

ÉLECTRONIQUE

IUT 1^{re} année

**Jean Duveau
Marcel Pasquinelli
Michel Tholomier**

3^e édition

DUNOD

NOUS NOUS ENGAGEONS EN FAVEUR DE L'ENVIRONNEMENT :



Nos livres sont imprimés sur des papiers certifiés pour réduire notre impact sur l'environnement.



Le format de nos ouvrages est pensé afin d'optimiser l'utilisation du papier.



Depuis plus de 30 ans, nous imprimons 70 % de nos livres en France et 25 % en Europe et nous mettons tout en œuvre pour augmenter cet engagement auprès des imprimeurs français.



Nous limitons l'utilisation du plastique sur nos ouvrages (film sur les couvertures et les livres).

© Dunod, 2011, 2017, 2024

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

ISBN 978-2-10-086605-2

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

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...).

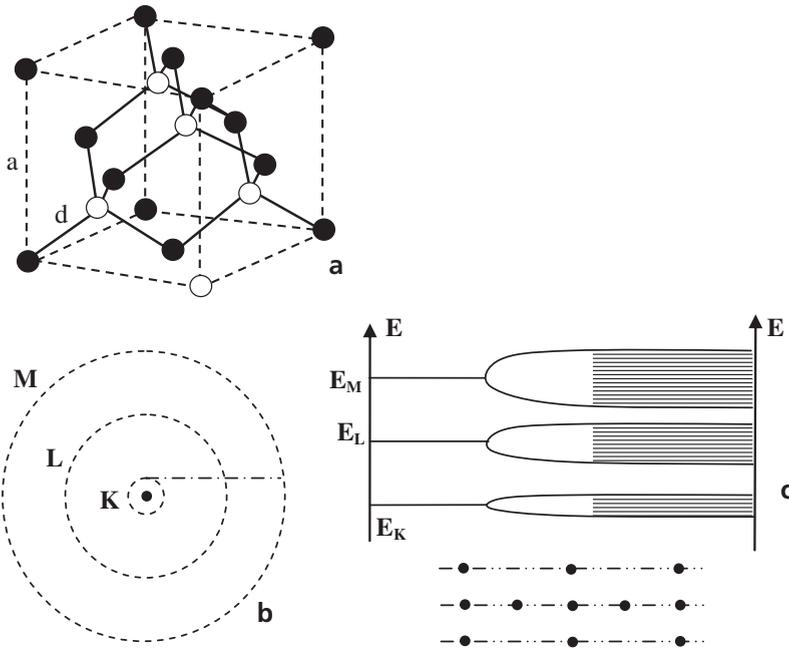


Figure 1.1 a) Structure cristallographique du silicium : la maille diamant. b) L'atome. c) Le cristal.

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).

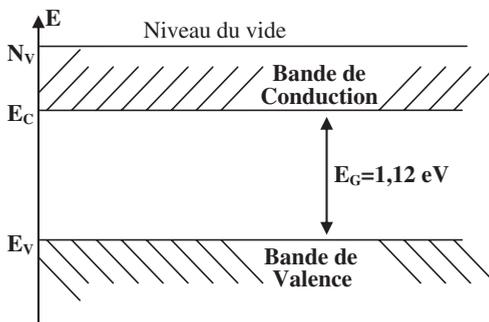


Figure 1.2 Schéma des bandes d'énergie du silicium.

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).

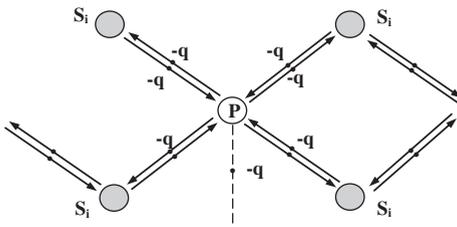


Figure 1.3a Semi-conducteur de type N.

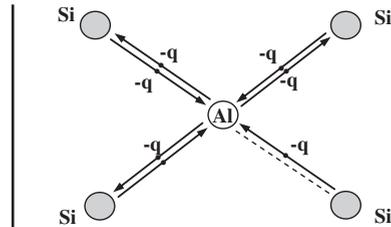


Figure 1.4a Semi-conducteur de type P.

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) :

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

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.

Le noyau de l'atome donneur conserve évidemment ses 5 charges $+q$, dont 4 sont toujours neutralisées par les liaisons covalentes. Globalement il se comporte donc comme une charge fixe $+q$. Cette charge ne pourra pas participer au transport du courant électrique, elle représente par contre une certaine charge fixe dans l'espace.

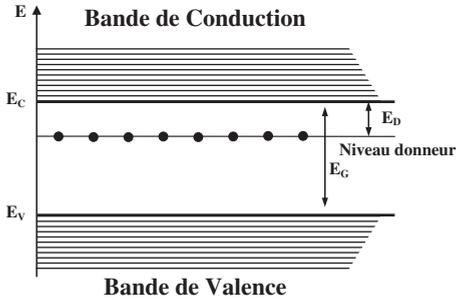


Figure 1.3b Bandes d'énergie dans un SC de type N.

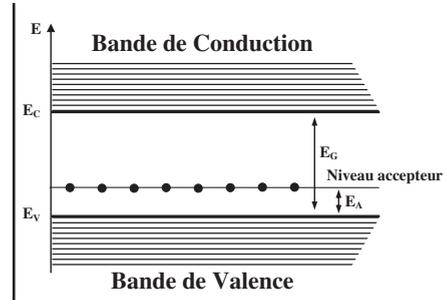


Figure 1.4b Bande d'énergie dans un SC de type P.

Il y a toujours parallèlement création de paires électrons trous par agitation thermique, mais comme la concentration d'atomes donneurs est très supérieure à la concentration intrinsèque n_i ($N_d \gg n_i$), les électrons libres sont très largement *majoritaires* dans le matériau de sorte que l'on peut écrire :

$$n_N \gg p_N$$

p_N : désignant la concentration des trous créés par agitation thermique

$$n_N \approx N_d$$

Les trous sont donc appelés *porteurs minoritaires* et le semi-conducteur est dit de *type N*.

Semi-conducteur extrinsèque type P

On dope maintenant le silicium avec des éléments du groupe III (bore, aluminium, gallium, indium) qui portent le nom d'atomes accepteurs (figure 1.4a). Ces impuretés ne disposent que de trois électrons externes pour assurer quatre liaisons covalentes : il y a donc « création » d'un manque dans une liaison covalente de cet atome, c'est-à-dire d'un trou libre qui peut facilement « enlever » un électron aux atomes voisins. Le noyau de l'atome accepteur conserve ses trois charges $+q$, toujours neutralisées par les liaisons covalentes. Le nombre d'électrons de liaisons est porté à 4, ce qui assure la stabilité de l'atome au sein du réseau. Globalement, il se comporte alors comme une charge fixe $-q$. Cette charge ne pourra participer au transport du courant électrique, elle représente en revanche une certaine charge statique dans l'espace. À l'opposé, il y a eu création d'un trou, libre lui de se déplacer au sein du réseau.

L'introduction d'un atome dopant dit accepteur (d'électrons) conduit donc à la création :

- d'un ion fixe négatif de charge $-q$;
- d'un trou libre.

Les énergies d'ionisation de ces atomes accepteurs se situent dans la même gamme d'énergie que les atomes donneurs. Les trous libres sont très largement *majoritaires* dans le matériau de sorte que, comme précédemment, on peut écrire :

$$p_p \gg n_p$$

$$p_p \approx N_A$$

Le semi-conducteur est dit de *type P*, quant aux électrons, ils sont devenus des *porteurs minoritaires*.

Des bouteilles à moitié vides et à moitié pleines... et du courant

La conduction du courant dans les conducteurs est due aux électrons, les électrons se déplaçant sous l'effet du champ électrique qui règne dans le solide par suite de l'application d'une différence de potentiel (ddp) à ses extrémités. Si le champ électrique est supposé uniforme, l'électron devrait posséder un mouvement uniformément accéléré ; mais cet électron subit des chocs. Lors des chocs, les électrons cèdent de l'énergie au matériau, mais cette perte est compensée par l'énergie fournie par le champ électrique. D'un point de vue macroscopique, l'électron est alors animé d'une vitesse moyenne proportionnelle au champ électrique.

Considérons maintenant un semi-conducteur.

Dans le cas d'une bande vide, il n'y a pas de conduction possible, malgré la présence de niveaux énergétiques disponibles, car l'absence d'électron exclut le transport de l'électricité.

Considérons maintenant le cas d'une bande pleine et occupons nous des électrons présents dans cette bande pleine. Comme la bande est pleine, il n'y a aucun niveau d'énergie vacant : il n'y a donc aucune chance pour un électron d'acquérir de l'énergie sous l'influence d'un quelconque champ électrique. Il n'y a donc pas de conduction possible pour les électrons d'une bande pleine.

Pour qu'il y ait une possibilité de conduction, il faut que la bande de conduction soit partiellement remplie. On a de la chance : c'est le cas avec les SC à température ambiante.

c) En conclusion

Dans les SC, les porteurs de charge peuvent être créés par deux mécanismes distincts se produisant simultanément :

- Un mécanisme **incontrôlé** : la génération thermique.
- Un mécanisme **contrôlé** : le dopage donnant lieu aux SC extrinsèques.

D'un point de vue technique, le phénomène de génération thermique conduit à une température de fonctionnement limite (typiquement de l'ordre 200 °C à 250 °C) incontournable des composants SC. Cette température « intrinsèque » est définie par $n_i(T_I) = N_A$ ou N_D . Elle dépend donc de la loi de variation $n_i(T)$ et de la résistivité du SC extrinsèque *via* N_A ou N_D .

Au-delà de cette température T_I , le mécanisme de génération intrinsèque prend le pas sur les mécanismes extrinsèques de création d'électrons ou de trous : on perd le contrôle des mécanismes de conduction dans les SC...

Ce problème est particulièrement critique avec les composants de puissance car la température intrinsèque décroît lorsque la résistivité augmente... Et comme on utilise des matériaux à forte résistivité pour les composants de puissance, dépasser cette température peut créer des problèmes...

1.1.4 Les concentrations de porteurs

a) Présentation

Dans un SC intrinsèque ou extrinsèque, quatre types de porteurs sont susceptibles d'être rencontrés :

- Des porteurs de charge positive :
 - soit des porteurs mobiles, les trous, avec une concentration p ;
 - soit des atomes donneurs ionisés fixes avec une concentration N_D .
- Des porteurs de charge négative :
 - soit des porteurs mobiles, les électrons, avec une concentration n ;
 - soit des atomes accepteurs ionisés fixes avec une concentration N_A .

Les notations utilisées par la suite correspondent aux concentrations volumiques des particules, chaque type de particule chargée possédant une charge dont le module est égal à q (charge de l'électron).

b) Situation à l'équilibre

Condition de neutralité électrique

La première relation à laquelle obéit un SC est la condition de neutralité électrique locale, c'est-à-dire en tout point r de l'espace, définie par la condition suivante :

$$\rho = q \times (p + N_D - n - N_A) = 0$$

ρ désignant la densité de charge électrique.

Par suite :

$$p + N_D - n - N_A = 0, \text{ soit } n - p = N_D - N_A$$

La relation précédente impose donc une première contrainte sur la concentration des porteurs mobiles en fonction de N_D et N_A , c'est-à-dire en fonction des données technologiques de fabrication.

Loi d'action de masse

Le produit np des concentrations des électrons et des trous dans un SC quelconque (intrinsèque ou extrinsèque) à l'équilibre est, lui, indépendant des concentrations N_D et N_A . Il ne dépend que de la température. Ainsi :

$$np = n_i^2 = f(T)$$

Cette fonction est notée habituellement $n_i^2(T)$ par référence au semi-conducteur intrinsèque. Pour le silicium, la loi de variation $n_i(T_1)$ est donnée par la formule pratique suivante :

$$n_i(T) = 3,8T^{3/2} \exp(-7000/T)$$

c) Situation hors d'équilibre

Dans les situations hors d'équilibre, il est intéressant de décomposer les concentrations en deux termes : les concentrations d'équilibre désignées par n_0 et p_0 , les écarts par rapport à cet équilibre notés Δn et Δp . Nous écrivons ainsi les concentrations sous la forme générale suivante :

$$n = n_0 + \Delta n$$

$$p = p_0 + \Delta p$$

Condition de quasi-neutralité électrique

Hors d'équilibre, la densité de charge devient :

$$\rho = q \times (p_0 + \Delta p + N_D - n_0 - \Delta n - N_A)$$

qu'on peut transformer ainsi :

$$\rho = q \times, (p_0 + N_D - n_0 - N_A) + q \times (\Delta p - \Delta n)$$

Le premier terme, qui correspond à la situation d'équilibre, est nul. Quant au second, si les concentrations en excès Δp et Δn sont telles que : $\Delta p \approx \Delta n$, on peut continuer à supposer $\rho = 0$.

Cette condition, désignée sous le nom de condition de *quasi-neutralité électrique*, est toujours vérifiée.

Conséquence sur la loi d'action de masse

Si la condition de neutralité électrique est préservée pour un SC hors d'équilibre, il n'en est plus de même pour la loi d'action de masse. En effet, si la concentration en électrons croît ou décroît, la concentration en trous doit croître (respectivement décroître) de la même valeur pour satisfaire à la condition de quasi-neutralité électrique. Par suite, le produit np varie par rapport à sa valeur à l'équilibre : il augmente ou diminue selon le signe de Δn ou Δp .

La valeur de la différence $np - n_i^2$ traduit donc l'écart par rapport à cet équilibre.

Un semi-conducteur ne peut rester indéfiniment en état de déséquilibre (on a des problèmes avec la thermodynamique...). Un ensemble de processus connus sous le nom de *processus de génération-recombinaison* vont donc prendre naissance pour ramener ce semi-conducteur à l'équilibre.

Ainsi, un semi-conducteur qui présente un déficit important de porteurs par rapport à son état d'équilibre, va créer des porteurs en grand nombre, alors qu'un semi-conducteur qui présente au contraire des porteurs en excès va « tout faire pour les faire disparaître ».

Ces processus, qui concernent les électrons **et** les trous, sont modélisés au niveau macroscopique par :

- un taux de génération G qui traduit le nombre de porteurs créés par unité de volume et de temps ;
- un taux de recombinaison R qui traduit le nombre de porteurs disparaissant dans les mêmes conditions.

On utilise parfois un taux global de génération recombinaison $U = G - R$.

Les processus de génération au sein d'un semi-conducteur sont multiples. Ils peuvent résulter :

- d'une injection *via* le mécanisme de diffusion ;
- d'une excitation optique ;
- du mécanisme d'ionisation par impact (*cf.* chapitre 4).

Les mécanismes de recombinaison seront analysés au §1.3.4.b).

1.2 PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT ET COURANT ÉLECTRIQUE

1.2.1 Influence de la température

Dans un SC intrinsèque ou extrinsèque existent donc deux types de particules, les électrons et les trous, en concentration uniforme et indépendante du temps. Par contre ces porteurs ne sont pas immobiles.

Sous l'effet de l'agitation thermique les porteurs se déplacent dans toutes les directions (figure 1.5a). Suite aux chocs subis par les électrons ou les trous avec les atomes originels, les impuretés, etc., toutes les directions des porteurs sont équiprobables car il y a autant de chance d'obtenir une trajectoire dans un sens donné que dans le sens opposé. À un instant donné, la composante moyenne de la vitesse dans une direction quelconque, qui résulte d'un très grand nombre de chocs et de trajectoires isotropes, est donc nécessairement nulle. Autrement dit, l'agitation thermique des porteurs dans un SC ne produit pas de transport moyen de charges, donc pas de courant.

Par contre, ce nuage d'électrons et/ou de trous possède une certaine énergie moyenne que l'on peut déterminer par approche thermodynamique. À cette énergie thermique définie par : $E_t = \frac{3}{2}kT$ correspond une vitesse qualifiée de vitesse d'agitation thermique V_{th} définie par

$$V_{th} = \sqrt{\langle V_{th}^2 \rangle} \quad \text{avec} \quad \frac{1}{2}m \langle V_{th}^2 \rangle = E_t$$

Le symbole $\langle f(t) \rangle$ désignant la valeur moyenne de la fonction $f(t)$.

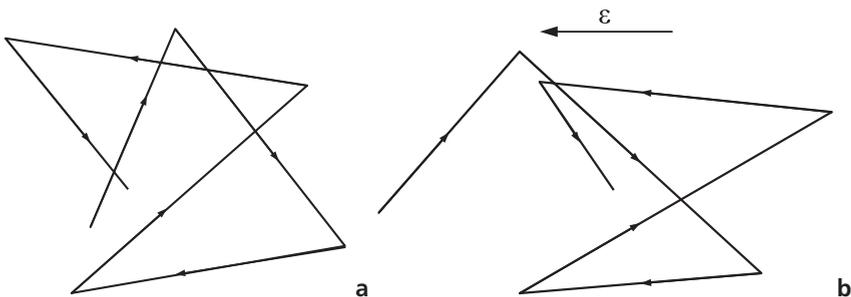


Figure 1.5 Trajectoire d'un électron.
a) Sans champ électrique. **b)** Avec champ électrique.

Si on suppose la masse des électrons et des trous « voisine » de la masse de l'électron au repos, la vitesse d'agitation thermique des porteurs mobiles d'un SC est de l'ordre de $\langle V_{th} \rangle \approx 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

C'est cette vitesse moyenne que le champ électrique va légèrement faire varier.

1.2.2 Influence d'un champ électrique : la conduction

a) Présentation

L'application d'un champ électrique à un nuage de porteurs, trous et/ou électrons, entraîne un effet de dérive lente du nuage (figure 5b), dans le sens ou non du champ électrique selon le type de porteurs, que l'on peut caractériser macroscopiquement par une vitesse de dérive (*drift*) ou d'entraînement. Si le champ électrique est suffisamment faible ($E < 1 \text{ V}\cdot\mu\text{m}^{-1}$), cette vitesse dépend linéairement du champ appliqué, selon la formule :

$$\langle V_d \rangle = \mu E \text{ avec } \mu = \frac{qE}{m_e} \langle \tau_v \rangle$$

$\langle V_d \rangle$ désigne la vitesse **d'entraînement du nuage** de porteurs, μ est un paramètre statistique qui représente **la mobilité** des porteurs (électrons ou trous). La mobilité s'exprime en $\text{m}^2\cdot(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$ ou en pratique en $\text{cm}^2\cdot(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$. Les ordres de grandeur pour le silicium sont les suivants : $\mu_n = 1\,500 \text{ cm}^2\cdot(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$ et $\mu_p = 450 \text{ cm}^2\cdot(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$. (Se rappeler que les électrons sont environ 3 fois plus mobiles que les trous.) Enfin, τ_v représente le temps de relaxation de la vitesse (ou du moment).



La mobilité, qui constitue l'un des paramètres fondamentaux de la physique des SC est particulièrement importante dans la modélisation des transistors MOSFET, car le transport des porteurs se fait *sous la seule action du champ électrique*.

À titre d'exemple un champ électrique de $0,01 \text{ V}\cdot\mu\text{m}^{-1}$, correspond à une vitesse de dérive de $10^3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, c'est-à-dire à un centième de la vitesse d'agitation thermique... Ainsi, il ne faut donc pas confondre vitesse individuelle et vitesse d'ensemble. Aux champs électriques très élevés, la vitesse de dérive atteint une valeur limite appelée vitesse de saturation de l'ordre de... $10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, en « gros » la vitesse d'agitation thermique.

b) Densité de courant de conduction – Conductivité et résistivité

Soit un volume de SC dans lequel on considère une surface dS normale à la direction du champ électrique. Soient n et p la concentration des électrons et des trous qui se déplacent. Sous l'effet du champ électrique, il y a respectivement :

- nv électrons qui traversent cette surface par unité de temps ;
- pv trous qui traversent cette surface par unité de temps.

La charge totale dQ/dt traversant cette surface par unité de temps est donc :

$$q(n\mu_n \vec{E}\cdot\vec{dS} + p\mu_p \vec{E}\cdot\vec{dS}).$$

Il en résulte une densité de courant dans la surface dS telle que :

$$\vec{J} = q(n\mu_n + p\mu_p) \vec{E}$$

La **conductivité** du matériau SC, définie par : $\sigma = J/E$, est donc telle que :

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

Quant à la **résistivité** ρ , elle est telle que :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)}$$

Les valeurs de n et p dépendent du type de SC utilisé (intrinsèque ou extrinsèque). Le dopage et, comme nous le verrons ultérieurement, l'injection en quantité plus ou moins importante de porteurs, permettent de faire varier la résistivité d'un SC dans des proportions plus ou moins importantes.

1.2.3 Influence de la concentration : la diffusion

a) Présentation

Le phénomène de diffusion est un phénomène physique très général qui se produit lorsqu'existe une inhomogénéité spatiale de concentration : il se caractérise par une tendance naturelle à « ramener » le gaz, le liquide ou le semi-conducteur vers l'équilibre, l'équilibre étant défini par une concentration uniforme dans tout le volume. Ce phénomène de transport est irréversible.

Les flux de particules qui en résultent vont donner lieu à la circulation de courants de diffusion conformément aux relations mono ou tridimensionnelles suivantes :

$$\begin{aligned} J_{DN} &= +qD_N dn/dx & \overline{J_{DN}} &= +q \cdot D_N \cdot \overline{\text{grad } n} \\ J_{DP} &= -qD_P dp/dx & \overline{J_{DP}} &= -q \cdot D_P \cdot \overline{\text{grad } p} \end{aligned}$$

Le déplacement des porteurs n'est pas lié à la valeur locale des concentrations dans l'espace mais à la *variation spatiale locale des concentrations*.

Le flux de trous et le courant de diffusion associés sont de même sens, ils sont de sens contraire pour les électrons.

Les paramètres D_N et D_P définissent respectivement les constantes de diffusion des électrons et des trous dans le matériau SC.

À la température de 300 K, les constantes de diffusion des électrons et des trous sont respectivement :

$$D_N = 37,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \text{ et } D_P = 13 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Évidemment les constantes de diffusion sont loin d'être des constantes universelles...

La densité totale de courant de diffusion a donc pour expression finale :

$$J_D = J_{DN} + J_{DP}$$

b) Relation d'Einstein

La mobilité représente l'aptitude d'un électron/trou à se déplacer sous l'effet d'un déséquilibre de potentiel, tandis que la constante de diffusion représente l'aptitude d'un électron/trou à se déplacer sous l'effet d'un déséquilibre de concentration de porteurs de charge. On peut donc penser qu'il y a peut-être un lien entre ces deux paramètres... C'est effectivement le cas, la relation d'Einstein permettant de « passer » d'un paramètre à l'autre *via* l'unité de tension thermodynamique V_t à l'aide des relations suivantes :

$$D_N = V_t \cdot \mu_N$$

$$D_P = V_t \cdot \mu_P$$

1.2.4 Cas général

Dans le cas général et avec « les bonnes hypothèses », on peut considérer que le courant total résulte simplement de la contribution des deux phénomènes, conduction sous champ électrique et diffusion, considérés isolément (c'est de la linéarité ou de la superposition). La densité de courant totale J_t circulant dans un SC est alors telle que :

$$J_t = J_C + J_D$$

J_C : courant de conduction

J_D : courant de diffusion

Comme chaque composante est susceptible d'impliquer électrons et trous, il y a quatre composantes de courant à déterminer dans le cas général.

On pourra vérifier, à titre d'exemple, que la résistivité du silicium varie de $2,2 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$, pour du silicium intrinsèque, à $1,38 \Omega \cdot \text{cm}$, soit 10^5 fois plus faible, pour du silicium dopé avec 10^{16} atomes de bore.

1.3 MODÉLISATION DU RETOUR À L'ÉQUILIBRE

1.3.1 Présentation

Le problème du retour à l'équilibre d'un SC implique différentes questions quant au mode de fonctionnement du composant et au type de composant (signal ou puissance) considéré.

Il est possible de s'intéresser à l'état d'équilibre **lorsque le composant est soumis à une « perturbation permanente constante »** de porteurs (cas du fonctionnement en régime continu). Dans ce cas, ce sera la loi de répartition spatiale de la densité des porteurs en régime permanent qu'il sera intéressant de calculer car elle permet de déterminer la valeur des courants de diffusion (par calcul des dérivées en un point donné dans un modèle unidimensionnel, par exemple).

Il est possible de s'intéresser au retour à l'équilibre **après que le composant a été soumis à une « perturbation transitoire »**, plus ou moins importante, de la concentration des porteurs comme dans le cas du fonctionnement en commutation d'un

transistor. Dans ce cas, ce sera la loi d'évolution temporelle de la densité des porteurs qu'il sera intéressant de calculer car elle permet de déterminer le temps nécessaire pour que le composant revienne dans son état initial après suppression de l'excitation. Deux types de situations (voir ci-dessous) peuvent de nouveau se rencontrer selon que le composant travaille en *faible injection*, comme dans les composants de signal, ou en *forte injection* comme dans les composants de puissance. Ces deux situations conduisent à des « calculs » différents, même si elles découlent des mêmes équations de continuité. Dans un modèle unidimensionnel, le bilan des charges conduit à l'équation de continuité fondamentale suivante (ne pas oublier qu'il y a la même pour les trous) :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - R_n + \frac{1}{q} \times \frac{\partial J_n}{\partial X}$$

Le courant total d'électrons J_n étant défini par $J_n = J_{nC} + J_{nD}$, les courants J_{nC} et J_{nD} désignant respectivement les courants de conduction et de diffusion spécifiques des électrons. Le retour à l'équilibre impliquant un excès de porteurs initial, on peut supposer $R_n \gg G_n$.

1.3.2 Les niveaux d'injection dans un semi-conducteur

a) Les ordres de grandeur

Il est important de connaître les ordres de grandeur suivants.

- Un semi-conducteur intrinsèque comporte $5 \cdot 10^{22}$ atomes/cm³, l'agitation thermique conduit à la création permanente de 10^{10} électrons et 10^{10} trous.
- Un semi-conducteur extrinsèque (N ou P) dopé « normalement » comporte environ $5 \cdot 10^{17}$ /cm³ atomes dopants. Si le matériau est de type N, dans l'hypothèse d'ionisation totale (hypothèse habituelle) il y a création de $5 \cdot 10^{17}$ électrons par cm³ et de $0,5 \cdot 10^3$ trous par cm³.
- La densité de courant « maximale » dans le cuivre (pour éviter les problèmes d'échauffement) est de $5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ (c'est la densité de courant que peut « supporter » les fils électriques traditionnels que vous achetez chez votre électricien...).
- La densité de courant d'un « bon » composant de puissance à l'état fermé est 1 à $3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$.

b) Hypothèse des faibles injections

La plupart des composants de signal fonctionnent habituellement en **régime de faible injection** (figure 1.6b). Dans ce régime, la densité des porteurs injectés dans le SC est faible par rapport à la densité des porteurs majoritaires du SC à l'équilibre. À titre d'exemple, pour un SC de type P de concentration de dopants N_A , l'équilibre thermodynamique implique :

$$p_0 \equiv N_A \text{ et } n_0 = \frac{n_i^2}{N_A} \ll p_0$$

p_0 et n_0 désignant les concentrations à l'équilibre des trous et des électrons.

Si Δn et Δp désignent les porteurs en excès, la condition de faible injection implique : $p = p_0 + \Delta p \approx p_0$ et $n = n_0 + \Delta n$.

La condition d'équilibre électrique implique : $\Delta n = \Delta p$ en tout point.

Il en est de même dans un SC de type N de concentration de dopants N_D .

En résumé, l'hypothèse de faible injection fait que l'on ne « voit » pas de modification des porteurs majoritaires. Par contre, la modification des porteurs minoritaires est importante.

Conséquence

Dans l'hypothèse de faible injection, la conductivité (ou la résistivité) du SC n'est pas modifiée

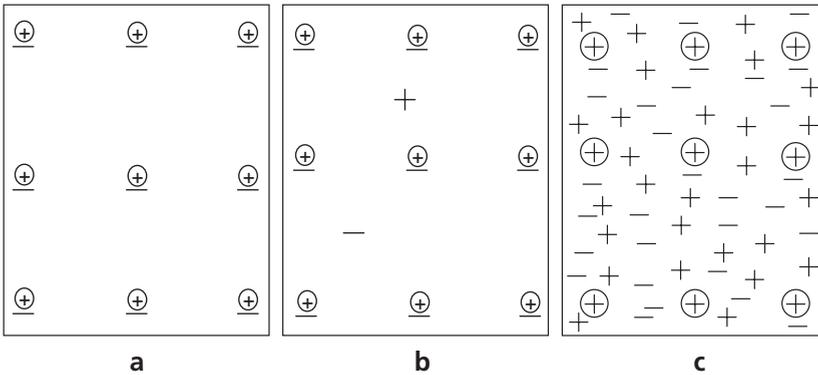


Figure 1.6 Concentration des porteurs (libres et fixes).

a) Avant injection. **b)** Après faible injection. **c)** Après forte injection.



Commentaire

La figure 1.6a représente un SC extrinsèque de type N (concentration de dopants $5 \cdot 10^{17}/\text{cm}^3$ par exemple) à l'équilibre thermodynamique. Seuls sont représentés sur ce schéma les atomes ionisés et les électrons libres « fournis » par ces atomes. Les trous créés par le processus de dopage ne sont pas représentés (il y en a en effet $0,5 \cdot 10^3$ par cm^3 alors qu'il y a $5 \cdot 10^{17}$ électrons...). Les électrons et les trous créés par le mécanisme intrinsèque ne sont pas plus représentés (il y a 10^{10} électrons et 10^{10} trous par cm^3). La figure 1.6b, qui représente le même SC en faible injection, fait apparaître un électron et un trou supplémentaires par rapport au nombre initial des électrons et des atomes donneurs. (9 atomes ionisés et 9 électrons libres). C'est encore bien beaucoup pour l'hypothèse des faibles injections car la gamme de porteurs injectés est souvent de l'ordre de... 100 fois plus faible que la concentration initiale des dopants.