

ÉLECTRONIQUE

IUT 1^{re} année

Jean Duveau

Marcel Pasquinelli

Michel Tholomier

3^e édition

DUNOD

© Dunod, 2011, 2017, 2024

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-087330-2

Table des matières

Avant-propos	VIII
 Chapitre 1. Les fondements du génie électronique	 1
1.1 Les semi-conducteurs (SC)	1
1.1.1 Comment définir un SC ?	1
1.1.2 Le monde du silicium	3
1.1.3 Les différents types de semi-conducteurs	5
1.1.4 Les concentrations de porteurs	10
1.2 Phénomènes de transport et courant électrique	12
1.2.1 Influence de la température	12
1.2.2 Influence d'un champ électrique : la conduction	13
1.2.3 Influence de la concentration : la diffusion	14
1.2.4 Cas général	15
1.3 Modélisation du retour à l'équilibre	15
1.3.1 Présentation	15
1.3.2 Les niveaux d'injection dans un semi-conducteur	16
1.3.3 Hypothèse des fortes injections	18
1.3.4 Le retour à l'équilibre et la recombinaison	19
1.4 Le composant	24
1.4.1 Composants bipolaires et unipolaires	24
1.4.2 L'électricien, l'électronicien et le physicien : une communication difficile	25
 Chapitre 2. Les fonctions du génie électronique	 28
2.1 Éléments de modélisation : signaux et sources	28
2.1.1 Grandeur électrique et signaux : classification fonctionnelle	28
2.1.2 Les différents types de signaux	29

2.1.3	Signal analogique et numérique : origine et transmission	33
2.1.4	Générateurs de signal ou d'énergie	34
2.1.5	Caractéristiques des sources	37
2.2	Les fonctions du traitement des sources du signal	41
2.3	Les fonctions du traitement des sources d'énergie	43
2.4	Le matériel	44
2.4.1	Schéma de principe	44
2.4.2	Composant et convertisseur	45
Chapitre 3.	De la modélisation et des modèles en électronique	48
3.1	La modélisation	48
3.1.1	Les objectifs de la modélisation	48
3.1.2	Propriétés générales des modèles	49
3.1.3	Les différents types de modèles : de la connaissance au comportement	50
3.2	Modèles circuit et approximation des régimes quasi stationnaires	51
3.2.1	Présentation	51
3.2.2	Circuits à constantes localisées	52
3.2.3	Hypothèse des régimes quasi stationnaire et conséquences	52
3.2.4	Circuits à constantes réparties	53
3.3	Les différents types de modèles de connaissance	57
3.3.1	Représentation par variables externes : équation différentielle entrée/sortie	57
3.3.2	Représentation par variables internes : équation d'état	72
3.4	Modèle comportemental des composants SC	73
3.4.1	Les composants SC et la modélisation par quadripôles	73
3.4.2	Modélisation par quadripôle : description par variables externes	74
3.4.3	Le quadripôle vu de l'extérieur	77
3.5	Des modèles, de la technique et du métier	77
Chapitre 4.	Les composants semi-conducteurs	80
4.1	Utilisation des composants SC	80
4.1.1	Utilisation et modes de fonctionnement	81
4.1.2	Amplification et mode linéaire	83
4.1.3	Commutation et mode non linéaire	84
4.2	La diode	89
4.2.1	À quoi ça sert ?	89
4.2.2	De la jonction PN à la diode	89

Chapitre 5. Composants semi-conducteurs : les transistors	105
5.1 Le transistor bipolaire	105
5.1.1 À quoi ça sert ?	105
5.1.2 Présentation	105
5.1.3 Comment c'est fait et comment ça marche ? : technologie et principe	107
5.1.4 Régime statique	109
5.1.5 Mise en œuvre du transistor bipolaire	113
5.2 Transistors à effet de champ	127
5.2.1 À quoi ça sert ?	127
5.2.2 Qu'est-ce que c'est, comment c'est fait et comment ça marche ?	127
5.2.3 Les composants à effet de champ à grille isolée	129
5.2.4 Mise en œuvre du MOS « signal »	138
 Chapitre 6. Circuits de base à éléments discrets	 143
6.1 Circuits à composants passifs	143
6.1.1 Circuit CR et RL	143
6.1.2 Circuit LC	148
6.2 Circuits à composants semi-conducteurs	150
6.2.1 Associations de composants	150
6.2.2 Référence de tension	150
6.2.3 Source et référence de courant	152
6.2.4 Miroirs de courant	157
6.2.5 Amplificateur de différence ou amplificateur différentiel	159
6.2.6 Montage cascode	163
6.2.7 Étage suiveur de White	164
6.2.8 Montage <i>totem-pole</i>	166
6.2.9 Montage <i>push-pull</i>	167
6.2.10 Montage Darlington	168
6.2.11 IGBT	171
 Chapitre 7. Bouclage et techniques de réaction des amplificateurs	 174
7.1 Le bouclage des amplificateurs	174
7.1.1 Pourquoi boucler un amplificateur ? La réaction négative ou contre-réaction	174
7.1.2 La réaction positive : l'effet cumulatif et ses applications	176
7.1.3 Les différents types de contre-réactions	177

7.1.4	Des modèles au réel : le problème du découplage amplificateur/réseau de réaction	179
7.2	La réaction de tension série	197
7.2.1	Principe	197
7.2.2	Influence sur les paramètres caractéristiques	198
7.3	Réaction parallèle-parallèle ou parallèle	207
7.3.1	Principe	207
7.3.2	Influence sur les paramètres caractéristiques	207
Chapitre 8.	L'amplificateur opérationnel	211
8.1	Présentation	211
8.1.1	De la structure... ..	212
8.1.2	... à l'amplificateur idéal	213
8.1.3	Caractéristiques électriques d'un amplificateur réel	213
8.2	Analyse des propriétés électriques des amplificateurs bouclés	215
8.2.1	Régime statique	215
8.2.2	Erreurs de calcul	217
8.2.3	Le régime dynamique	220
Chapitre 9.	Applications de l'amplificateur opérationnel	232
9.1	Applications en régime linéaire	232
9.1.1	Méthodes de calcul et applications	232
9.1.2	Mise en œuvre de l'amplificateur opérationnel	233
9.1.3	Applications linéaires	234
9.2	Applications en régime non linéaire	253
9.2.1	La fonction comparateur/discriminateur en boucle ouverte	253
9.2.2	La fonction sélecteur de bande (<i>window comparator</i>)	254
9.2.3	La fonction comparateur à hystérésis ou <i>trigger</i> de Schmitt	255
9.2.4	Le multivibrateur astable	257
Chapitre 10.	Notions générales en conversion et traitement numérique du signal	259
10.1	Du continu au discontinu, de l'analogique au numérique	259
10.1.1	Présentation	259
10.1.2	Les différents types de signaux	260
10.1.3	Les différentes variables d'étude	261
10.1.4	Des méthodes aux notions de base sur les circuits	261

10.2	Discrétisation du temps : l'échantillonnage	264
10.2.1	Présentation	264
10.2.2	Les différentes méthodes d'échantillonnage régulier	265
10.2.3	Échantillonnage de Nyquist ou en bande de base	265
10.2.4	Le sous-échantillonnage (Undersampling) ou échantillonnage de bande	274
10.2.5	Le suréchantillonnage (Oversampling)	277
10.2.6	Les problèmes communs	278
10.2.7	Domaines d'application des différentes méthodes d'échantillonnage	282
10.3	Discrétisation de l'amplitude : la quantification scalaire	282
10.3.1	Présentation	282
10.3.2	Quantification scalaire uniforme	283
10.3.3	De la quantification à l'encodage	284
10.3.4	Caractéristique de transfert : non linéarité différentielle et intégrale	287
10.3.5	De l'erreur de quantification au bruit de quantification	288
10.3.6	Rapport (signal/bruit de quantification) maximal	291
10.3.7	Problème : que faire pour des signaux présentant une grande dynamique ?	292
	Index	295



Avant-propos

Qu'est-ce que le génie électronique ?

Nous définirons le génie électronique par l'ensemble des applications (industrielles, grand public ou autre) utilisant des **composants semi-conducteurs**.

Ainsi, ce sont les principes physiques de fonctionnement, les propriétés des matériaux semi-conducteurs, le savoir-faire propre aux différentes technologies de fabrication, les caractéristiques électriques des composants, élémentaires ou complexes, qui détermineront les potentialités et les performances des applications, quel que soit le domaine applicatif concerné.

À qui s'adresse ce livre ?

Ce livre regroupe en un seul document les « fondamentaux » physiques, technologiques et techniques concernant la mise en œuvre et les applications des composants semi-conducteurs usuels. Basé sur le programme du premier semestre de la filière GEII, chaque chapitre contient :

- une partie cours illustrée par des ordres de grandeur, des références de composants, les domaines d'application ;
- des exercices d'application intégrés ;
- des corrigés détaillés privilégiant une approche physique et circuit des exercices : analyse intuitive et compréhension des phénomènes, mise en équation, interprétation...

Ce livre s'adresse de façon privilégiée aux étudiants d'IUT. Il peut permettre par ailleurs à des étudiants de 1^{er} cycle ou d'écoles d'ingénieurs d'acquérir, selon les cas, des connaissances physiques et technologiques complémentaires leur permettant de mieux appréhender les conditions et limites de fonctionnement des composants, ou le « savoir-faire » indispensable pour la bonne mise en œuvre de ces derniers.

Les fondements du génie électronique

1

Objectifs

- Connaître les différences entre composants bipolaires et unipolaires.
- Connaître quelques ordres de grandeur sur le monde du silicium.
- Comprendre les notions d'injection faible et forte.
- Savoir ce que veut dire charge stockée.
- Avoir une vision d'ensemble des différents aspects physiques qui sont à la base des composants semi-conducteurs.

Conseils

- Faire preuve de curiosité mais aussi d'esprit critique dans la lecture d'articles de vulgarisation, de publicités sur des composants semi-conducteurs (les performances des derniers microprocesseurs...).
- Prendre l'habitude de chercher à vérifier les ordres de grandeur...

1.1 LES SEMI-CONDUCTEURS (SC)

Les semi-conducteurs peuvent être :

- des éléments simples : le silicium, le germanium ;
- des composés binaires : l'arséniure de gallium (AsGa), le carbure de silicium (SiC) ;
- des composés ternaires : le mercure cadmium tellure ou HgCdTe.

Le SC le plus répandu dans le domaine des composants est le silicium.

1.1.1 Comment définir un SC ?

a) Au niveau macroscopique : par sa résistivité ρ

Sa résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants.

Conducteurs	$\rho < 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$
Isolants	$\rho > 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$
Semi-conducteurs	$10^{-4} \Omega \cdot \text{m} < \rho < 10^7 \Omega \cdot \text{m}$

Si l'on précise les matériaux et les valeurs typiques associés, on trouve à titre d'exemple les ordres de grandeur suivants :

Les « bons » conducteurs	Les « bons » isolants
Argent : $1,63 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$, Cuivre : $1,71 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$, Aluminium : $2,73 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$	Caoutchouc : $6,25 \cdot 10^{14} \Omega \cdot m$, Plexiglas : $10^{13} \Omega \cdot m$



Quant aux semi-conducteurs, les matériaux de base utilisés habituellement en technologie pour la fabrication des composants présentent des résistivités maximales qui vont sensiblement de $10^{-2} \Omega \cdot m$ pour des composants de signal à $1 \Omega \cdot m$ pour des composants de puissance.

Nota

On rencontre souvent la résistivité exprimée en $\Omega \cdot cm$, la conversion est simple : $1 \Omega \cdot cm = 10^{-2} \Omega \cdot m$ ou $1 \Omega \cdot m = 10^2 \Omega \cdot cm$.

Sa résistivité varie très fortement en fonction des impuretés dopantes qu'il renferme en diminuant d'autant plus que la concentration d'impuretés est élevée.

Ainsi pour le silicium, la résistivité varie à température ambiante de $10 \Omega \cdot m$ à $10^{-5} \Omega \cdot m$ pour une concentration d'impuretés (le bore) variant de 10^{14} à 10^{20} atomes par cm^3 .



Le SC est également très sensible à la température : nous en reparlerons.

b) Au niveau microscopique : par ses porteurs libres et leur mode de transport

À la différence d'un conducteur, dans un SC la circulation du courant ne correspond pas à un déplacement d'ensemble d'un seul type de porteurs – les électrons – mais de deux types de porteurs :

- des charges réelles : **des électrons libres** ;
- des charges fictives équivalentes : **les trous**.

De plus, alors que dans un conducteur le courant est dû à un transport d'électrons sous l'effet du seul champ électrique, dans un SC le courant est créé par le déplacement de ces deux types de porteurs sous l'effet de deux actions :

- la **conduction** sous l'effet d'un champ électrique caractéristique d'un déséquilibre de potentiel ;
- la **diffusion** sous l'effet d'un déséquilibre de concentration.

1.1.2 Le monde du silicium

a) Du modèle planétaire de Rutherford (1911)...

L'atome de silicium est constitué de 14 protons et 14 électrons tournant sur des couches circulaires notées K, L, M... Les couches se décomposent en sous-couches, chaque couche (et sous-couche) correspondant à une énergie bien particulière des électrons situés sur cette couche (ou sous-couche). Les énergies des électrons ne peuvent donc être que discrètes. Les électrons situés sur les couches internes sont des électrons « de cœur », fortement liés au noyau (couche K : énergie liaison = 1 839 eV : l'électron-volt correspondant à l'énergie cinétique acquise par un électron initialement au repos, soumis à une différence de potentiel de 1 V. C'est une unité d'usage de la physique atomique et l'équivalence électronvolt-joule est donnée par : $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Les électrons de la couche externe sont très faiblement liés (énergie de liaison couche $M_{III} = 3 \text{ eV}$), qui plus est cette couche externe ne comporte que 4 électrons périphériques alors qu'elle pourrait en comporter 8.

b)... à la mécanique quantique

Le matériau silicium, c'est 5×10^{22} atomes par cm^3 disposés périodiquement dans l'espace d'une façon déterminée par la répétition périodique d'un motif particulier d'atomes appelé maille. D'un point de vue cristallographique, le silicium correspond à une maille particulière dite maille « diamant » résultant de 2 cubes imbriqués l'un dans l'autre (figure 1.1a). La dimension de l'arête d'un cube est de 0,543 nm ; chaque atome de silicium est entouré de 4 voisins distants de 0,235 nm.

Les électrons externes de chaque atome sont liés aux autres électrons par une liaison particulière dite liaison *covalente*. Chaque atome partage ses différents électrons externes avec quatre atomes voisins pour former quatre « doublets » : on aboutit ainsi à une liaison qui permet d'obtenir la forme d'orbite la plus stable. Ces liaisons covalentes possèdent une orientation spatiale bien définie matérialisée par les liens du modèle à sphère atomique de la figure 1.1a.



Question rouge

La donnée de la valeur a de l'arête du cube de silicium peut sembler superflue, sauf que... Le développement des technologies de fabrication conduit à des composants « grand public », tels les microprocesseurs utilisés dans les ordinateurs personnels, qui présentent une zone active dont la dimension de « gravure » est voisine d'une centaine de fois la valeur de l'arête du cube de silicium... Dans les années 2000, les dimensions de « gravure » des circuits se situaient dans la gamme 150 nm-180 nm, dans les années 2007, on atteint déjà 45 nm... Actuellement les dernières technologies double cœur se situent dans la gamme de 32 nm. On cherche encore et toujours à réduire cette dimension...

Dans un matériau cristallin, l'arrangement spatial périodique fait que l'on passe d'électrons possédant des niveaux discrets d'énergies (figure 1.1b), comme dans le cas de l'atome de silicium isolé, à des **bandes** d'énergie permises séparées par des bandes d'énergie interdites (figure 1.1c). Les électrons les plus liés aux noyaux restent relativement peu sensibles à l'influence du potentiel des atomes voisins : ils donnent naissance à des bandes étroites. Les électrons les moins liés aux atomes de silicium donnent naissance à des bandes énergétiques plus larges (c'est la mécanique quantique qui permet la modélisation des bandes...).

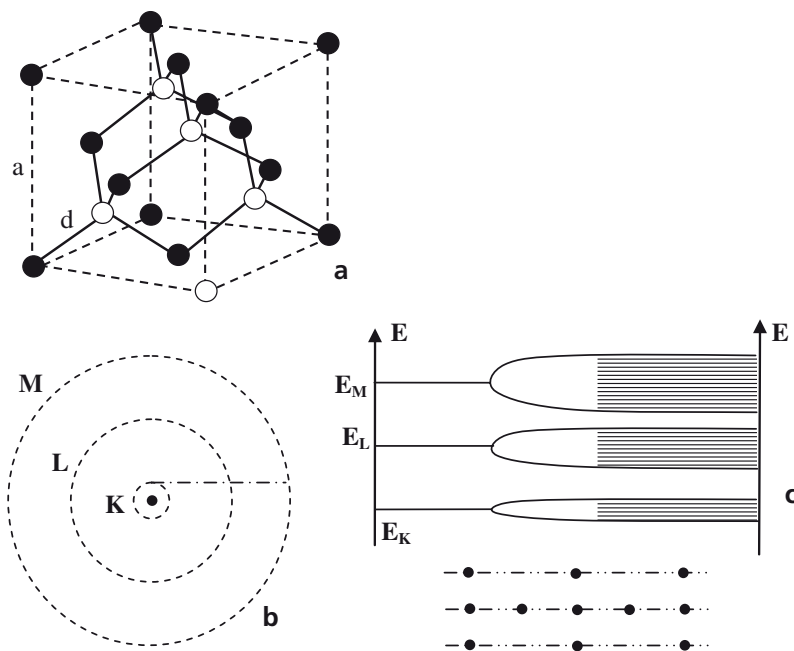


Figure 1.1 a) Structure cristallographique du silicium : la maille diamant. b) L'atome. c) Le cristal.

Les deux dernières bandes correspondent respectivement à la bande de conduction et à la bande de valence : elles sont séparées par une bande d'énergie interdite de largeur caractéristique de 1,12 eV (figure 1.2).

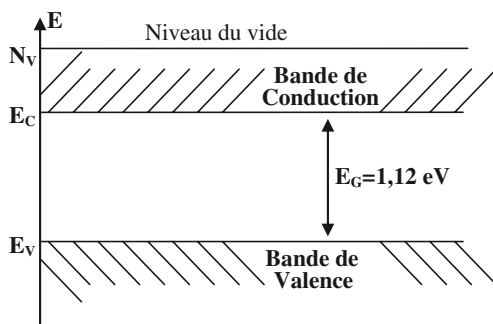


Figure 1.2 Schéma des bandes d'énergie du silicium.

1.1.3 Les différents types de semi-conducteurs

a) *Semi-conducteur intrinsèque*

Définition

On appelle *semi-conducteur intrinsèque* un SC parfait ne contenant aucun défaut physique ni *aucune impureté chimique* : ses propriétés et ses caractéristiques sont dues uniquement au semi-conducteur lui-même.

Au niveau macroscopique, l'ordre de grandeur de la résistivité du silicium intrinsèque est de $2,4 \cdot 10^3 \Omega \cdot m$ à température ambiante.

Électrons et trous

Le silicium intrinsèque est un isolant à 0 K et aux très basses températures : (la relation de conversion d'unité de la température exprimée en kelvins est donnée par : $T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15$).

À *température ambiante*, l'agitation thermique conduit à la rupture d'un certain nombre de liaisons covalentes. Les électrons quittent alors l'atome auquel ils étaient liés pour se déplacer de façon aléatoire, au gré des chocs atomiques, dans le cristal. L'atome présente alors une charge globale positive $+q$ du fait de la perte d'un électron. Un électron voisin de la liaison rompue peut, sous l'effet de l'agitation thermique, venir « occuper » cette liaison laissée libre en laissant à son tour une liaison inoccupée. Ce processus se répète de proche en proche dans tout le cristal.

Tout se passe donc comme si une charge positive $+q$ se déplaçait dans le réseau cristallin. Cette charge positive fictive porte le nom de **trou** et il est possible de déduire l'ordre de grandeur de sa masse à partir de concepts usuels telle la loi fondamentale de la dynamique. En première approche on peut supposer que la masse du trou est sensiblement du même ordre de grandeur que la masse de l'électron.

Dans la représentation par bandes d'énergie, l'interprétation de la rupture d'une liaison correspond au passage, grâce à un apport d'énergie suffisant, d'un électron de la bande de valence dans laquelle il était lié à l'atome, à un niveau de la bande de conduction. Dans cette bande de conduction, partiellement remplie, l'énergie de l'électron peut varier par exemple sous l'influence d'un champ électrique. Dans la bande de valence, le trou représente un niveau énergétique libre qui peut être occupé par un électron situé sur un autre niveau d'énergie de cette bande : le trou peut donc se déplacer sur n'importe quel niveau de la bande de valence.

La rupture des liaisons covalentes est un phénomène statistique très sensible à la température. La conduction intrinsèque entraîne une diminution de la résistivité du matériau lorsque la température augmente. Ce phénomène est toujours prépondérant sur tous les mécanismes de variation contrôlée de la résistivité aux températures élevées.

En résumé, la rupture d'une liaison covalente sous l'effet de l'agitation thermique entraîne ainsi la **création d'une paire électron-trou**. La concentration n en électrons libres est égale à la concentration p de trous, soit :

$$n = p = n_i$$

n_i étant la concentration intrinsèque, caractéristique du SC.



Pour le silicium :

$n_i = 1,45 \cdot 10^{10}$ porteurs par cm^3 à température ambiante.

n_i double environ tous les 11 °C.

b) Dopage et semi-conducteur extrinsèque

Le dopage

Le dopage consiste à introduire de façon contrôlée des impuretés spécifiques dans un SC intrinsèque, ou aussi proche que possible du SC intrinsèque, de façon à faire varier sa résistivité et à l'adapter aux nécessités technologiques de la fabrication des composants (le matériau de base n'a pas la même résistivité dans un transistor petit signal que dans un transistor haute tension...). On fabrique ainsi un nouveau SC appelé « SC extrinsèque ».



Question rouge

Pour maîtriser l'introduction contrôlée d'impuretés, il faut maîtriser le « nettoyage » contrôlé de toutes les impuretés non désirées : les salles « blanches » ou « propres » sont un élément essentiel de la technologie de fabrication. La dénomination de ces salles a beaucoup varié selon que l'on utilise les normes américaines (*Federal Standard* – FS) ou les normes européennes (ISO). À titre indicatif, une salle ISO 3 (classe identique à la classe 1 de la norme FS 209) contient moins de 1 000 particules de taille inférieure ou égale à 0,1 μm par m^3 .

Le choix des dopants repose sur de nombreux critères. Il faut :

- introduire des atomes dont le mode de liaison chimique soit compatible avec celui du SC initial ;
- que les atomes dopants occupent sensiblement le même volume que les atomes de silicium initiaux (sinon il y a risque de tensions mécaniques internes dans le matériau : cela casse...) ;
- ne pas introduire trop d'atomes dopants (sinon la répartition des atomes dopants ne se fera plus d'une façon homogène mais par petits « tas » qu'on appelle des précipités).

La gamme des concentrations de dopants s'étend de $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^3$ à $5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^3$ environ. On trouve ainsi selon les cas un atome dopant tous les... dix milliards d'atomes de silicium à un atome étranger tous les 100 atomes de silicium. Même dans le premier cas, cela suffit pour modifier de façon très importante les propriétés électriques du silicium.

Semi-conducteur extrinsèque type N

On introduit des impuretés donatrices dites « du groupe V », tels le phosphore, l'arsenic, etc., qui possèdent cinq électrons périphériques (figure 1.3a). Quatre seront partagés avec les atomes de silicium les plus proches. Que devient le dernier ? Le dernier, très faiblement lié, est délocalisé (il « appartient » en commun à beaucoup d'atomes...) Sous l'influence de l'agitation thermique, il aura fortement tendance à quitter son orbite et à se « promener » librement dans le cristal. Comme il ne participait pas initialement à une liaison, la création de cet électron « voyageur » n'entraîne pas l'apparition de trou.

Cet électron très faiblement lié correspond à la création de niveaux énergétiques spécifiques situés dans la bande d'énergie interdite : à 45 meV et 49 meV en dessous du niveau E_c du bas de la bande de conduction respectivement pour le phosphore et l'arsenic (figure 1.3b).

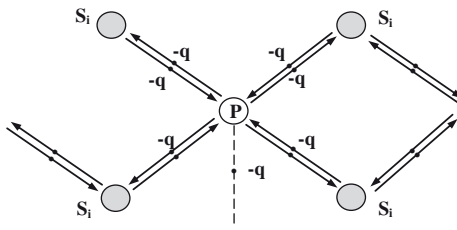


Figure 1.3a Semi-conducteur de type N.

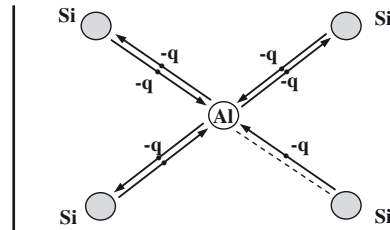


Figure 1.4a Semi-conducteur de type P.

À température ambiante, l'énergie de liaison de ces électrons faiblement liés est ainsi du même ordre de grandeur que l'unité de tension thermodynamique de Boltzmann (pour simplifier, nous utiliserons l'expression *unité de tension thermodynamique* dans la suite du livre) :

$$V_T = kT/q = 25,25 \text{ mV à } 20^\circ \text{C.}$$

avec :

k : constante de Boltzman ($k = 1,380 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)

T : température absolue exprimée en K

q : charge de l'électron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

C'est pourquoi on suppose habituellement (effet statistique avec loi exponentielle) *qu'à température ambiante tous les atomes donneurs sont ionisés* (c'est l'hypothèse d'ionisation totale) de sorte que le nombre d'électrons libres n_N créé par ce mécanisme est tel que :

$$n_N = N_d$$

N_d : désignant la concentration des atomes donneurs.