

# Cours 7. Introduction des composants à semiconducteur

Par Dimitri GALAYKO  
Unité d'enseignement Élec-info  
pour master ACSI à l'UPMC

Octobre-décembre 2005

## 1 Rappel sur la structure atomique des iso- lants et des conducteurs

Pendant très longtemps les scientifiques croyaient que vis-à-vis de la *conduction électrique*, les matériaux se subdivisaient en deux classes – conducteurs et diélectriques (isolants). Cependant, vers 1830 on a découvert des matériaux dont les propriétés ne permettaient de les classer dans aucune de ces catégories. À l'état pur, ces matériaux étaient à la fois de mauvais conducteurs et de mauvais isolants : or leurs propriétés électriques, notamment la résistivité, variaient très sensiblement sous influence des facteurs extérieurs – de l'environnement (température, pression...), de la présence des impuretés, de la lumière, etc... En occupant une place intermédiaire entre les conducteurs et les isolants, ces matériaux ont été appelés « semiconducteurs ».

Pour comprendre la nature et les propriétés des semiconducteurs, il conviendrait de présenter un cycle de conférences sur la physique quantique et sur la physique des solides. Ici nous nous limitons par introduire, d'une manière très sommaire et simplifiée, quelques clés de compréhension du phénomène semiconducteur. Pour un traitement plus approfondi, nous recommandons de s'adresser à la littérature consacrée au traitement de ces sujets.

### 1.1 Structure d'un atome. Quantification des niveaux énergétiques et bandes d'énergie.

On sait que les éléments chimiques diffèrent par la structure de leurs atomes, notamment, par le nombre des électrons (particules élémentaires

chargées négativement), des protons (particules élémentaires avec une charge opposée à celle des électrons), et des neutrons (particules élémentaires électriquement neutres). Les deux dernières particules font partie du *noyau* d'un atome, les électrons gravitent autour du noyau.

La mécanique quantique explique et détaille la structure d'un atome isolé. Les équations de la mécanique quantique mettent en évidence une « quantification » des niveaux d'énergie des électrons dans un atome. Autrement dit, l'énergie d'un électron ne peut prendre que certaines valeurs qui dépendent de la configuration de l'atome. On parle des « couches énergétiques » d'un atome – niveaux de l'énergie autorisés pour les électrons. Le nombre des électrons sur une couche est limité (on verra plus tard pourquoi) : deux électrons sur la première couche (niveau d'énergie le plus bas), huit sur la deuxième, dix-huit sur la troisième etc... Le nombre total des électrons est déterminé par le nombre des protons dans le noyau (car l'atome est neutre) – ainsi, toutes les couches ne sont pas nécessairement remplies. *Les électrons remplissent les couches à partir de la couche à énergie la plus faible correspondant à la distance la plus petite du noyau.*

Dans les systèmes microscopiques, tels qu'un atome, on parle des *états quantiques* des particules. Le niveau d'énergie est seulement un des paramètres définissant l'état quantique. Au sein d'un atome, l'état quantique d'un électron est caractérisé par quatre nombres entiers dits *nombres quantiques* dont un exprime le niveau d'énergie, deux l'impulsion de l'électron et un le spin. Le fait que ces nombres sont entiers signifie que les grandeurs associées évoluent d'une manière discrète, *quantique*.

Les états énergétiques des électrons sont représentés sur un diagramme des énergies (figure 1) : c'est une carte de l'espace des énergies, avec l'indication des niveaux autorisés aux électrons. Notez que cette représentation n'a pas de lien avec la position spatiale des électrons (leurs coordonnées dans le réseau). On considère l'énergie d'un électron comme une quatrième dimension dans lequel un électron peut se déplacer, sous certaines conditions. Un exemple de tel déplacement est représenté sur la figure 1 : le diagramme indique une évolution de l'énergie de l'électron sans avoir une précision quand à ses coordonnées spatiales dans le corps.

Lorsque les atomes sont associés dans un réseau cristallin d'un corps solide, l'interaction entre les atomes modifie la distribution des états autorisés pour les électrons. Une modification des états est nécessaire en vertu du *principe d'exclusion* de Pauli<sup>1</sup>, selon lequel un système quantique ne peut pas contenir plusieurs particules ayant le même état quantique. Ainsi, dans

---

<sup>1</sup>Wolfgang Ernst Pauli, 1900-1958, physicien américain, prix Nobel en 1945, connu pour le principe d'exclusion en mécanique quantique

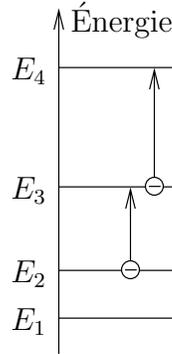


FIG. 1 – Exemple de représentation des niveaux discrets d'énergie.

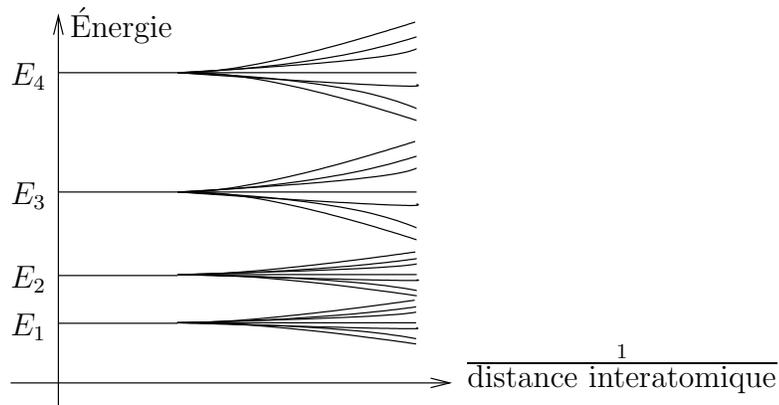


FIG. 2 – Diagramme des niveaux énergétiques dans un système composé de plusieurs atomes identiques, alignés et équidistants.

un système composé de plusieurs atomes, les états d'énergie des atomes individuels, initialement identiques, se séparent pour former des états multiples plus ou moins rapprochés (figure 2). Si le système est composé d'un très grand nombre d'atomes (c'est le cas de tous les cristaux de dimensions macroscopiques), les niveaux individuels se transforment en zones énergétiques avec un très grand nombre d'états très rapprochés – tellement que l'on peut parler d'un continuum énergétique (figure 3). On parle alors des *bandes d'énergie*.

Dans un corps solide, deux bandes sont particulièrement importantes pour la compréhension des phénomènes de conduction : la bande de conduction et bande de valence. La bande de conduction représente les énergies des électrons libres, dans la bande de valence se situent les électrons liés avec le réseau cristallin (figure 4).

Les bandes sont séparées par une *zone énergétique interdite* : c'est la plage des énergies que les électrons ne peuvent pas posséder. Cette zone,

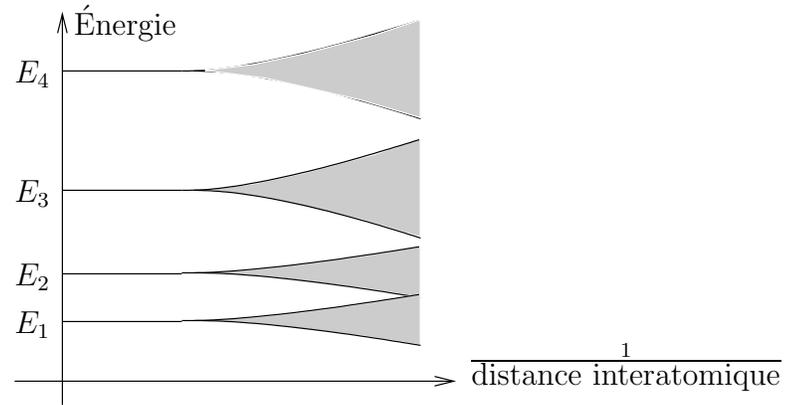


FIG. 3 – Apparition des bandes d'énergie dans un réseau cristallin.

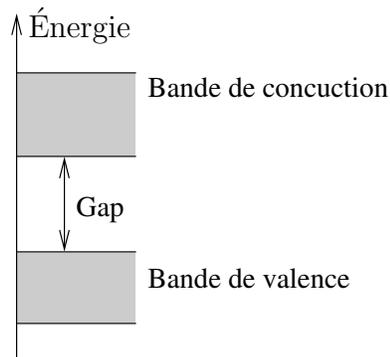


FIG. 4 – Représentation des bandes de conduction et de valence et la définition du gap du matériau.

aussi que sa largeur, s'appelle *gap énergétique*. C'est un paramètre propre du matériau (on parle d'un *gap du matériau*). Ainsi, les électrons peuvent passer directement de la bande de valence vers la bande de conduction – or pour cela il faut qu'ils acquièrent une énergie égale au moins à la largeur du gap. Il y a différents mécanismes par lesquels les électrons peuvent recevoir de l'énergie. Celui le plus courant est un échauffement : plus la température d'un corps est élevée, plus d'énergie possèdent les électrons, plus ils ont de chances de franchir le gap.

*La différence entre les propriétés conductives de différents matériaux est conditionnée par la structure des bandes énergétiques.*

## 1.2 Conducteurs, diélectriques et semiconducteurs

### 1.2.1 Conducteurs

À l'état d'équilibre les métaux sont des cristaux qui possèdent des électrons dans la bande de conduction. Deux cas sont possibles :

1) La bande de valence et la bande de conduction se recouvrent, *i.e.* le gap est négatif. C'est notamment le cas des métaux dit « de transition », par exemple, le cuivre. Les atomes de ces métaux ont un nombre d'électrons paire sur la couche périphérique.

2) Les bandes ne se recouvrent pas mais à l'équilibre il y a des électrons occupant des niveaux d'énergie dans la bande de conduction. Cependant, tous les niveaux de la bande ne doivent pas être remplis, sinon les électrons ne peuvent pas se déplacer librement<sup>2</sup>. C'est le cas des métaux alcalins et des métaux nobles.

Ainsi, à toute température, un conducteur possède des électrons libres en abondance. Sa résistance électrique est déterminée non pas par un manque de porteurs de charge, mais par la présence des ions du réseau faisant obstacle à la libre circulation des électrons. Ainsi, la résistance des métaux croît avec la température, car l'augmentation de l'amplitude des vibrations thermiques des ions augmente la probabilité de collision lors d'un déplacement orienté (un courant) des électrons.

### 1.2.2 Diélectriques et semiconducteurs

Dans le cas des diélectriques et des semiconducteurs, la bande de conduction se situe plus haut que la bande de valence et à température de zéro

---

<sup>2</sup>pour qu'un électron puisse se déplacer, il faut que le système possède des états quantiques vacants, inoccupés

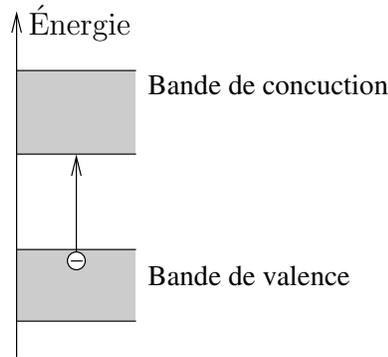


FIG. 5 – Passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction.

absolu (figure 5) tous les niveaux dans la bande de valence sont remplis. Ainsi, pour passer de la bande de valence vers la bande de conduction (*i.e.* se détacher de son atome), un électron doit posséder l'énergie égale à la largeur de gap. Le plus souvent l'énergie est transmise à l'électron par la voie thermique. Cependant, ce n'est pas le mécanisme unique : l'énergie peut avoir une origine optique, électrique (ionisation), radioactive...

Chez les diélectriques, le gap est élevé (5.2 eV pour le diamant<sup>3</sup>). Dans les conditions normales peu d'électrons sont capables de franchir ce gap, et presque tous les électrons restent dans la bande de valence. Dans un diélectrique il n'y a peu d'électrons libres.

Les semiconducteurs ressemblent aux diélectriques, seulement leur gap est beaucoup plus faible, généralement inférieur à 1.2 eV ( 1.1 eV pour silicium, 0.7 eV pour germanium). Ainsi, il suffit de communiquer aux électrons une très faible énergie pour qu'ils puissent franchir le gap et devenir libres. La quantité des électrons ayant franchi le gap dépend très fortement de la température (énergie que l'on a communiquée au corps de l'extérieur) : si cette énergie est nulle (température de zéro absolu), le semiconducteur est un diélectrique parfait, car tous les électrons se situent dans la bande de valence. Lorsque la température augmente, la quantité de porteurs libres croît sensiblement. Ainsi, *à la différence des métaux, la résistivité d'un semiconducteur diminue avec la température.*

<sup>3</sup>En physique atomique, l'énergie est souvent mesurée en électrons-volts. Un électron-volt est l'énergie qu'acquiert un électron en traversant une différence de potentiel de 1 Volt.

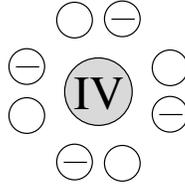


FIG. 6 – Structure d’un atome de semiconducteur.

*Le signe du coefficient thermique de résistivité (rapport entre l’incrément de la résistance et l’incrément de la température) est un des principaux indicateurs de la différence entre les métaux et les semiconducteurs.*

### 1.3 Semiconducteurs intrinsèques. Électrons et trous libres.

Un semiconducteur pur est appelé *semiconducteur intrinsèque*.

Les semiconducteurs ont une *valence* de IV : cela veut dire que la couche périphérique de leurs atomes contient 4 électrons. Au total, cette couche peut contenir 8 électrons, alors, 4 états de la couche sont vacants. On peut représenter l’atome du semiconducteur (par exemple, celui du silicium ou du germanium) par un diagramme de la figure 6. Ce diagramme représente le noyau de l’atome et la structure de couche périphérique ; les cercles blancs désignent les états vacants. Le nombre IV indique la valence de l’atome.

Pour s’allier dans un réseau cristallin, les atomes partagent chaque électron de la couche périphérique avec un des quatre atomes voisins ; de même, les quatre états vacants d’un atome sont occupés par les quatre électrons des quatre atomes voisins (figure 7).

Cette configuration résulte en une liaison covalente très solide, qui emploie tous les électrons ne laissant libre aucun. La figure 8 présente la géométrie tridimensionnelle du réseau cristallin d’un semiconducteur intrinsèque.

Que se passe-t-il lorsque dans un semiconducteur un électron passe de la bande de valence vers la bande de conduction ? Rappelons qu’à l’équilibre tous les états de la bande de valence sont occupés par les électrons, cela veut dire que tous les électrons du cristal sont liés au sein de leurs atomes.

Lorsque un électron franchit le gap et se retrouve dans la bande de conduction, il quitte son atome et se déplace librement à travers le réseau. Soumis à un champ électrique extérieur, cet électron se comporte comme un électron libre dans un conducteur : il se déplace dans le sens d’accroissement du po-

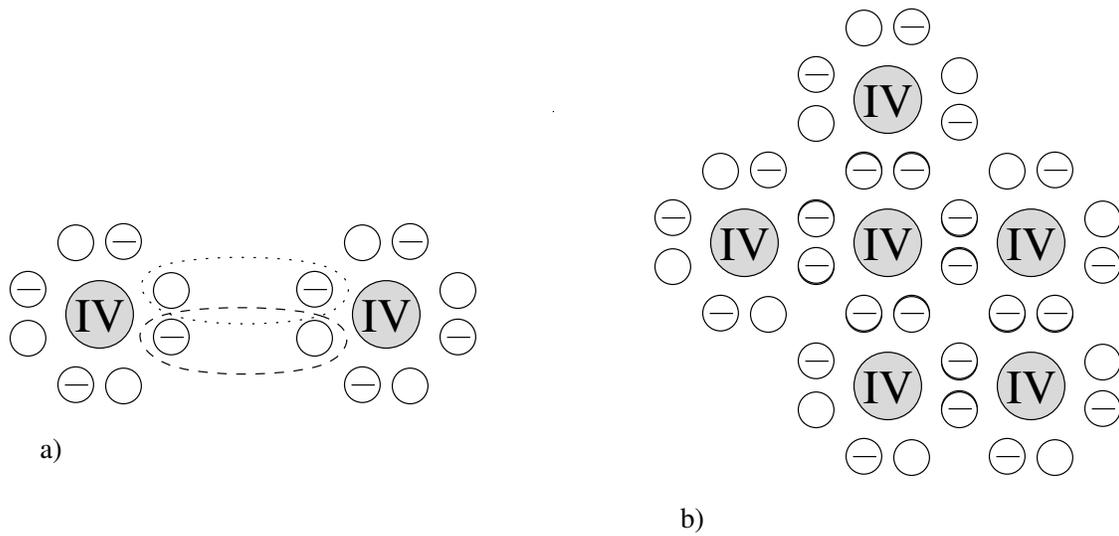


FIG. 7 – Liaison au sein du réseau cristallin d'un semiconducteur : a) liaison entre deux atomes voisins, b) structure du réseau.

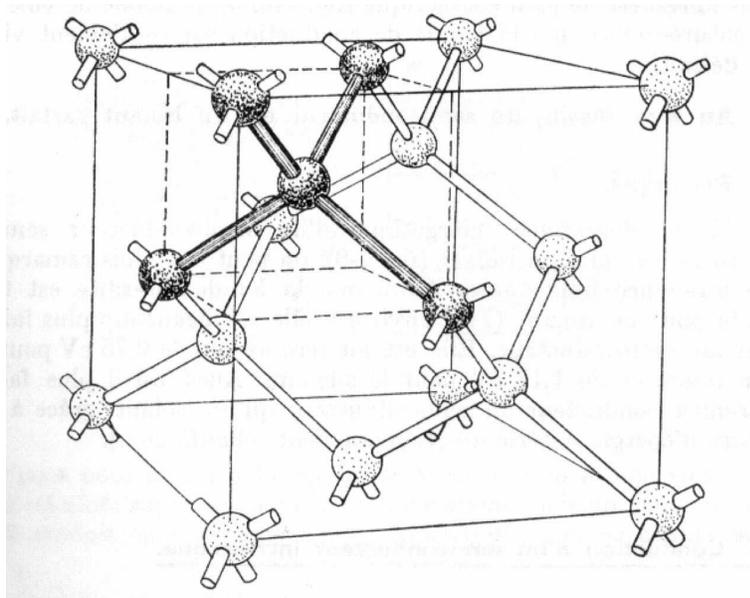


FIG. 8 – Structure tridimensionnelle du réseau cristallin du silicium, de type cubique à faces centrées. Une structure élémentaire du réseau, où un seul atome est lié à ces quatre voisins, est représentée en couleur foncée.

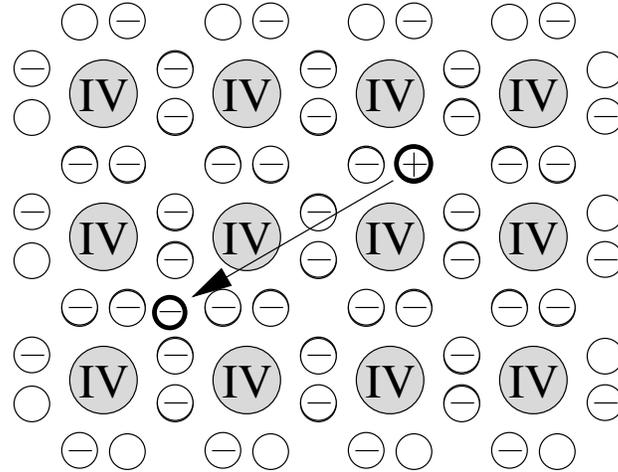


FIG. 9 – Apparition d’une paire « électron-trou » dans un semiconducteur intrinsèque.

tentiel du champ extérieur<sup>4</sup>.

Or à l’ancien emplacement de l’électron dans le réseau cristallin, il se produit un phénomène particulièrement intéressant. Lorsqu’un électron se détache, l’état énergétique dans la bande de valence se trouve inoccupé, et dans le réseau apparaît une lacune, un emplacement où il manque un électron. Cet emplacement exerce une attraction sur des électrons voisins du réseau : ainsi, un électron de la bande de valence, ayant une énergie proche de celle qui correspond à l’état inoccupé, peut y être capturé. À son tour, cet électron laisse son état libre : celui-ci peut capturer un autre électron, et ainsi de suite. De cette manière, un état vacant peut se propager à travers le cristal (figure 9).

En physique une telle lacune d’électron a reçu le nom « trou » (*hole* en anglais).

Lorsque un électron se détache de son emplacement, l’atome acquiert une charge positive (car il perd un électron chargé négativement). Ainsi, on peut considérer qu’un trou possède une charge positive. Sa propagation à travers le réseau cristallin fait propager cette charge, ainsi, le trou peut être apparenté à une charge positive élémentaire (chargée de  $+e$ <sup>5</sup>). Il s’agit d’une charge libre, car, comme on l’a vu, le trou n’est pas associé à un atome particulier. On peut également démontrer qu’un trou réagit à un champ électrique de la même manière qu’une charge positive : elle se déplace dans le sens de

<sup>4</sup>car il est chargé négativement

<sup>5</sup>On désigne par  $e$  le module de la charge élémentaire, la charge d’électron :  $e = 1.9 \cdot 10^{-19} C$

décroissement du potentiel.

*Ainsi, dans un semiconducteur pur, la conduction est assurée par les électrons et les trous. Les trous sont des lacunes d'électrons dans la bande de valence, qui peuvent attraper des électrons voisins. Ils manifestent toutes les propriétés d'une particule chargée positivement.*

La création des paires « électron-trou » se fait d'une manière spontanée, grâce au simple fait que l'énergie des électrons est non-nulle et que certains électrons peuvent franchir le gap. Or, on comprend, que si ce phénomène n'était pas limité, le nombre de porteurs de charge libres ne cesserait de croître. Cependant en pratique on observe un équilibre. Celui-ci est possible grâce au phénomène de *recombinaison*. Lorsqu'un électron libre rencontre un trou, il peut être capturé dans la case vacante représentée par ce trou ; cet incident fait disparaître deux charges libres car dorénavant, l'électron occupe une place « stable » dans le réseau cristallin. Dans ce cas on dit qu'un électron est *recombiné* avec un trou. Ainsi, à l'équilibre, en une unité de temps, le nombre de création des paires « électron-trou » est égal au nombre de recombinaisons.

Dans tous les cas, au sein d'un semiconducteur pur, le nombre de trous est forcément égal au nombre d'électrons libres. La concentration volumique des trous et des électrons dépend de la température et de la largeur du gap  $\Delta W$  :

$$p_i = n_i = AT^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (1)$$

où  $n_i$  et  $p_i$  sont les concentrations volumiques des électrons libres et des trous (les concentrations sont exprimés en nombre de porteurs en une unité de volume). L'indice  $i$  signifie qu'il s'agit des concentrations des porteurs dans un semiconducteur intrinsèque, pur.

À température ambiante, il y a relativement peu d'électrons libres dans un semiconducteur : pour un silicium,  $n_i = 1.5 \cdot 10^{16} m^{-3}$ , à comparer avec le cuivre pour lequel la concentration des électrons libres  $n$  vaut  $8.45 \cdot 10^{28} m^{-3}$ . La résistivité du silicium est d'autant plus grande. Ainsi, un semiconducteur intrinsèque est un très mauvais conducteur.

## 1.4 Semiconducteur extrinsèque

### 1.4.1 Semiconducteur de type n

Une introduction d'une très faible quantité d'impuretés dans un semiconducteur peut modifier très sensiblement ses propriétés électriques.

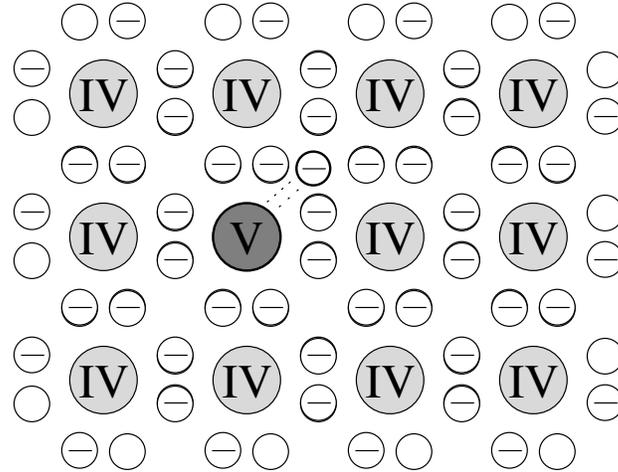


FIG. 10 – Semiconducteur dopé avec un élément de valence V.

Introduisons une quantité infime d'un élément de valence 5 dans le réseau cristallin du silicium (*i.e.* il possède cinq électrons sur la couche périphérique) – par exemple, de l'arsenic. Cela peut se faire par différents moyens – introduction au niveau de l'alliage, par diffusion, par une attaque plasma... Cette opération s'appelle « dopage d'un semiconducteur », l'élément que l'on introduit s'appelle « dopant », le semiconducteur après le dopage est dit « dopé ».

Dans ce cas certains atomes de silicium sont remplacés par les atomes du dopant. Puisque le dopage est faible, il y a peu d'atomes de dopant : la structure du cristal ne change pas, chaque atome de dopant est entouré par quatre atomes du semiconducteur d'origine. Or on sait qu'un seul électron de chaque atome est nécessaire pour effectuer une liaison covalente avec un autre atome. Donc, puisque le dopant a cinq électrons sur la couche périphérique, un électron est inoccupé : il peut se détacher très facilement (son détachement nécessite une énergie très faible, de l'ordre de 0.01 eV), il est alors un porteur de charge libre (figure 10). À la place de cet électron, une lacune se crée (chargée positivement). Néanmoins ce n'est pas un trou libre : l'énergie reçue par l'atome n'est pas suffisante pour capturer un électron appartenant un atome voisin. Cette lacune ne peut donc pas se propager.

Vu que l'énergie d'ionisation des atomes du dopant est très faible, à température ambiante, tous les atomes du dopant sont polarisés. Par conséquent, la concentration des électrons apportés par le dopant est égale à la concentration des atomes du dopant dans le semiconducteur. Il s'en suit qu'à température ambiante, les porteurs de charge d'un tel semiconducteur sont les trous et les électrons générés normalement à partir des atomes de silicium, auxquels s'ajoutent les électrons libres apportés par le dopant. En règle générale on

s'arrange pour que la concentration du dopant soit largement supérieure à la concentration des porteurs intrinsèques ( $n_i, p_i$ ). Dans ce cas la conductivité du semiconducteur est essentiellement assuré par les porteurs libres du dopant. La concentration typique des atomes de dopant ( $N_d$ ) se trouve dans la plage de  $10^{19} - 10^{23} m^{-3}$ , à comparer avec la concentration des porteurs intrinsèques du silicium à température ambiante ( $1.5 \cdot 10^{16} m^{-3}$ ),

Pour cette raison les électrons s'appellent « porteurs de charge majoritaires », alors que les trous « porteurs de charge minoritaires ».

Ainsi,

*un semiconducteur dopé se comporte comme un métal : le nombre de porteur de charges est quasi constant, dépend peu de la température et la concentration des charges est égal à la concentration du dopant. Pour cette raison un tel semiconducteur s'appelle extrinsèque.*

Un dopant de valence V s'appelle « donneur », car ses atomes rendent des électrons au réseau cristallin. Un semiconducteur dopé par un donneur s'appelle « de type n », l'appellation qui provient du mot *négatif* désignant le signe des charges majoritaires.

### 1.4.2 Semiconducteur de type p

Utilisons maintenant un matériau de valence III (par exemple, indium ou gallium) pour doper un semiconducteur intrinsèque. La situation est très similaire au cas précédent : puisqu'il y a peu d'atomes du dopant, la structure cristalline du semiconducteur n'est pas modifiée, tout simplement, certains atomes du semiconducteurs sont remplacés par les atomes du dopant, qui sont tous entourés par quatre atomes du semiconducteur. Or, le dopant ne possède que trois électrons de valence : un électron manque pour compléter la liaison. Ainsi, un emplacement dans le réseau est vacant : il attrape facilement un électron de l'atome voisin. Mais puisque tous les atomes sont neutres, à la place de cet électron capturé apparaît un trou mobile. À température normale tous les atomes du dopant allient un électron, en générant autant de trous mobiles que le nombre de ces atomes.

Si la concentration des atomes du dopant est largement supérieure à celle des porteurs libres intrinsèques, la concentration des charges libres est quasiment égale à la concentration des atomes du dopants, *i.e.* la conductivité est déterminée par la présence du dopant, (d'où l'appellation *semiconducteur extrinsèque*).

Les trous s'appellent les charges majoritaires, alors que les électrons sont les charges minoritaires.

Un dopant de valence III s'appelle « accepteur », car ses atomes allient des électrons du réseau cristallin. Un semiconducteur dopé par un accepteur s'appelle « de type  $p$  », ce qui vient du signe des charges majoritaires (*positif*).

### 1.4.3 Résumé : types de semiconducteurs

Nous savons maintenant distinguer trois types de semiconducteurs : intrinsèque, dopé  $n$  et dopé  $p$ .

Un semiconducteur intrinsèque est un très mauvais conducteur : il a peu d'utilité en tant que tel. En revanche, il sert pour base technologique lors de la fabrication des semiconducteurs extrinsèques. Un semiconducteur dopé, en revanche, possède des charges majoritaires en abondance : son comportement peut être apparenté à celui du métal. Cependant, il existe deux types de semiconducteur extrinsèque : dopé  $n$  et dopé  $p$ . Dans le premier cas la conduction est assurée par des charges négatives, dans le deuxième cas par les charges positives.

## 2 Diode $pn$

Une jonction  $pn$ , à la base d'une diode  $pn$ , est une structure la plus élémentaire de l'électronique (les éléments passifs – résistance, condensateur, inductance – sont souvent considérés comme ayant un rapport à l'électricité théorique ou à l'électrotechnique). Avant tout parce que la diode est un élément présentant une très forte non-linéarité, voire, une discontinuité dans ces caractéristiques – et ce sont de tels éléments dont on a besoin pour effectuer un traitement du signal évolué.

Le prédécesseur de la diode  $pn$  fut la diode à vide faisant partie de la famille des tubes électroniques. Elle possédait des propriétés très similaires, mais était beaucoup plus encombrante (des centimètres), et son fonctionnement nécessitait un échauffement à rouge de la cathode, afin d'autoriser une émission des électrons (on peut imaginer la consommation et le temps nécessaire pour la mise en route). La révolution dans l'électronique a pu être possible avec l'avènement des dispositifs à semiconducteurs.

### 2.1 Fonctionnement d'une jonction $pn$

Lors de l'aboutement de deux semiconducteurs de types différents, à l'absence de toute source d'énergie extérieure, les électrons surabondants de la partie  $n$  ont tendance à migrer vers la partie  $p$  : c'est le phénomène de la diffusion. Les électrons du côté  $n$  arrivés vers le côté  $p$  se recombinent avec les

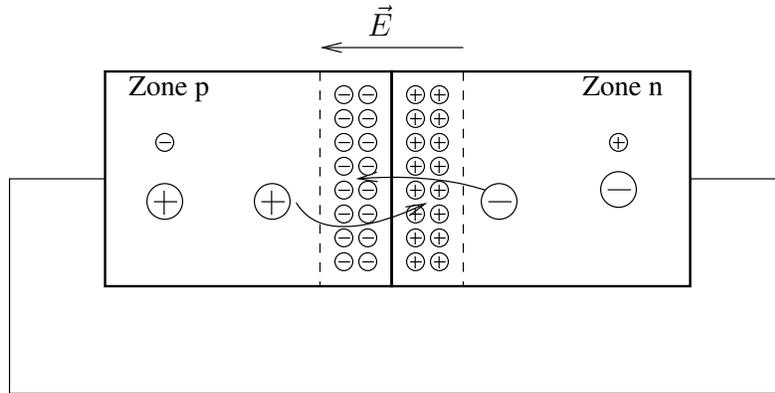


FIG. 11 – Jonction  $pn$  à l'équilibre. Les charges majoritaires sont représentés en grand. Le courant de diffusion montré par les flèches est neutralisé par le champ électrique  $\vec{E}$ .

trous, majoritaires du côté  $p$ , et restent ainsi fixés dans la partie  $p$  à proximité de l'interface (figure 11). Un phénomène inverse se produit avec les trous de la partie  $p$ . Le côté  $n$  se charge donc positivement, et le côté  $p$  négativement : un champ électrique se crée au niveau de l'interface. Ce champ s'oppose à la migration des charges majoritaires, en les repoussant de l'interface. Ainsi, la diffusion s'arrête à partir d'une certaine profondeur de pénétration des charges. Il existe donc, à l'équilibre thermodynamique (courant total nul), un champ électrique et donc une différence de potentiel entre la partie  $n$  et la partie  $p$  (dite potentiel de jonction) ; celle-ci est de l'ordre de 0,7 V pour les diodes à silicium, 0,3 V pour le germanium. Elle est plus importante pour les diodes électroluminescentes (LEDs).

Souvenons nous le tout premier cours sur les bases de l'électromagnétisme ; nous avons dit qu'un champ électrique ne peut pas exister à l'intérieur d'un conducteur, sauf à provoquer un courant très important. Puisqu'un champ existe dans une diode à l'équilibre, il faut conclure que la zone de l'interface (dans laquelle existe le champ) ne contient pas de charges libres. En effet, dans cette zone, par exemple, du côté  $n$ , les trous venus de la zone  $p$  ont été recombinaisonnés avec les électrons, de sorte à lier les deux charges libres. Cette zone s'appelle « zone de charge d'espace », « zone de transition ».

Ainsi, la zone de charge d'espace, se trouvant à proximité de l'interface entre les semiconducteurs, ne contient pas de charges libres.

Si maintenant on applique une tension positive côté  $n$  et négative côté  $p$  (dite *tension inverse*), la jonction se bloque davantage : les électrons du côté  $n$  sont attirés vers la borne positive de la source ; ils désertent l'interface  $pn$ . Un phénomène symétrique se produit côté  $p$  avec les trous. La zone de

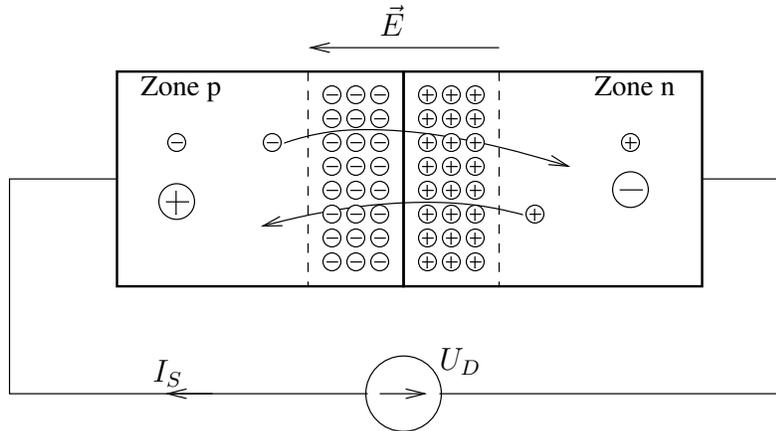


FIG. 12 – Diode bloquée : la zone de charge d’espace est plus large que dans une diode à l’état d’équilibre ; les porteurs majoritaires ne peuvent pas franchir le barrière de potentiel. Un très faible courant  $I_S$  (dit de saturation) est généré par le déplacement des charges minoritaires.

charge d’espace s’étend, les charges majoritaires ne peuvent pas traverser la jonction, la diode est dite « bloquée »(figure 12).

Cependant, le champ  $\vec{E}$  agit également sur les charges minoritaires : les trous de la zone  $n$  sont attirés vers la zone  $p$  et les électrons de la zone  $p$  vers la zone  $n$ . Ce déplacement des charges produit un courant. Néanmoins, on sait que la concentration des charges minoritaires dans un semiconducteur dopé est très faible. Ainsi, le courant des charges minoritaires, appelé « courant de saturation », est de l’ordre de picoampères ( $10^{-12}$  A). L’intensité de ce courant ne dépend pas de la tension inverse ; la valeur ne dépend que de la température et des paramètres technologiques de la diode.

Ainsi, le courant d’une diode bloquée est quasi nul.

En revanche, lorsque l’on applique une tension directe, c’est-à-dire une tension positive du côté  $p$  et négative du côté  $n$ , pourvu que cette tension soit supérieure à la barrière de potentiel présente à l’équilibre, le champ électrique ne retient plus le courant de diffusion, les électrons injectés du côté  $n$  franchissent l’interface  $np$  et terminent leur course soit en se recombinant avec des trous, soit à l’anode (l’électrode positive) : le courant circule, la diode est dite « passante ».

Le courant de la diode, que l’on définit positif lorsqu’il coule du côté  $p$  vers le côté  $n$ , est donné par l’expression suivante :

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{q}{kT} U} - 1 \right), \quad (2)$$

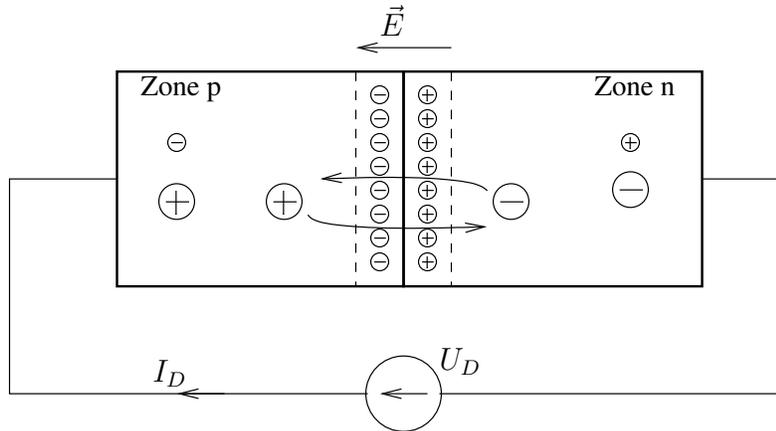


FIG. 13 – Diode polarisée en directe : la zone de charge d'espace est plus petite qu'à l'état d'équilibre, le champ de la jonction n'est plus suffisant pour neutraliser la diffusion des porteurs majoritaires. Un courant  $I_D$  généré par un déplacement des charges majoritaires apparaît. Le courant  $I_S$  (pas représenté), généré par les charges minoritaires, existe toujours, mais il est négligeable devant le courant  $I_D$  des charges majoritaires.

où  $q$  est le module de la charge d'électron,  $k$  est la constante de Boltzmann (constante universelle égale à  $1.38 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$ ),  $T$  est la température absolue,  $I_S$  est le courant de saturation qui dépend des paramètres des semiconducteurs composant la diode et de la température.  $U$  est la tension appliquée à la diode : elle est positive pour une diode polarisée en directe (*i.e.* le potentiel du côté  $p$  supérieur au potentiel du côté  $n$ ).

## 2.2 Diode $pn$ en tant qu'un composant électrique

Une diode est un élément dipôle, car elle est accessible par deux bornes. Son symbole est donné figure 14. L'électrode raccordée au semiconducteur  $p$  s'appelle « anode », l'électrode raccordée au semiconducteur  $n$  s'appelle « cathode ». Ces termes datent de l'époque où la fonction de la diode était réalisée à l'aide des lampes électroniques. En régime où la diode est passante, le potentiel de la cathode est plus petit que celui de l'anode.

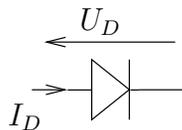


FIG. 14 – Symbole de la diode et convention pour le courant et la tension.

La caractéristique courant - tension de la diode est donné figure 15.

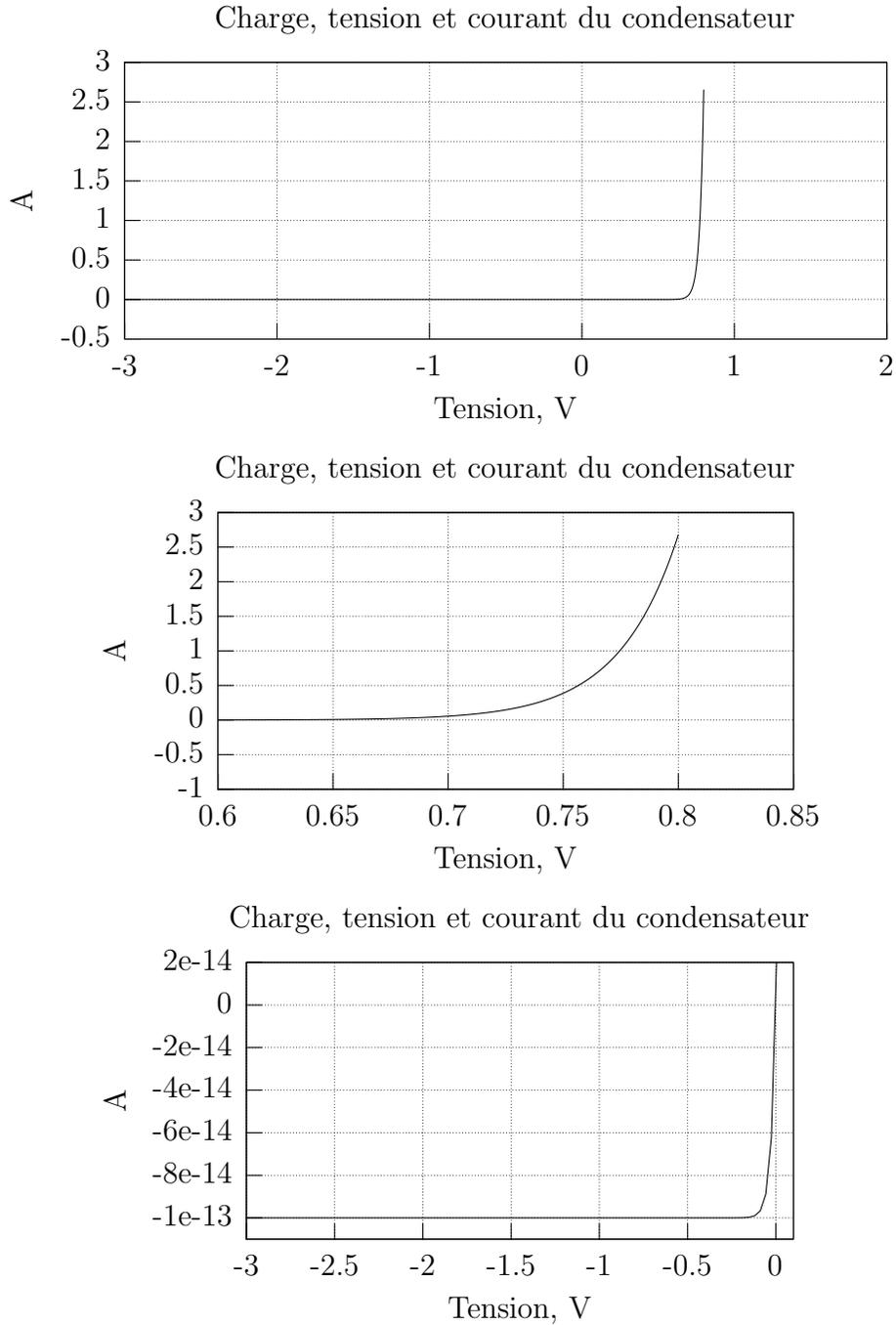


FIG. 15 – Caractéristique courant-tension d'une diode : vue globale et vue élargie sur la zone où la diode est passante et bloquée.