

CHAPITRE 1: THEORIE GENERALE DES SEMI-CONDUCTEURS

1) RAPPELS SUR LA STRUCTURE DE LA MATIERE

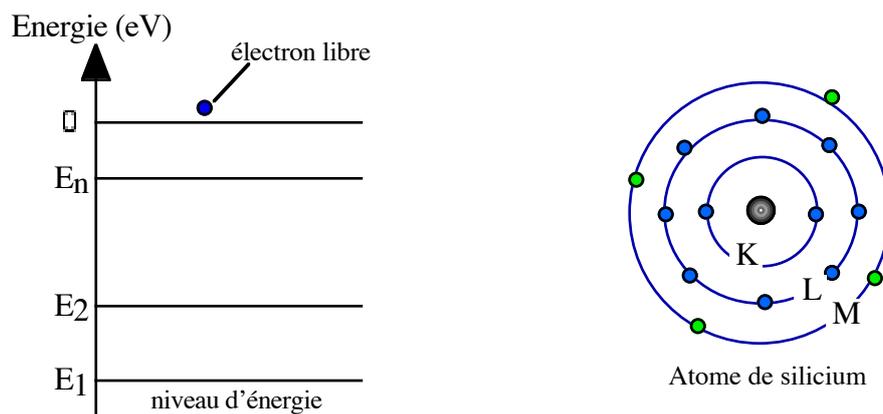
1.1 Structure de l'atome

L'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons de charge électrique q négative ($- 1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb). Le noyau contient deux types de particules :

- Les neutrons qui ne sont pas chargés
- Les protons qui portent une charge électrique $+ q$.

L'atome étant électriquement neutre, le nombre de protons est égal au nombre d'électrons.

Les électrons d'un atome gravitant autour du noyau sont assujettis à occuper des niveaux d'énergie discrets $E_1, E_2 \dots E_n$, définissant chacun une couche électronique. Plus le niveau est élevé, plus la couche qui lui correspond est éloignée du noyau. Si l'on choisit comme origine énergétique ($E = 0$ eV) celle d'un électron soustrait à l'influence du noyau (c'est-à-dire porté à une distance infinie), toutes les valeurs des niveaux d'énergies E_n sont négatives (1 eV représente $1.6 \cdot 10^{-19}$ Joule). Cela se traduit par le fait qu'il faut produire un travail pour éloigner un électron.



On distingue :

- Les électrons internes qui occupent les premières couches. Ils sont alors très fortement liés au noyau
- Les **électrons** de valence (ou périphériques) qui occupent la couche la plus externe. Ces électrons de valence sont **peu liés au noyau**.

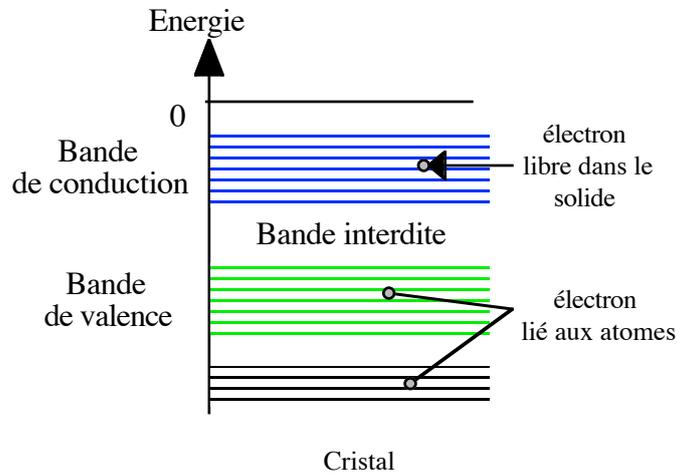
Considérons un atome de silicium qui possède 14 électrons ($Z = 14$). Ces électrons sont répartis sur trois couches électroniques :

- K (2 électrons)
- L (8 électrons)
- M (4 électrons)

Contrairement aux deux premières, la dernière couche (M) est incomplète, elle peut accueillir 4 électrons supplémentaires. **En effet, Il faut savoir que tous les atomes tendent à avoir huit électrons sur leur couche périphérique.**

1.2 Structure d'un cristal

Un cristal est constitué d'un ensemble d'atomes dont les noyaux sont répartis dans l'espace de façon régulière. La cohésion des atomes est assurée par la mise en commun des électrons de valence pour former des liaisons dites de covalence



Les états énergétiques possibles des électrons du cristal sont représentés par un diagramme analogue à celui de l'atome. Mais du fait de l'interaction des atomes entre eux, les niveaux d'énergie se transforment en bandes d'énergie séparées par des bandes interdites (où il n'y a pas d'états permis).

Comme dans le cas de l'atome, le nombre d'électrons susceptibles d'occuper une bande d'énergie est limité et les électrons du solide combleront en priorité les états d'énergie les plus faibles.

Un électron dont l'énergie est située dans une bande en dessous de la bande de valence est lié à un atome donné du solide. Par contre, un électron de la bande de valence est commun à plusieurs atomes. La bande située au-dessus de la bande interdite s'appelle la bande de conduction.

L'électron dont l'énergie se situe dans la bande de conduction circule librement dans le solide. C'est un porteur de charge qui participe à l'écoulement du courant dans le solide lorsque ce dernier est soumis à une différence de potentiel (qui produit un champ électrique).

Chaque type de matériau présente une hauteur de bande interdite qui lui est propre, cette différence d'énergie, qui joue un rôle fondamental, permet de distinguer les matériaux isolants, semi-conducteurs et conducteurs.

2) SEMI-CONDUCTEUR PUR OU INTRINSEQUE

L'industrie fabrique les semi-conducteurs avec un haut degré de pureté (moins de 1 atome étranger pour 10^{11} atomes de semi-conducteur) : on parle alors de semi-conducteur intrinsèque. Par exemple, l'atome de silicium possède 4 électrons sur sa couche périphérique car il appartient à la 4^e colonne de la classification périodique des éléments indiquée ci-dessous.

| II | III | IV | V |
|-------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Bore B (Z=5) | Carbone C (Z=6) | Azote N (Z=7) |
| | Aluminium Al (Z=13) | Silicium Si (Z=14) | Phosphore P (Z=15) |
| Zinc Zn (Z=30) | Gallium Ga (Z=31) | Germanium Ge (Z=32) | Arsenic As (Z=33) |
| Cadmium Ca (Z=48) | Indium In (Z=49) | Étain Sn (Z=50) | Antimoine Sb (Z=51) |

SILICIUM

14 électrons

4 électrons de valence

$5 \cdot 10^{22}$ atomes cm^{-3}

densité : 2.33g cm^{-3}

2.1 Silicium non excité à $T = 0^\circ\text{K}$

Considérons un cristal de silicium pur, non excité, au zéro absolu (0°K) et dans l'obscurité. Afin de voir huit électrons sur sa couche externe, chaque atome de silicium met ses 4 électrons périphériques en commun avec les atomes voisins. On obtient ainsi, pour le cristal de silicium la représentation de la figure 1.

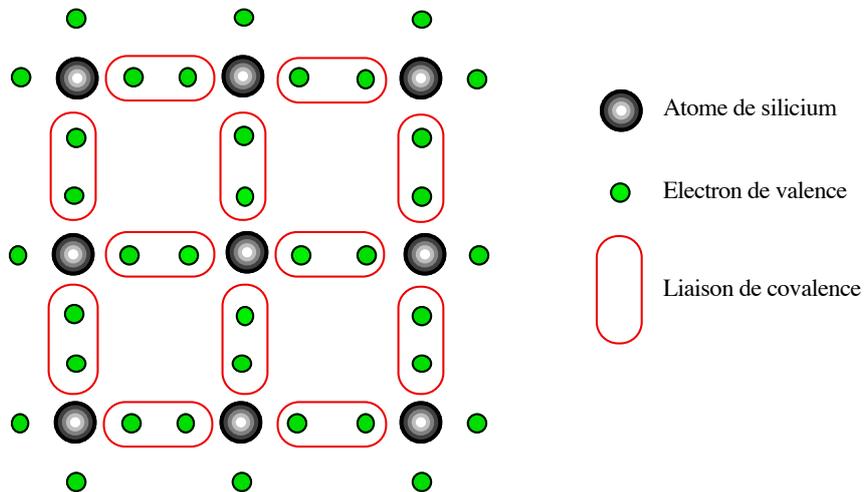


Figure 1 : Cristal de silicium à 0°K

La mise en commun des électrons périphériques, appelée liaison de covalence, assure la cohésion du cristal de silicium. Les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium. Il n'apparaît donc aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique. Le silicium est alors un isolant, en effet sa bande de valence est saturée (toutes les places sont occupées). Sa bande de conduction (qui offre cependant des places libres) est alors vide.

2.2) Ionisation thermique : génération de paires électrons trous

Lorsque la température augmente, l'agitation thermique désordonne la configuration figée précédente (0°K). En effet, les électrons qui possèdent une énergie positive supplémentaire, provoque la rupture de quelques liaisons de covalences.

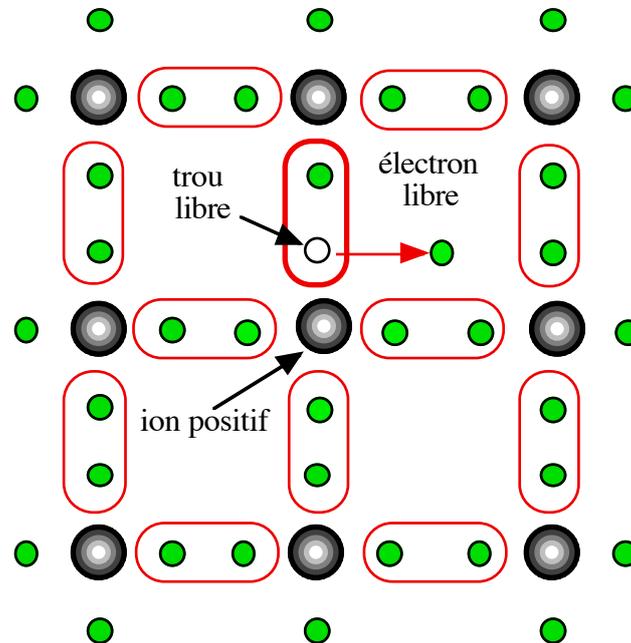


Figure 2 : Création d'une paire électron trou par rupture d'une liaison de covalence sous l'effet de la température

Supposons qu'un des électrons participant à une liaison de covalence acquière une énergie suffisante pour quitter l'atome auquel il était lié (figure 2). Il devient alors un porteur libre, capable de se déplacer dans le cristal, autorisant ainsi la circulation d'un courant électrique sous une différence de potentiel. **Le cristal devient alors un mauvais isolant d'où son appellation de semi-conducteur.**

Conséquences :

- La place vacante laissée par l'électron qui a quitté la bande de valence est devenue un trou.
- L'atome de silicium qui a perdu un électron n'est plus alors électriquement neutre : il est devenu un ion positif.

Remarque : ce phénomène d'ionisation thermique n'intéresse qu'un nombre très faible d'atomes de silicium (3 sur 10^{13} à la température de 300 °K).

2.3) Hauteur de bande interdite et génération de paires électrons trous

Le paramètre essentiel qui caractérise le semi-conducteur est la quantité d'énergie minimale nécessaire pour briser une liaison de covalence, ce qui revient dans le modèle des « bandes d'énergie » à faire « grimper » un électron de l'un des niveaux de la bande de valence sur l'un des niveaux de la bande de conduction (figure 3 situation 1).

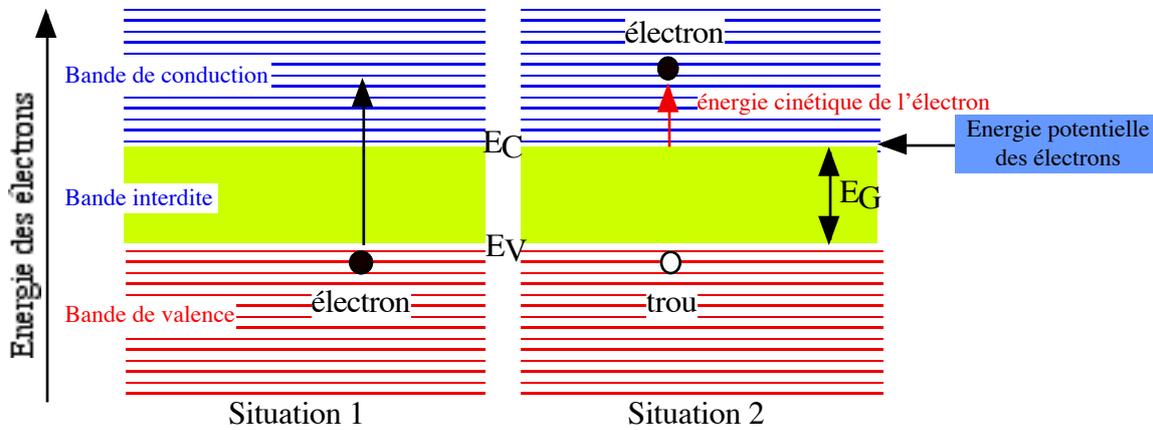


Figure 3 : Génération d'une paire électron trou.

Ainsi l'énergie minimale requise pour générer une **paire électron-trou** correspond à la **hauteur de bande interdite E_G** dont la valeur est indiquée dans le tableau suivant pour divers matériaux :

| Semi-conducteur | E_G (eV) 300 °K | E_G (eV) 0°K |
|-----------------|-------------------|----------------|
| C diamant | 5,47 | 5,51 |
| G_e | 0,66 | 0,75 |
| S_i | 1,12 | 1,16 |

A une température différente du zéro absolu, un certain nombre d'électrons de valence acquiert assez d'énergie thermique pour rompre leurs liaisons et devenir des électrons libres. Ce gain d'énergie, qui doit être au moins égal à E_G , fait accéder les électrons à des places libres de la bande de conduction.

Corrélativement, ils laissent derrière eux des places disponibles vides (trous) dans la bande de valence (figure 3 situation 2).

La hauteur considérable de bande interdite du diamant (5.47 eV) en fait un parfait isolant. En effet même aux températures élevées, il est impossible de faire passer des électrons de la bande de valence à la bande de conduction. L'oxyde de silicium S_iO_2 matériau important pour la fabrication des circuits intégrés, avec une bande interdite de 9 eV, est lui aussi un isolant.

Remarque : les conducteurs métalliques ont une structure cristalline et à ce titre on leur associe un schéma de bandes. Celui-ci présente cependant une configuration particulière telle qu'à toutes les températures, il existe des électrons libres disponibles (environ 10^{23} cm^{-3}). En effet, soit la bande de conduction dispose toujours de places libres, soit il existe un chevauchement entre bandes de valence et de conduction supprimant alors la bande interdite.

2.4) Phénomène de recombinaisons des électrons libres

L'ionisation thermique devrait conduire à l'ionisation de tous les atomes de silicium à savoir : 5.10^{22} atomes par cm^3 . En fait, elle est compensée par un autre phénomène : les recombinaisons d'électrons libres.

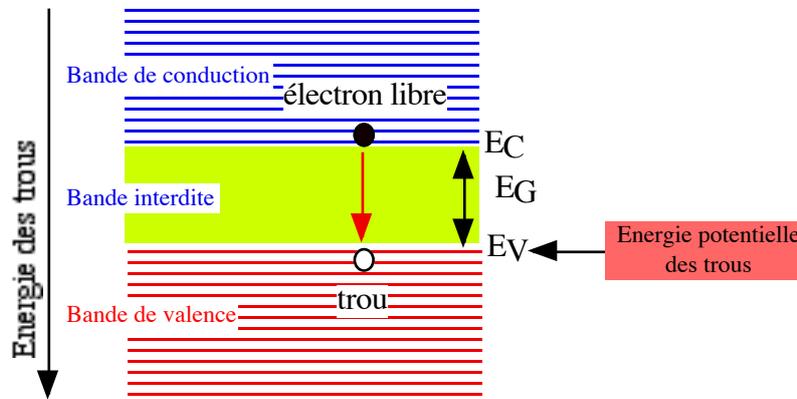


Figure 4 : Recombinaison d'une paire électron trou.

En effet, un électron libre, arrivant, lors de son déplacement dans le cristal, à proximité d'un ion positif peut être "capturé" par ce dernier afin de satisfaire sa liaison de covalence (trou libre). La liaison de covalence est alors rétablie. Dans le modèle des bandes (figure 4) un électron de la bande de conduction libère sa place et vient occuper une place libre dans la bande de valence, neutralisant alors un trou.

Lorsque l'électron descend de la bande de conduction vers la bande de valence, le semi-conducteur restitue l'énergie sous forme de chaleur ou émet de la lumière (photon). Ce dernier effet est utilisé dans les diodes électroluminescentes (L.E.D.) ou les lasers semi-conducteurs. Le photon émis a une énergie égale à E_G selon :

$$\lambda \cdot E_G = h \cdot c$$

- λ longueur d'onde
- h constante de Planck
- c vitesse de la lumière

soit : $\lambda(\mu\text{m}) \cdot E_G(\text{eV}) = 1.24$.

En sens inverse, un photon qui possède une énergie supérieure ou égale à E_G a le pouvoir de générer une paire électron trou.

2.5) Concentration intrinsèque n_i des électrons et des trous dans le silicium pur

A température constante, un équilibre s'établit entre les phénomènes d'ionisation thermique et de recombinaison, les électrons libres et les ions de silicium apparaissant en quantités égales.

Les concentrations par unité de volume (cm^3), n en électrons libres dans la bande de conduction et p en trous libres dans la bande de valence sont égales à n_i : la concentration intrinsèque. La mécanique statistique montre que la population des porteurs libres (n électrons. cm^{-3}) dans la bande de conduction et (p trous. cm^{-3}) dans la bande de valence s'exprime selon :

$$n = N_c \exp\left(-\frac{\Delta E_n}{kT}\right) \quad p = N_v \exp\left(-\frac{\Delta E_p}{kT}\right)$$

- Où N_c et N_v sont respectivement la densité effective d'états des électrons dans la bande de conduction ($2.82 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ à 300°K pour S_i) et la densité effective d'états des trous dans la bande de valence ($1.83 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ à 300°K pour S_i). Ces deux coefficients évoluent avec la température selon une loi en $T^{3/2}$.
- ΔE_c et ΔE_n représentent deux différences d'énergies liées à un niveau de Fermi E_F qui indique les écarts de population entre les électrons et les trous.
- k : constante de Boltzmann $8,6 \cdot 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$
- T : température absolue en $^\circ\text{K}$

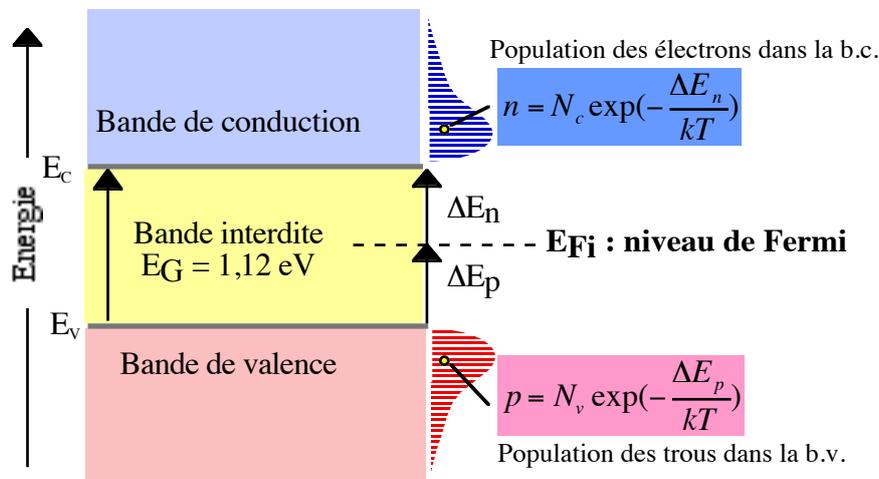


Figure 5 : Populations des électrons et des trous du silicium intrinsèque position du niveau de Fermi E_{Fi}

Pour le silicium intrinsèque à 300 K , où les populations p et n sont égales à n_i , on montre que le niveau de Fermi E_{Fi} est pratiquement situé au milieu de la bande interdite. En effet : la différence $\Delta E_n - \Delta E_p$ (11.2 meV) est négligeable devant la hauteur de bande interdite $\Delta E_p + \Delta E_n$ égale à 1.12 eV .

La concentration intrinsèque n_i en électrons libres et en trous libres dépend de la hauteur de bande interdite E_G et de la température T (figure ci-après ou A1 de l'annexe) selon la relation :

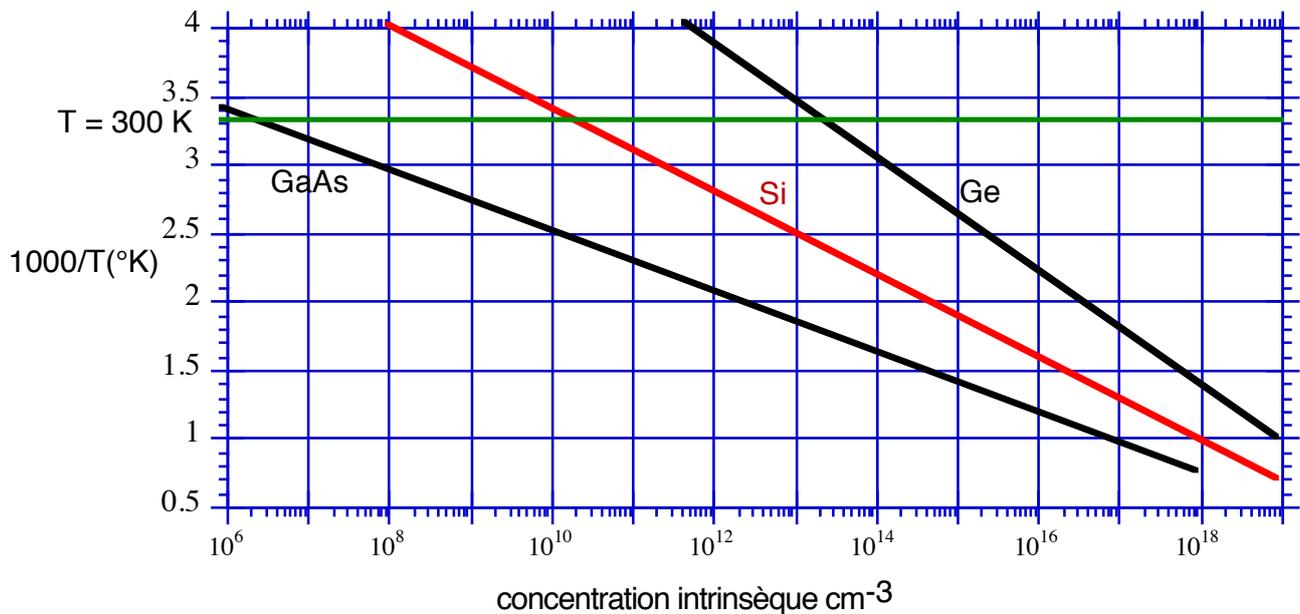
$$n = p = n_i = AT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right)$$

- A est une constante du matériau

Pour le silicium à $T=300^\circ\text{K}$ on obtient :

$$n_i(300^\circ\text{K}) = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

Le silicium intrinsèque a des applications pratiques limitées : photos résistance, thermistance. Cependant, il est possible en introduisant certaines impuretés, par la technique du dopage en quantité contrôlée, de privilégier un type de conduction : par électrons libres ou trous libres.



La concentration intrinsèque n_i (cm^{-3}) en fonction de $1000/T$ ($^\circ\text{K}$) pour trois matériaux semi-conducteurs purs : arséniure de gallium, silicium et germanium

3) SILICIUM DOPE UNIQUEMENT N

On obtient un semi-conducteur de type N en dopant le cristal de silicium avec des atomes possédant 5 électrons sur leur couche de valence. On utilise ainsi le phosphore (ou l'arsenic) appartenant à la 5^o colonne la classification périodique des éléments.

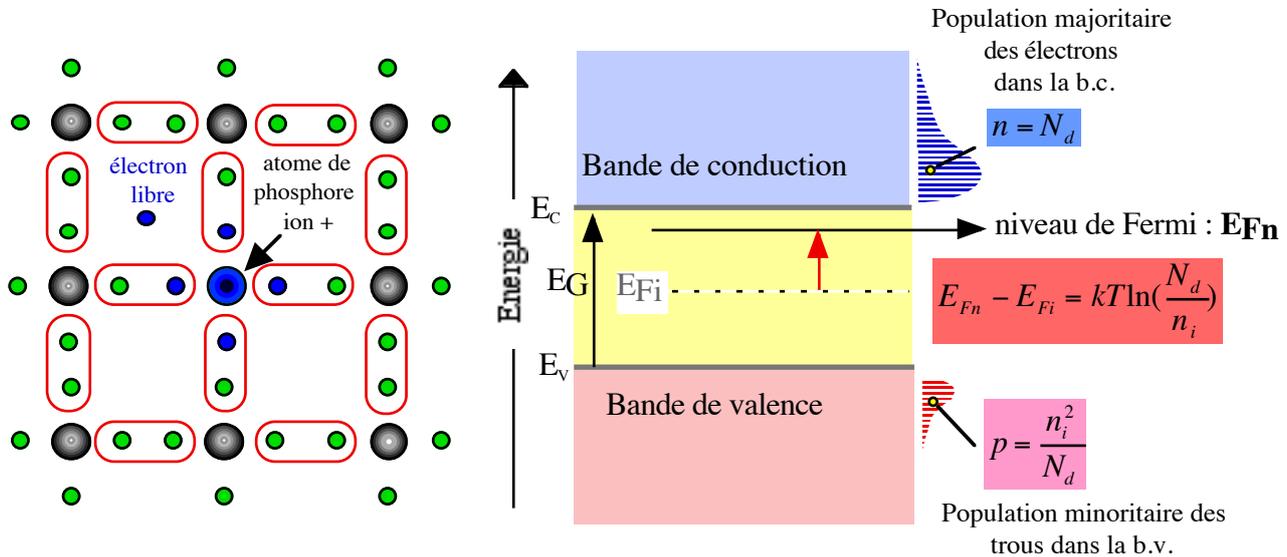


Figure 6 : Libération d'un électron par l'atome de phosphore et schéma des bandes

Quatre de ces cinq électrons de valence du phosphore sont mis en commun avec les atomes de silicium voisins pour réaliser des liaisons de covalences (figure 6 gauche). Le 5^o électron, inutilisé, est très faiblement lié à l'atome pentavalent. Une très faible énergie suffit pour le libérer et il se retrouve "libre" dans la bande de conduction. L'atome de phosphore qui a fourni un électron libre est appelé atome donneur. Il a perdu sa neutralité pour devenir un ion positif fixe.

A la température ordinaire, la quasi-totalité des atomes donneurs sont ionisés. Si N_d est la concentration des atomes donneurs, ceux-ci vont libérer une population n d'électrons libres, telle que : $n = N_d$.

Que devient alors la population de trous ? En fait, Les concentrations en électrons libres (n) et en trous libres (p) sont liées par la loi d'action de masse :

$$pn = n_i^2$$

Par exemple : Avec $N_d = n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ alors : $p = 225 \text{ cm}^{-3}$ à $T = 300 \text{ °K}$.

Les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous les porteurs minoritaires.

Dans la modélisation du schéma des bandes d'énergie (figure 6 à droite), la population des électrons libres de la bande de conduction est beaucoup plus importante que celle des trous libres dans la bande de valence. En conséquence, le niveau indicateur de Fermi E_{Fn} se déplace du milieu de la bande interdite (E_{Fi}) vers la bande de conduction de telle manière que :

$$E_{Fn} - E_{Fi} = kT \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right)$$

4) SILICIUM DOPE UNIQUEMENT P

On obtient un semi-conducteur dopé P en injectant dans le silicium des atomes de la 3^e colonne comme le **bore** (ou l'indium) qui possède **trois électrons périphériques**.

Il manque un électron à l'atome trivalent de bore pour réaliser les liaisons covalentes avec les quatre atomes de silicium qui l'entourent (figure 7 de gauche). En fait, les électrons participant aux liaisons sont indiscernables les uns des autres. Tout se passe alors comme si un des atomes de silicium voisins avait cédé un électron à l'atome trivalent de bore, créant ainsi un trou dans le cristal de silicium.

L'atome de bore qui capte un électron d'un atome de silicium voisin est appelé **atome accepteur**, il a perdu sa neutralité pour devenir un ion négatif fixe.

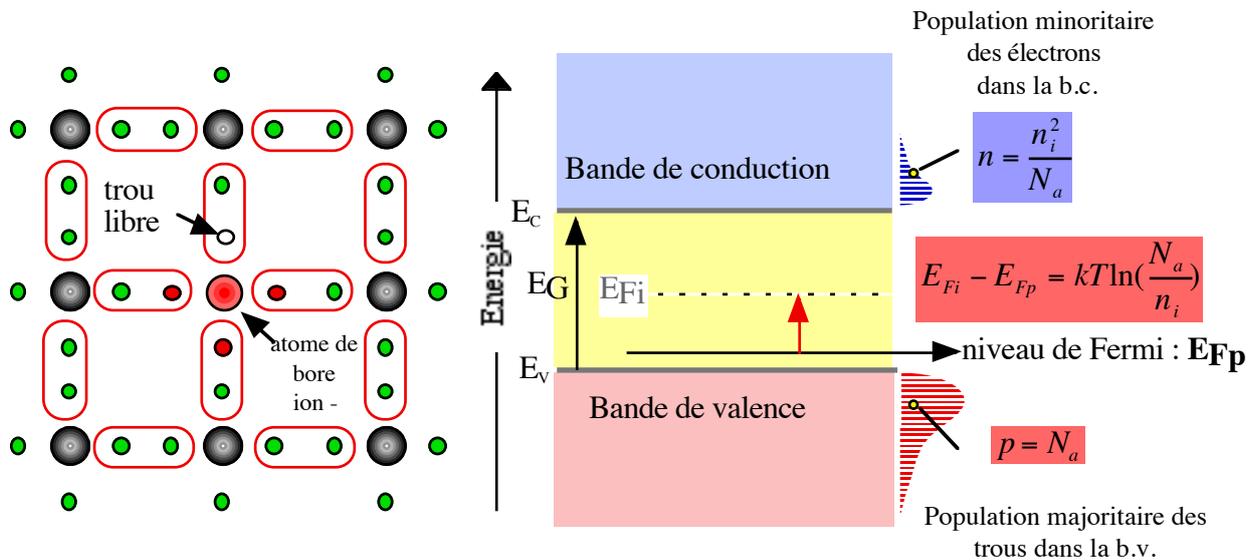


Figure 7 : Silicium dopé au bore, libération d'un trou et schéma des bandes

A la température ordinaire, la quasi-totalité des atomes accepteurs sont ionisés. Si N_a est la concentration par cm^3 des atomes accepteurs, ceux-ci vont libérer une population p de trous libres égale à la concentration N_a .

La population correspondante des électrons libres (n) est gérée à nouveau par la loi d'action de masse : $pn = n_i^2$.

Exemple : $N_a = p = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ on obtient $n = 2.10^4 \text{ cm}^{-3}$ à $T = 300\text{K}$. **Les trous sont les porteurs majoritaires et les électrons les porteurs minoritaires.**

Dans la modélisation du schéma des bandes d'énergie (figure 7), la population des électrons libres de la bande de conduction est beaucoup plus faible que celle des trous libres dans bande de valence. Le niveau indicateur de Fermi E_{Fp} se déplace du niveau intrinsèque E_{Fi} vers la bande de valence de telle manière que :

$$E_{Fi} - E_{Fp} = kT \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right)$$

5) CAS GENERAL : DOPAGES SUCCESSIFS DU SILICIUM

Le silicium lors de la fabrication de composants électroniques subi des dopages successifs. Par exemple, un premier dopage au bore a été suivi par un deuxième dopage au phosphore. Après ces deux opérations, la population en électrons libres (n) et en trous libres (p) est encore donnée par la loi d'action de masse : $pn = n_i^2$. Cependant on doit aussi tenir compte de la neutralité électrique du cristal à savoir : charges + (trous libres et ions +) = charges - (électrons libres et ions -), qui conduit à satisfaire une deuxième relation :

$$q(p + N_d) = q(n + N_a)$$

Dans ces conditions, on obtient les expressions des concentrations en porteurs libres :

$$n = \frac{(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2}}{2}$$
$$p = \frac{-(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2}}{2}$$

Conséquences :

- $N_a > N_d$ le matériau est de type P
- $N_d > N_a$ le matériau est de type N
- $N_a = N_d$ le matériau est de type intrinsèque par compensation

La situation la plus courante est celle où l'une des concentrations domine très largement l'autre :

- $N_a \gg N_d$ le matériau est de type P affirmé
- $N_d \gg N_a$ le matériau est de type N affirmé

6) PHENOMENE DE CONDUCTION DANS LES SEMI-CONDUCTEURS

6.1) Mobilité des porteurs de charge : électrons et trous

Considérons un semi-conducteur isolé. Les porteurs de charges mobiles s'y déplacent en tous sens et comme aucune direction n'est privilégiée, on n'observe aucune circulation de charges à l'échelle macroscopique.

Appliquons au semi-conducteur une différence de potentiel V . Si on se place sur un axe Ox de vecteur unitaire \vec{i} , compte tenu de la relation champ potentiel : $\vec{E}(x) = -\overrightarrow{grad}V(x)$, il apparaît dans le semi-conducteur un champ électrique $\vec{E}(x)$ qui favorise le déplacement des trous dans le sens du champ électrique et le déplacement des électrons mobiles dans le sens opposé.

On rappelle que : $\vec{E}(x) = -\overrightarrow{grad}V(x) = -\frac{dV(x)}{dx}\vec{i}$

A l'échelle macroscopique, les trous et les électrons prennent des vitesses d'ensembles proportionnelles au champ électrique :

$$\vec{v}_p = \mu_p \vec{E}$$

$$\vec{v}_n = -\mu_n \vec{E}$$

- μ_p représente la mobilité des trous
- μ_n est la mobilité des électrons

| Mobilité à T = 300°K | Electrons (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹) | Trous (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹) |
|----------------------|--|--|
| Ge | 3900 | 1900 |
| Si | 1500 | 475 |
| GaAs | 8500 | 400 |

Ces mobilités dépendent de la température, du champ électrique et du dopage (voir les graphes A2 et A3 de l'annexe).

- La mobilité diminue lorsque la température augmente, en effet, l'agitation thermique accroît le nombre de "chocs" qui s'oppose au déplacement.
- A température ordinaire, μ_p , la mobilité des trous est inférieure à μ_n la mobilité des électrons. Cela se conçoit dans la mesure où μ_n provient du déplacement direct des électrons de la bande de conduction alors que μ_p résulte des actions successives dans la bande de valence, illustrées en figure 8.

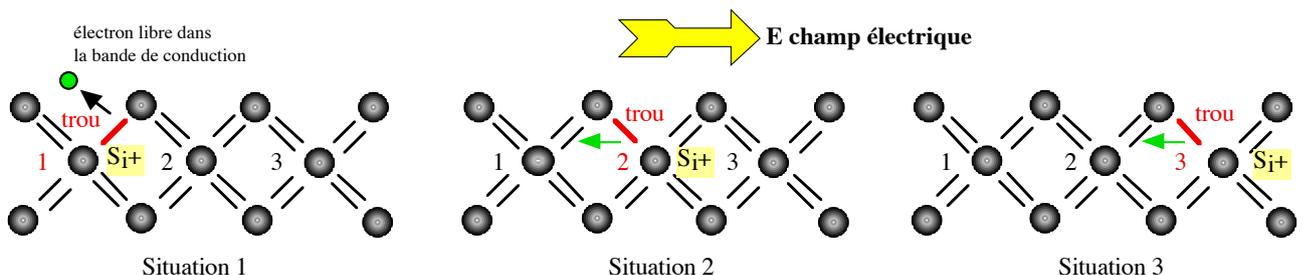


Figure 8 : Déplacements d'une liaison de covalence (trou)

- Situation 1 : ionisation thermique, c'est-à-dire création d'une paire électron-trou au niveau de l'atome de silicium 1 qui devient un ion positif. En effet, l'atome 1 a perdu un électron qui est emporté par le champ électrique.
- Situation 2 : sous l'action du champ électrique \vec{E} , l'électron de valence de l'atome 2 est venu combler le trou de l'atome 1 voisin. L'atome 2 est un ion positif avec une liaison de covalence insatisfaite c'est-à-dire un trou.
- Situation 3 : sous l'action du champ électrique l'électron de valence de l'atome 3 est venu combler le trou de l'atome 2. L'atome 3 est un ion positif avec une liaison de covalence insatisfaite c'est-à-dire un trou.

Ainsi, le mouvement des trous dans la direction du champ électrique correspond à un mouvement d'électrons dans la bande de valence. **Voir le film en annexe 1 de la page Semi-conducteur.**

6.2) Détermination de la densité de courant de conduction

Considérons en figure 9 un barreau de silicium homogène de section S et de longueur L à température constante. Les porteurs libres sont constitués de p trous et n électrons par cm^3 . La différence de potentiel V appliquée au barreau crée un champ électrique de norme constante $E = \frac{V}{L}$ qui provoque le déplacement des électrons et des trous libres :

- Dans la direction du champ électrique pour les trous
- Dans le sens opposé pour les électrons

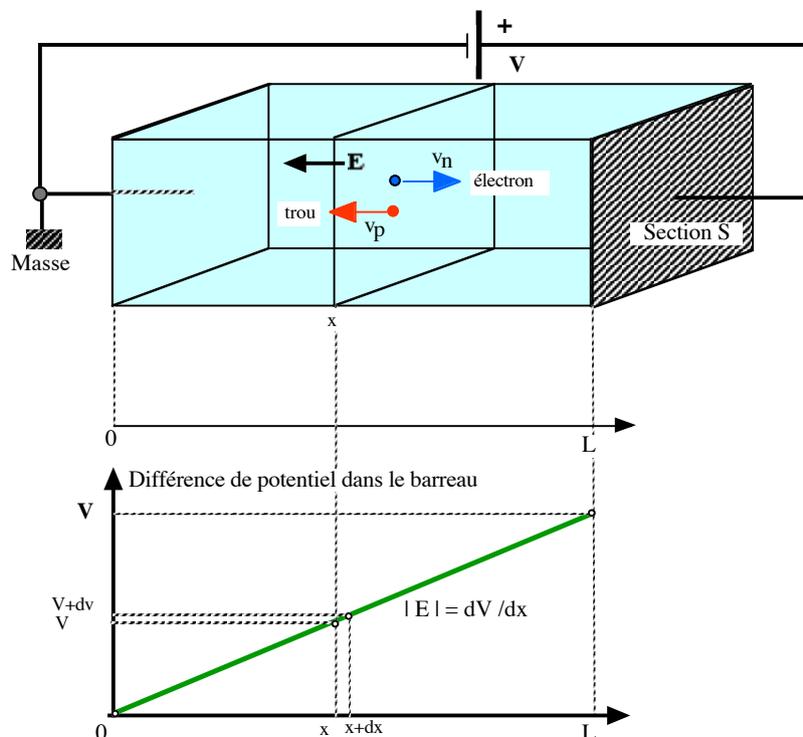


Figure 9 : Déplacements des porteurs dans le silicium homogène sous l'action d'une différence de potentiel

Imaginons un observateur placé au point d'abscisse x . Durant un temps infinitésimal dt cet

observateur voit passer :

- N électrons animés de la vitesse v_n qui parcourent alors une distance dx_n
- P trous animés de la vitesse v_p qui parcourent une distance dx_p

La densité de courant correspondant à ce mouvement de porteurs de charge s'exprime donc :

$$J_{cond} = q \frac{N}{Sdt} + q \frac{P}{Sdt}$$

Sachant que : $dt = \frac{dx_n}{\mu_n E} = \frac{dx_p}{\mu_p E}$, il vient :

$$J_{cond} = q(n\mu_n + p\mu_p)E = \sigma E$$

La densité de courant de conduction totale J_{cond} est alors proportionnelle au champ électrique et à la conductivité σ ($\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$) du cristal.

Remarque : la relation précédente représente tout simplement la loi d'Ohm.

En effet : $J_{cond} = \frac{I_{cond}}{S}$ et $|E| = \frac{V}{L}$

On en déduit alors la différence de potentiel aux bornes du barreau : $V = RI_{cond}$

avec $R = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{S}$ résistance du matériau.

Remarque : Inclinaison du schéma de bandes et mouvement des porteurs.

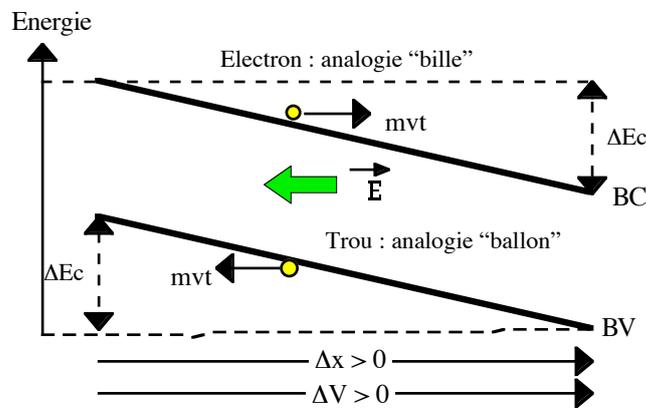


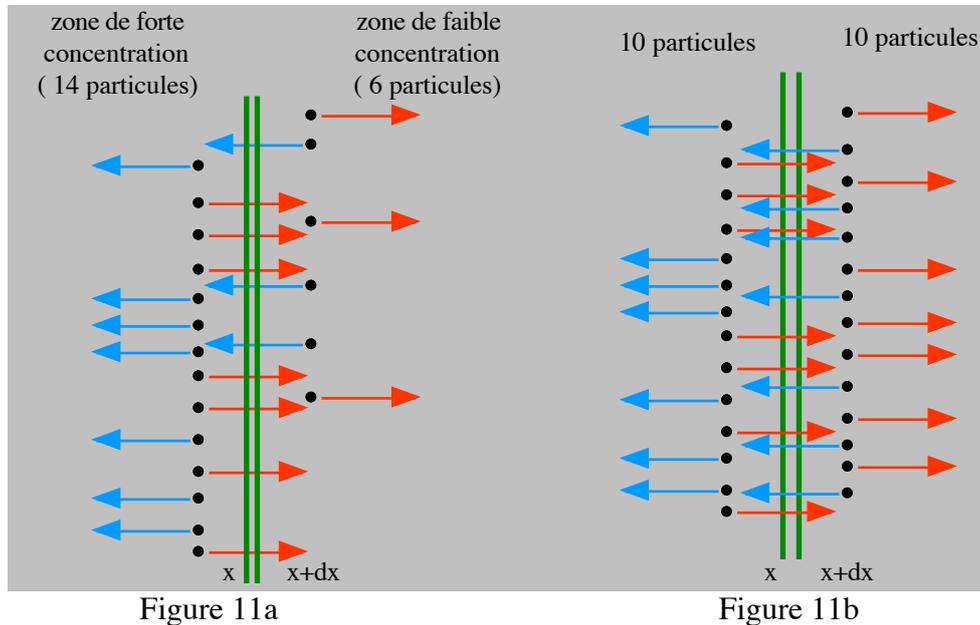
Figure 10 : voir le film en annexe 2 de la page Semi-conducteur

On montre que la présence d'un champ électrique dans le barreau, conséquence de la différence de potentiel appliquée, va entraîner une inclinaison du schéma de bandes du semi-conducteur dans le sens des potentiels croissants (figure 10). On dispose alors d'une analogie mécanique pour illustrer le sens du mouvement des porteurs :

- Les électrons de la bande de conduction se comportent comme des billes sur un plan incliné. En se déplaçant vers la droite leur énergie cinétique augmente alors que leur énergie potentielle diminue. La somme des énergies étant, bien entendu, constante.
- Les trous de la bande de valence se comportent comme des ballons se déplaçant le long d'un plafond incliné. Vers la gauche, ils voient leur énergie cinétique augmenter alors que leur énergie potentielle diminue.

7) PHENOMENE DE DIFFUSION DANS LES SEMI-CONDUCTEURS

Dans les semi-conducteurs non homogènes où la répartition de la densité de population est non uniforme, les porteurs peuvent aussi se déplacer par diffusion.



Pour expliquer le processus de diffusion, imaginons (figure 11a) un milieu non homogène, présentant 14 particules en x et 6 particules en $x+dx$. Statistiquement, le nombre total de particules qui se déplacent vers la gauche est aussi grand que celui qui se déplace vers la droite. Comme il y a plus de particules sur la gauche que sur la droite, il se produit un flux net de la gauche vers la droite.

Aussi, la surface d'épaisseur dx voit donc passer 7 particules de la gauche vers la droite et 3 de droite à gauche. On assiste donc au passage de 4 particules de x vers $x+dx$, proportionnelle à la différence de concentration c'est-à-dire du coefficient directeur : $\frac{d(\text{concentration})}{dx}$

Si la concentration de gauche et de droite sont égales (figure 11b), cela ne veut pas dire qu'il n'y aura plus de particules en mouvement. Il y a en revanche autant de particules qui se déplacent vers la droite que vers la gauche, l'écoulement net a donc nul : il y a donc équilibre dynamique.

7.1) Diffusion des électrons dans le semi-conducteur non homogène

Considérons un barreau semi-conducteur de type P comportant une densité de population de trous et d'électrons libres : $p = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et $n = 2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$.

Le barreau est soumis à une source lumineuse intense sur une de ses faces (figure 12). Cette source lumineuse va produire, par apport d'énergie, une génération locale de paires électrons trous, par exemple : 10^6 cm^{-3} en $x = 0$. Au niveau de la surface éclairée, on crée donc localement une surpopulation d'électrons telle que : $n(0) = 10^6 \text{ cm}^{-3}$ par rapport à l'équilibre où $n(L) = 2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$.

Les électrons en excès, vont diffuser de la gauche vers la droite du barreau comme les molécules d'un gaz qui, injectées dans un récipient, tendent à occuper tout le volume (autres analogies : diffusion d'un parfum dans une pièce, diffusion du thé dans de l'eau...).

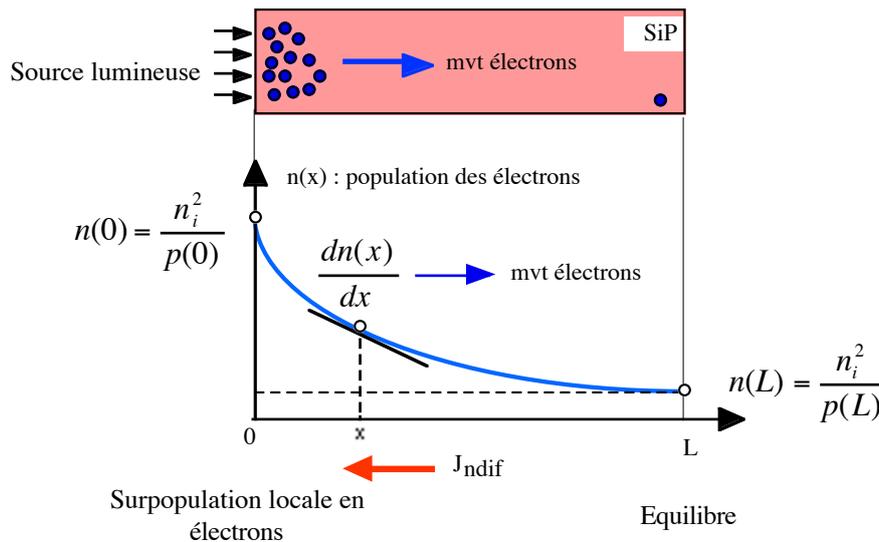


Figure 12 : Diffusion d'une surpopulation locale d'électrons dans SiP

Les électrons en excès sont recombinés par la forte population des trous majoritaires du semi-conducteur de type P. La population des électrons $n(x)$ diminue selon la loi :

$$n(x) = n(0) \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)$$

Où L_n représente la longueur de diffusion des électrons.

On définit alors en x une **densité de courant de diffusion des électrons** : J_{ndif} proportionnelle au gradient de concentration de la surpopulation : $\frac{dn(x)}{dx}$:

$$J_{ndif} = qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad \text{avec :} \quad D_n = \mu_n \frac{kT}{q}$$

D_n ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$) représente la constante de diffusion des électrons dans le silicium.

Remarque : $\frac{dn(x)}{dx}$ est négatif donc J_{ndif} est bien dirigé dans le sens des x négatif sur la figure 12.

7.2) Diffusion des trous

De la même manière, considérons un barreau de semi-conducteur de type N soumis à une source lumineuse intense sur une de ses faces (figure 13). Comme précédemment on obtient un phénomène de diffusion des trous excédentaires :

$$p(x) = p(0) \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right)$$

Où L_p représente la longueur de diffusion des trous.

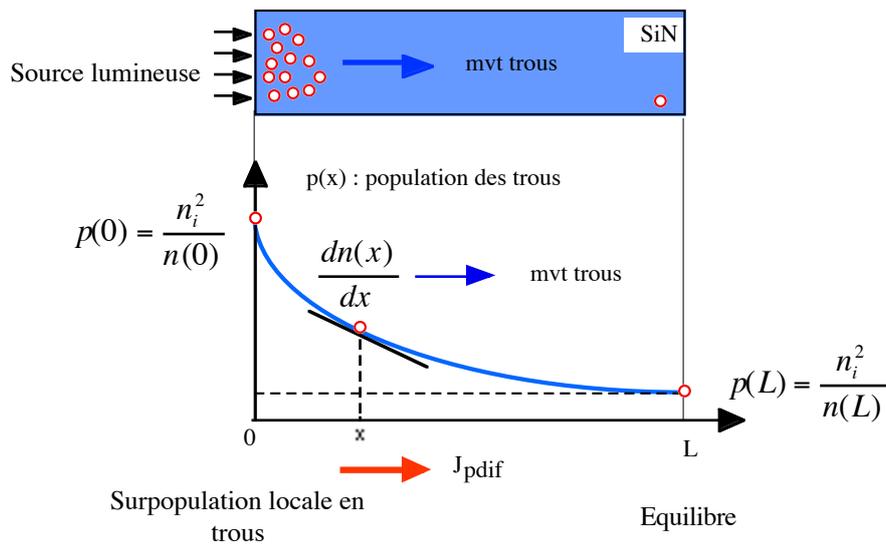


Figure 13 : Diffusion d'une surpopulation locale de trous dans SiN

On définit en x une densité de courant de diffusion des trous : J_{pdif} proportionnelle au gradient de concentration :

$$J_{pdif} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad \text{avec :} \quad D_p = \mu_p \frac{kT}{q}$$

D_p ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$) est la constante de diffusion des trous dans le silicium.

Remarque : le terme $\frac{dn(x)}{dx}$ est négatif, sachant que J_{pdif} est dirigé dans le sens des x positif, il faut affecter l'expression J_{pdif} du signe négatif !

8) DENSITE DE COURANT DE CONDUCTION ET DE DIFFUSION

Lorsque le semi-conducteur est soumis aux deux phénomènes de conduction (présence d'un champ électrique) et de diffusion des porteurs (matériau non homogène), la densité de courant totale est telle que :

Pour les trous :

$$J_p = J_{pcond} + J_{pdif} = q \cdot p(x) \cdot \mu_p \cdot E - q \cdot D_p \cdot \frac{dp(x)}{dx}$$

Pour les électrons :

$$J_n = J_{ncond} + J_{ndif} = q \cdot n(x) \cdot \mu_n \cdot E - q \cdot D_n \cdot \frac{dn(x)}{dx}$$

