

Chapitre 6

Les semi-conducteurs

6.1 Introduction

L'électronique est la science dont l'objet est l'étude du mouvement des électrons dans le vide ou dans les milieux matériels. Elle est née avec la découverte par Lee Forest en 1907 de la lampe triode, qui a été le premier dispositif permettant de commander avec une vitesse suffisante une puissance importante par un signal de puissance beaucoup plus faible. Ceci a permis la réalisation des amplificateurs, puis ultérieurement, avec l'apparition des systèmes de traitement des signaux électriques, le développement des télécommunications. Sous ce double aspect de commande et de traitement des signaux électriques et grâce au développement des composants à semi-conducteurs fiables, de faible dimensions et de plus en plus performants, l'électronique s'est introduite depuis plus de trente ans dans tous les domaines de la technique et en particulier dans celle de l'automatisation des engins de manutention-levage.

Dans ce chapitre, nous effectuerons un rappel de la physique des semi-conducteurs puis la description et le fonctionnement des principaux composants utilisés dans la réalisation des fonctions électroniques de contrôle rencontrés dans les équipements des engins de levage.

6.2. Fondamentaux des semi-conducteurs

6.2.1. Rappels sur la théorie atomique

6.2.1.1. La molécule

La matière, qu'elle soit solide, liquide ou gazeuse se compose de molécules qui sont des groupements d'atomes. Par exemple le chlorure de sodium, le vulgaire sel de cuisine, est formé d'un atome de sodium et d'un atome de chlore. Le chlore et le sodium sont deux éléments simples, au même titre que l'hydrogène ou l'oxygène. Les molécules du gaz hydrogène sont formées de deux atomes d'hydrogène. Le symbole chimique de l'hydrogène en tant que gaz est H_2 , le chiffre 2 indiquant la présence de deux atomes H. Les associations d'atomes pour former des molécules sont soumises à des lois très strictes, imposées par la structure même des atomes mais il existe une quantité énorme de possibilités d'associations.

6.2.1.2. L'atome

En tant que plus petite partie d'un corps, l'atome a été imaginé déjà dans l'Antiquité. Mais c'est seulement au 19^{ème} siècle qu'il put être étudié et modélisé. On doit à Ernest Rutherford, un physicien anglais d'avoir proposé la représentation de l'atome sous la forme d'un système solaire miniature. Alors que le nombre de molécules possibles nous paraît infini, le nombre d'atomes est limité. Dans la nature on ne trouve pas plus de 92 corps simples différents. Alors qu'il est possible de fabriquer des molécules visibles avec un microscope électronique, l'atome a des dimensions qui sont de l'ordre de grandeur de l'angström.

Les corps simples les plus courants sont stables : un atome de cuivre restera éternellement un atome de cuivre. Par contre les atomes les plus lourds, comme le radium ou l'uranium, peuvent se désintégrer et donner naissance à un ou deux autres atomes. Ainsi le radium peut se transformer en radon, un gaz rare radioactif. Ces transformations sont exploitées dans le domaine de l'énergie nucléaire.

6.2.1.3. La structure de l'atome

Conventionnellement on représente l'atome comme constitué d'électrons gravitant autour d'un noyau, comme le feraient des satellites autour d'une planète. Par rapport au diamètre de l'atome, le noyau semble très petit, la matière est essentiellement constituée de vide.

Le noyau est constitué de nucléons :

un nombre Z de protons, déterminant la nature du corps simple.

un nombre N de neutrons.

Z est le numéro atomique. L'oxygène qui comporte 8 protons a un *numéro atomique* 8.

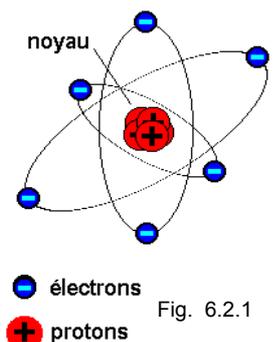


Fig. 6.2.1

Le *nombre de masse* A est égal à la somme Z+N, il est de 16 pour l'oxygène. Pour les noyaux lourds N est plus grand que Z ; exemple : le cuivre A = 63, N = 29, Z = 34.

La charge électrique du neutron est nulle. Le proton a une charge positive égale en valeur absolue à celle de l'électron qui lui, est négatif.

A son état normal un atome est neutre, le nombre d'électrons étant égal au nombre de protons. Sur la figure ci-dessus les neutrons du noyau n'ont pas été représentés. L'essentiel de la masse de l'atome est concentré dans le noyau.

6.2.1.4. Répartition des électrons

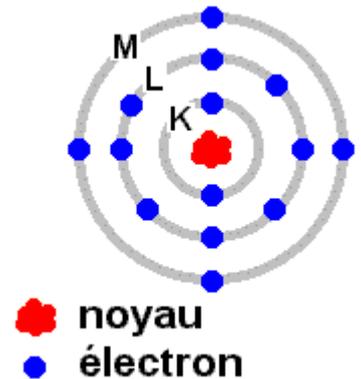
Les électrons, de charge négative, sont répartis par couches. Chaque couche ne peut comporter qu'un nombre limité d'électrons. Par exemple la couche K qui est la plus proche du noyau est saturée avec 2 électrons. La couche la plus à l'extérieur de la plupart des atomes n'est pas complète, elle peut ainsi accepter (provisoirement) des électrons, ou éventuellement en perdre. C'est le cas lors de l'ionisation d'un atome. Les gaz rares (hélium, néon, krypton...) ont la couche la plus extérieure qui est saturée, ils sont inertes sur le plan chimique.

Le nombre d'électrons maximum par couche est le suivant :

$$K : 2, L : 8, M : 18, N : 32, O : 50...$$

La figure ci-contre représente dans un plan les 14 électrons d'un atome de silicium gravitant autour du noyau composé de 14 protons et 14 neutrons.

Fig. 6.2.2



6.2.1.5. Les ions

Une molécule de potasse, d'acide sulfurique ou de chlorure de sodium se dissocie en ions lorsqu'elle est dissoute dans de l'eau. Par exemple, la molécule NaCl devient Na⁺ et Cl⁻. L'ion Na⁺ est appelé cation car il sera attiré par la cathode négative lors d'une électrolyse et l'ion Cl⁻ est un anion. Le symbole Na⁺ signifie que l'atome de sodium a perdu un électron et possède une charge positive tandis que l'anion Ca⁻ possède une charge électrique positive.

L'ionisation peut se produire aussi à haute température. Un plasma est un gaz complètement ionisé, un mélange d'ions et d'électrons dont la charge globale est neutre.

Les gaz de la haute atmosphère (l'ionosphère) sont ionisés par le rayonnement solaire. Il participent à la formation de couches réfléchissant les ondes radio sur ondes courtes.

6.2.1.6. Le rayonnement

Les électrons périphériques sont moins fortement soumis à l'attraction du noyau que ceux des couches internes et il arrive fréquemment qu'un électron change d'orbite par suite d'une excitation comme, par exemple, une décharge électrique en milieu gazeux. Lors de cette opération l'électron absorbe une certaine quantité d'énergie. En reprenant sa trajectoire normale, l'électron restitue l'énergie W (en J) qu'il avait absorbée en émettant un photon, soit un rayonnement de fréquence ν (en Hz) particulière selon la relation :

$$W = h \cdot \nu \quad \text{avec } h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J.s (constante de Planck).}$$

Réciproquement, un photon capté par un atome peut provoquer un changement de trajectoire d'un électron et faciliter le passage d'un courant électrique (effet photoélectrique) voire ioniser l'atome en éjectant l'électron.

6.2.1.7. Le cristal

La couche la plus externe de l'atome abrite les électrons qui participe à la conduction dans les corps conducteurs comme le cuivre, l'aluminium ou qui permettent l'assemblage d'atomes comme dans les molécules ou les cristaux.

Un cristal est un solide formé d'atomes régulièrement disposés et fermement liés les uns aux autres. Il peut s'agir d'atomes différents (chlore et sodium dans le sel de cuisine) ou identiques (carbone, dans le diamant).

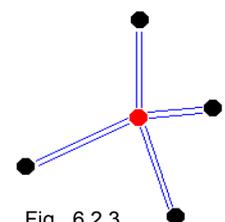


Fig. 6.2.3

Les atomes voisins mettent en commun leurs électrons de la couche externe.

Dans le cristal de silicium, chaque atome est lié à 4 atomes voisins avec qui il partage les quatre électrons de sa couche M. La répartition étant régulière on peut considérer qu'un atome est au centre d'un tétraèdre et que ses 4 voisins sont placés aux sommets de ce tétraèdre.

6.2.2. Propriété des semi-conducteurs

6.2.2.1. Généralités

Les semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs, tels que les métaux, et celle des isolants. La différence la plus caractéristique entre ces corps tient au sens de variation de cette résistivité avec la température. En effet, si la résistance d'un fil métallique augmente avec la température, celle d'un semi-conducteur décroît.

Le germanium et le silicium sont les semi-conducteurs les plus utilisés en électronique, (colonne IVb de la classification périodique des éléments de Mendeleïev). Leur résistivité est plusieurs centaines de milliers de fois plus grande que le cuivre. Le silicium est le corps le plus abondant dans la nature puisqu'il est à la base de la plupart des roches. Sa température de fusion est de l'ordre de 2000 °C. L'arséniure de gallium, alliage d'arsenic (5 électrons sur la couche externe) et de gallium (3 électrons), se comporte comme un corps qui aurait 4 électrons sur sa couche externe, comme le germanium ou le silicium. Il est principalement utilisé en très hautes fréquences.

6.2.2.2. Cristallisation du silicium

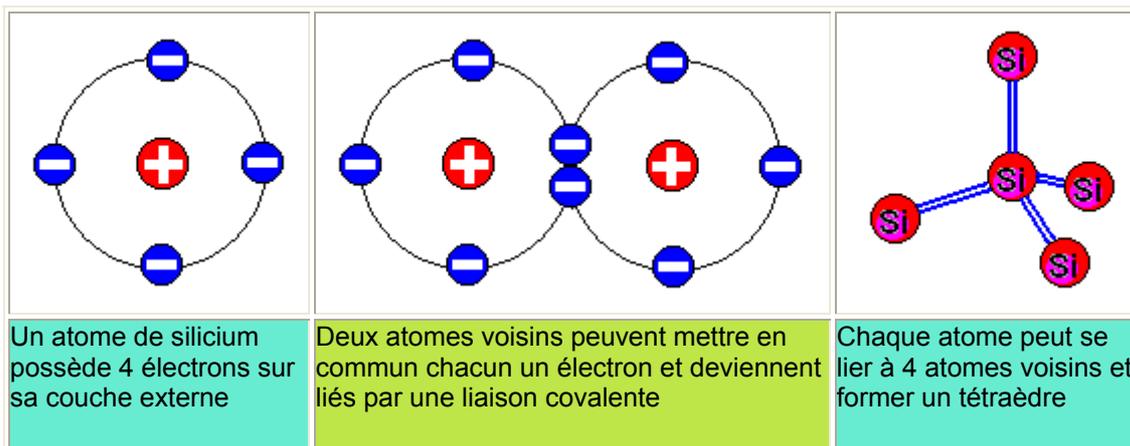


Fig. 6.2.4

Chaque atome de silicium peut être considéré comme au centre d'un tétraèdre, chacun des atomes auquel il est lié se trouvant sur un des quatre sommets du tétraèdre.

Les liaisons covalentes sont très solides et permettent la formation d'un cristal parfait.

Tous les électrons étant utilisés dans les liaisons, aucun n'est disponible pour permettre le passage d'un courant électrique, du moins aux températures très basses ; le cristal présente une résistivité assez élevée.

6.2.2.3. La conduction dans les semi-conducteurs

Lorsque la température s'élève, sous l'effet de l'agitation thermique, des électrons réussissent à s'échapper et participent à la conduction. Ce sont les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau qui s'impliquent dans les liaisons covalentes. Dans le cristal, ces électrons se situent sur des niveaux d'énergie appelée bande de valence. Les électrons qui peuvent participer à la conduction possèdent des niveaux d'énergie appartenant à la bande de conduction. Entre la bande de valence et la bande de conduction peut se situer une bande interdite. Pour franchir cette bande interdite l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon...). Pour les isolants la bande interdite est quasi infranchissable, pour les conducteurs elle est inexistante. Les semi-conducteurs ont une bande interdite assez étroite. L'atome qui a perdu un électron devient un ion positif et le trou ainsi formé peut participer à la formation d'un courant électrique en se déplaçant.

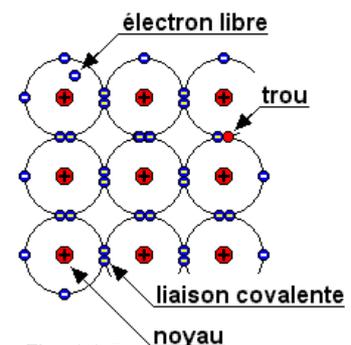


Fig. 6.2.5

Dans un cristal pur, à température ordinaire, les électrons libres extrêmement rares (de l'ordre de 3 pour 10^{13} atomes). Si l'électron libre est capté par un atome, il y a recombinaison. Pour une température donnée ionisation et recombinaison s'équilibrent ; la résistivité diminue quand la température augmente.

Un semi-conducteur dont la conductivité ne doit rien à des impuretés est dit intrinsèque.

6.2.3. Le dopage des semi-conducteurs

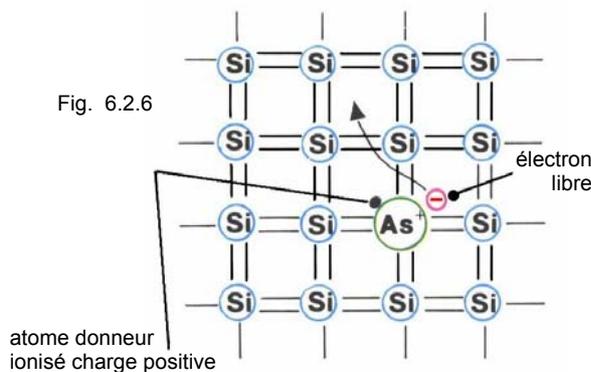
Le dopage est l'opération qui consiste à introduire des atomes comportant trois ou cinq électrons en couche externe, en substitution, dans le réseau d'un semi-conducteur lors de sa formation.

Ces atomes sont appelés impuretés. Cette action améliore fortement la conductivité du cristal et en modifie en conséquence son comportement électrique. Ce nouveau semi-conducteur est appelé extrinsèque.

En fonction de la nature des impuretés utilisées au cours de l'opération de dopage, on obtient soit un semi-conducteur intrinsèque de type N soit un semi-conducteur intrinsèque de type P.

6.2.3.1. Semi-conducteur extrinsèque type N

Lorsqu'un un cristal de germanium ou de silicium reçoit impuretés pentavalentes, c'est-à-dire des atomes possédant cinq électrons sur leur couche externe comme l'arsenic le phosphore ou l'antimoine, il devient un semi-conducteur à conductivité N (ex : silicium N).



Dans ce cas, les impuretés sont appelées donneurs car chacune d'entre elles donne un électron libre.

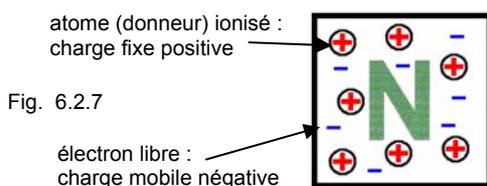
La figure 6.2.6 ci-contre illustre le fait que quatre électrons de la couche périphérique de l'atome pentavalent prennent part aux liens de valence alors que le cinquième, sans attache, est libre de se mouvoir dans le cristal.

L'électron libre ainsi créé neutralise la charge positive, solidaire du réseau cristallin, qu'est l'atome pentavalent ionisé.

Les porteurs de charges majoritaires sont alors de polarité négative, le cristal est dit dopé N.

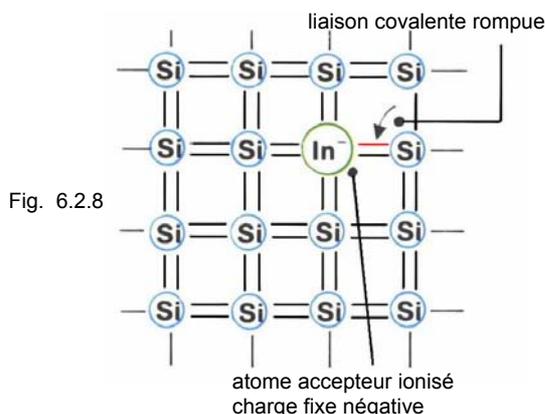
Les porteurs de charge minoritaires sont dans ce cas les trous (positifs) de la conductivité intrinsèque.

Les dopages courants sont d'environ 10^{16} à 10^{18} atomes par cm^3 . On peut admettre que le nombre volumique des électrons libres est égal au nombre volumique des impuretés et que le nombre volumique des trous (charges libres positives) est négligeable car les porteurs majoritaires sont 10^6 à 10^{12} fois plus nombreux que les porteurs minoritaires.



Étant données ces considérations, on établit le modèle de semi-conducteur représenté par la figure 6.2.7 ci-contre dans lequel n'apparaissent que les charges essentielles, à savoir : les électrons libres et les donneurs ionisés. Les charges fixes sont entourées d'un cercle

6.2.3.2. Semi-conducteur extrinsèque type P



Si maintenant l'on introduit des atomes trivalents (c'est-à-dire possédant trois électrons sur la couche externe, comme le bore ou l'indium) dans le réseau cristallin du semi-conducteur, les trois électrons de la couche périphérique de l'impureté prennent part aux liens de valence, laissant ainsi une place libre (trou).

Ce trou peut être comblé par un électron provenant d'un autre lien de valence d'un atome voisin qui laisse, à son tour, un trou derrière lui. Tout se passe comme si c'était le trou qui s'était déplacé.

L'atome trivalent est alors ionisé et sa charge négative est neutralisée par le trou (voir figure 6.2.8 ci-contre).

Comme les porteurs de charges majoritaires de ce cristal dopé sont des trous, positifs, le semi-conducteur cristal est dit extrinsèque P. Les électrons libres qui correspondent à la conductivité intrinsèque sont appelés porteurs minoritaires.

Les impuretés, dans un semi-conducteur extrinsèque de type P. sont appelées accepteurs au vu de leur propriété d'accepter un électron situé dans un lien de valence.

On peut faire les mêmes considérations qu'au paragraphe précédent concernant le nombre volumique des trous : il est approximativement égal au nombre volumique des impuretés. Le nombre volumique des électrons libres est alors considéré comme négligeable. Il s'ensuit un modèle, représenté à la figure suivante, dans lequel n'apparaissent que les charges prépondérantes : les trous et les accepteurs ionisés.

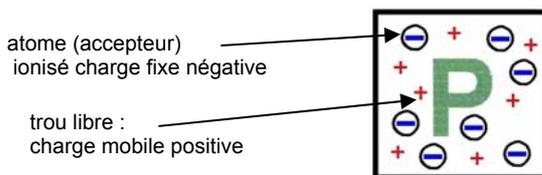


Fig. 6.2.9

6.2.4. Production du silicium

Le silicium est obtenu à partir du sable (silice SiO_2) par des traitements chimiques et physiques complexes. Ce silicium n'est pas directement utilisable car il n'est pas sous forme de cristal : les atomes ne sont pas rangés régulièrement dans l'espace (silicium polycristallin).

Pour obtenir le silicium monocristallin, le silicium polycristallin est fondu dans un creuset puis les impuretés (matériau dopant) sont ajoutées.

Trois types de dopage :

- N^- ou P^- → dopage faible : 10^{14} atomes/ cm^3 ;
- N ou P → dopage normal : 10^{16} atomes/ cm^3 ;
- N^+ ou P^+ → dopage fort : 10^{20} atomes/ cm^3 .

Un lingot de silicium monocristallin est obtenu par tirage à partir d'un **germe** convenablement orienté. Diamètre normalisé des lingots : 150 mm, 200 mm et 300 mm.

Les lingots sont ensuite découpés en plaquettes circulaires, appelées wafer, au moyen d'une scie diamantée. Epaisseur des plaquettes après rodage : entre 350 et 650 μm . Elles ne doivent présenter aucun défaut et être parfaitement planes.

Toutes ces opérations se font dans des salles hermétiques pour empêcher la contamination du silicium par d'autres impuretés que celles nécessaires au dopage.

6.2.5. La jonction PN

6.2.5.1. Définition

On appelle jonction la limite de séparation entre d'une part un semi-conducteur intrinsèque dopé avec des atomes à 5 électrons périphériques (zone dopée N) et d'autre part un semi-conducteur intrinsèque dopé avec des atomes à 3 électrons périphériques (zone dopée P). La jonction est une zone de très faible épaisseur (1m) dans laquelle la conductibilité passe graduellement du type P au type N.

Dans chaque région N P, on recense différents porteurs (voir figure 6.2.10 ci-dessous) :

- La région N contient des ions positifs (cations) fixes et des électrons mobiles qui constituent l'essentiel des porteurs (majoritaires)
- La région P contient des ions négatifs (anions) fixes et des trous mobiles

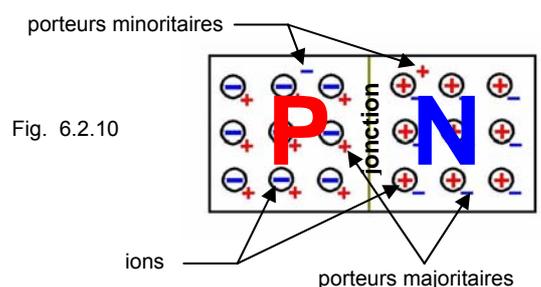


Fig. 6.2.10

6.2.5.2. La zone de transition

De part et d'autre de la jonction les porteurs majoritaires (électrons dans la zone N et trous dans la zone P) s'attirent et se recombinent ; leurs charges s'annulent il y a raréfaction des porteurs

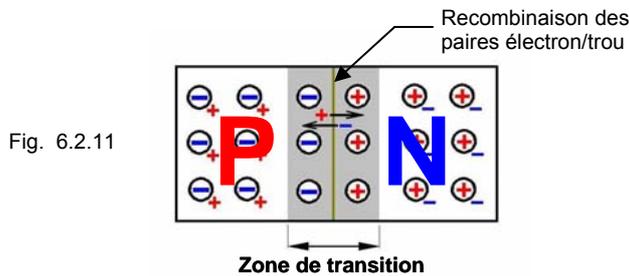


Fig. 6.2.11

Nota :

Sur la figure 6.2.11 ci-contre, les porteurs minoritaires n'ont pas été représentés bien que leur rôle ne soit pas négligeable dans la zone de transition.

Il en résulte plusieurs conséquences fondamentales :

- une forte diminution de la conductibilité la zone de transition de très faible épaisseur (de l'ordre du micron).
- initialement neutre, la région libérée prend la charge des ions fixes dont le signe est contraire à celui des porteurs. l'apparition de deux régions chargées de signes contraires (la région N se charge positivement et la région P négativement)

La jonction, avec ses deux couches d'ions de charges opposées et voisines est comparable à un condensateur; le semi-conducteur de la jonction joue le rôle du diélectrique.

6.2.5.3. Equilibre lorsque la jonction PN n'est pas polarisée

La recombinaison des porteurs libres laisse alors apparaître deux régions chargées de signe contraires, des cations du côté N et des anions du côté P. Cette région est appelée zone de transition ou de charge d'espace.

Du fait du déséquilibre de charges, un champ électrique \vec{E}_{int} apparaît dans la zone de transition.

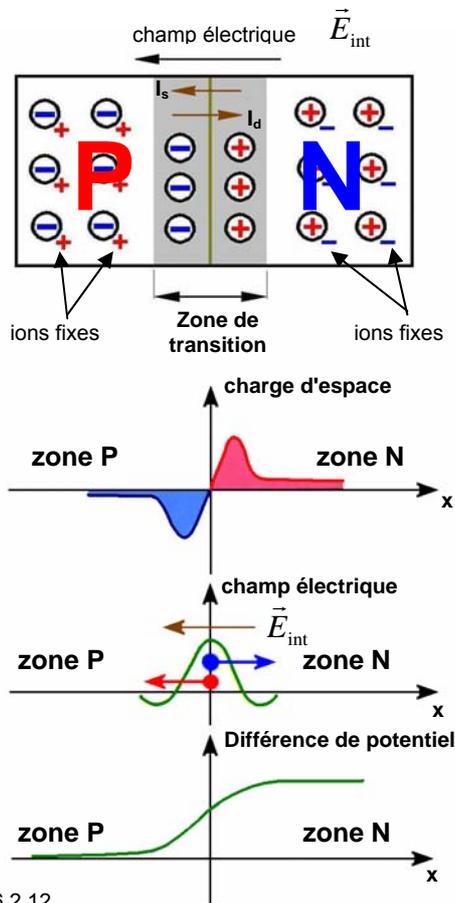


Fig. 6.2.12

Ce champ, dirigé de la zone N vers la zone P, crée un mouvement de charges opposé au mouvement de diffusion et va repousser les électrons dans la zone N et les trous dans la zone P constituant ainsi une barrière de potentiel. Il apparaît alors à la jonction une différence de potentiel de contact (quelques dixièmes de volt).

En l'absence de tension extérieure, un équilibre s'établit quand le champ électrique E_{int} créé par les atomes donneurs ou accepteurs (qui vont devenir respectivement des charges + et -) va être suffisant pour contrarier les charges mobiles. La jonction devient alors le siège de deux courants égaux et opposés :

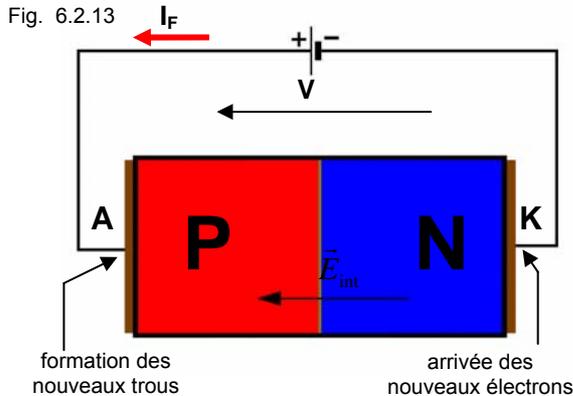
- ❖ un courant de diffusion I_d concernant de chaque côté les porteurs majoritaires, dirigé dans le sens passant de la jonction (de P vers N)
- ❖ un courant de conduction (ou de saturation) I_s concernant les porteurs minoritaires attirés par le champ E_{int} . Ce courant dirigé de N vers P (voir figure 6.2.12 ci-contre), croît très rapidement avec la température de jonction (exponentiellement).

L'ensemble se comporte alors comme un condensateur chargé.

6.2.5.4. La jonction PN polarisée en sens direct

Le dipôle constitué par le cristal de semi-conducteur divisé par la jonction PN est une diode dont l'anode correspond à la zone P et la cathode à la zone N.

Lorsqu'on relie l'anode de la diode à la polarité + de la source de tension continue extérieure V et la cathode de la jonction à la polarité -, et si cette tension a une valeur suffisante (au moins 0,2 V pour le germanium et 0,7V pour le silicium), alors on annule le champ électrique de la zone frontière présente dans la jonction à l'état d'équilibre. Le champ E_{int} ne bloque donc plus les porteurs majoritaires et les électrons de la région N vont à la rencontre des trous de la région P. Ce sont eux qui traversent la jonction et donnent ainsi naissance à la circulation du courant I_D dans le circuit. Le courant de diffusion augmente rapidement avec la tension externe V.



A la frontière, un électron comble un trou, et il y a de nombreuses recombinaisons de paires électron-trou.

La diode est alors polarisée dans le sens direct, et un courant relativement intense peut circuler.

La théorie montre que l'accroissement du courant suit une loi exponentielle de l'intensité I_S (courant de saturation) en fonction de la tension V appliquée entre l'anode et la cathode. On montre que la relation entre le courant de diffusion I_D et le courant de saturation I_S est la suivante :

$$I_D = I_S \cdot e^{\frac{V_D}{\Psi}}$$

Où $\Psi = \frac{k \cdot T}{q}$ avec

- $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C (charge électrique élémentaire de l'électron) ;
- $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K (constante de Boltzmann) ;
- T : température absolue (en K).

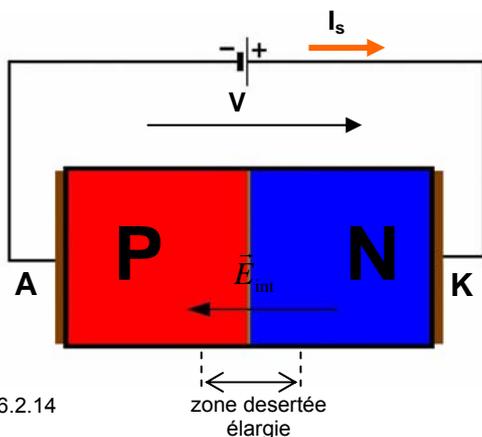
Le courant direct (Forward) $I_F = I_D - I_S$ devient :

$$I_F = I_S(T) \cdot \left[\exp\left(\frac{e \cdot V}{k \cdot T}\right) - 1 \right] \approx I_D$$

Le courant direct varie de quelques dizaines de milliampères pour les diodes de signal à plusieurs centaines d'ampères pour les diodes industrielles de forte puissance.

6.2.5.5. La jonction PN polarisée en sens inverse

Si on branche le générateur de tension externe V dans le sens inverse du cas précédent, le champ électrique extérieur se trouve alors orienté dans le même sens que le champ interne de la jonction ce qui renforce l'action et empêche le passage des porteurs majoritaires.



Il en résulte que l'on chasse encore plus loin les charges mobiles. La zone désertée s'élargit et le courant ne peut passer, la jonction devient quasiment isolante.

La diode polarisée en sens inverse est dite bloquée ou non passante. Il ne subsiste qu'un très faible courant de fuite dû aux porteurs minoritaires (trous de la région N et électrons de la région P). Ceux-ci peuvent traverser la jonction et reboucler par le générateur. Ce courant de circulation inverse I_S dépend essentiellement de la température.

Le champ extérieur repousse les charges qui vont se trouver à une distance sensiblement proportionnelle à la tension appliquée, créant ainsi une capacité proportionnelle à cette distance, donc également à la tension appliquée.

Cette capacité inhérente à toute jonction de semi-conducteurs va constituer la principale limitation au fonctionnement à haute fréquence des composants électroniques (diodes, transistors et circuits intégrés).

6.2.5.6. Caractéristique

La caractéristique courant/tension de la jonction PN est représentée par la courbe suivante (Fig 6.2.15) :

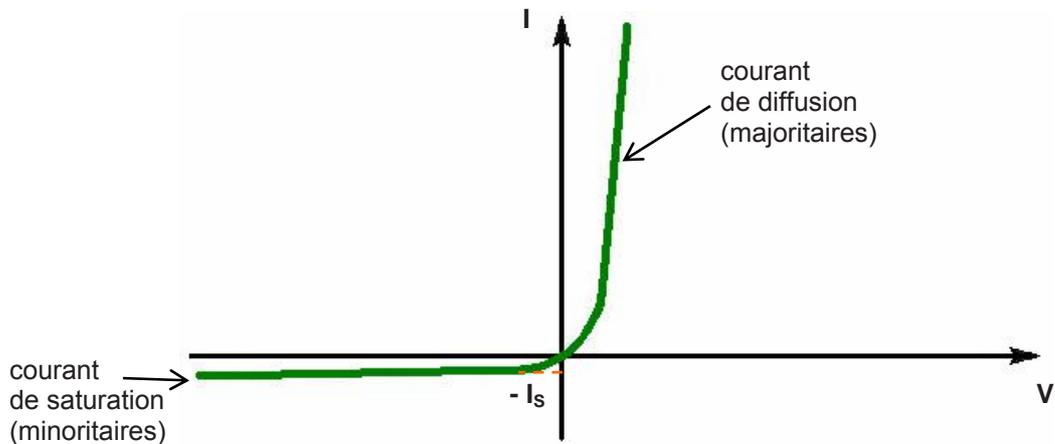


Fig. 6.2.15

6.2.5.7. Claquage d'une jonction PN

Lorsque la jonction est polarisée en inverse et que la tension appliquée atteint une valeur $V < -V_{RM}$ (tension inverse maximale), le courant augmente rapidement : c'est le claquage.

On distingue trois types de claquage :

- Le claquage par effet thermique
Une dissipation de chaleur importante entraîne la destruction de la jonction par surcharge en puissance (fusion).
- Le claquage par avalanche
Lorsque le champ électrique dans la jonction dépasse 5.10^5 V/cm et que celle-ci est faiblement dopée, les atomes du cristal sont ionisés par choc d'électrons.
- Le claquage par effet de champ (effet Zener)
Lorsque le champ électrique dans la jonction dépasse 10^6 V/cm dans une jonction fortement dopée, les électrons de liaisons sont arrachés et provoquent l'avalanche.

6.3. La Diode

6.3.1. Principe de fonctionnement

La diode est constituée par l'association de semi-conducteurs de dopage opposé :

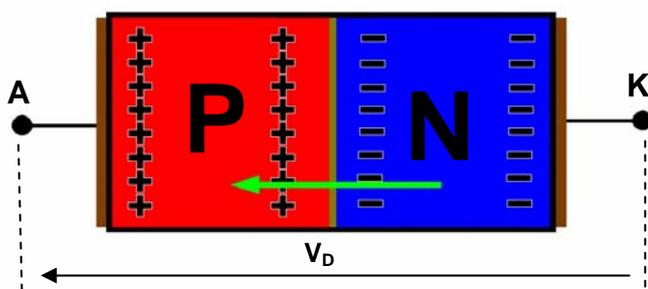


Fig. 6.3.1

- Une zone dopée N où les électrons sont majoritaires : c'est la cathode (K)
- Une zone dopée P où les trous sont majoritaires : c'est l'anode (A).

Pour que les électrons de la zone N se déplacent vers la zone P et rendent ainsi la diode conductrice, il faut leur donner une énergie minimum en appliquant une différence de potentiel positive suffisante entre les extrémités A et K du composant.

Remarque :

Une jonction PN ne peut être conductrice que dans un seul sens. Lorsqu'on applique une différence de potentiel négative entre les bornes A et K, il n'y a que très peu d'électrons qui peuvent se déplacer et le courant créé dans ce cas peut être considéré comme négligeable (quelques nano ampères).