneur** (**accepteur**) perd son électron libre (trou) il devient une **charge positive** (**négative**) fixe

un semi-conducteur extrinsèque ...

...reste localement neutre

- ▶ soit, dans un élément de volume arbitrairement petit
 - ♦ des charges positives
 - trous mobiles de concentration p [m^{-3}]
 - atomes donneurs fixes ionisés de concentration N_d [m^{-3}]
 - ♦ des charges négatives
 - électrons mobiles de concentration n [m^{-3}]
 - atomes accepteurs fixes ionisés de concentration N_a [m^{-3}]
 - ♦ densité de charges $\rho = e (p + N_d - n - N_a)$
- ▶ principe d'électro-neutralité locale
 - ♦ si on suppose un déséquilibre ($\rho \neq 0$)
 - $\text{div}E = \rho/\epsilon$ apparition d'un champ $E \gg$
 - E déplace rapidement les charges mobiles (10^{-12}s) et rétablit $\rho = 0$

Tout élément de volume **comportant des charges mobiles** est électriquement neutre $p + N_d = n + N_a$
type N $\Rightarrow n = p + N_d$ type P $\Rightarrow p = n + N_a$

Le principe d'**électro-neutralité locale**, vu pour le semi-conducteur intrinsèque, se généralise ici au cas extrinsèque.

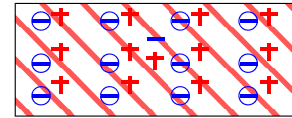
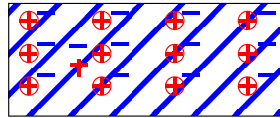
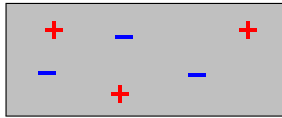
La seule différence est la composition des charges en présence, avec l'apparition des **charges fixes que sont les ions issus du dopage**. En effet, on considère que tous les atomes dopants ont perdu leur charge mobile et qu'ils constituent donc des ions fixes.

La présence de charges mobiles assure l'électro-neutralité. Tout déséquilibre est compensé très rapidement par le déplacement de ces charges mobiles.

Semi-conducteur intrinsèque et extrinsèque

tableau résumé

	intrinsèque		extrinsèque de type n		extrinsèque de type p	
	type	conc	type	conc	type	conc
dopant	-----	-----	donneurs	N_d	accepteurs	N_a
charges mob+	trous	$p=n_i$	trous(min)	$p=n_i^2/n=\zeta$	trous(maj)	$p=N_a+\zeta$
charges mob-	électrons	$n=n_i$	élect(maj)	$n=N_d+\zeta$	élect(min)	$n=n_i^2/p=\zeta$
charges fixes	-----	-----	ions \oplus	N_d	ions \ominus	N_a
charges +	trous	$p=n_i$	ions \oplus & trous	$N_d+\zeta$	trous	$N_a+\zeta$
charges -	électrons	$n=n_i$	électrons	$N_d+\zeta$	ions \ominus &élect	$N_a+\zeta$



\oplus donneurs ayant donné un électron = ions $^+$ fixes

\ominus accepteurs ayant accepté un électron (=donné un trou) = ions $^-$ fixes

+ trous mobiles des accepteurs + ζ trous thermiques du Si

- électrons mobiles des donneurs + ζ électrons thermiques du Si

Ce tableau reprend le détail de tous les types de charges, fixes et mobiles pour le silicium intrinsèque et le silicium dopé.

Prenons l'exemple du dopage par donneur avec une densité N_d :

Si chaque donneur fournit 1 électron libre et 1 ion positif fixe, une première itération donne :

- $n = N_d$; c'est également la densité des ions positifs fixes
- $p = n_i^2/n = \zeta$

Une deuxième itération est nécessaire pour assurer l'électro-neutralité des charges mobiles

- $n = N_d + \zeta$

En toute rigueur, il faudrait recalculer p sur base de la nouvelle densité n, mais la correction est très minime.

On obtient donc un bilan électriquement neutre des charges:

- positives : N_d ions positifs et ζ trous
- négatives : $(N_d + \zeta)$ électrons