

Chapitre 1

Détecteurs de particules au silicium

1.1. Introduction :

Ces dernières années un certain nombre de matériaux semi-conducteurs ont été étudiés pour l'usage comme détecteurs de particules. Ceux-ci incluent le silicium, qui a été intensivement recherché et est assez bien compris [7].

Les détecteurs de silicium sont utilisés dans le domaine de recherche physique. Comme la physique nucléaire, cristallographie et médecine pour l'imagerie [8].

Les changements induits par l'irradiation sur la performance macroscopique du détecteur sont provoqués par des défauts microscopiques électriquement actifs.

Dans les sections suivantes, le principe de fonctionnement des détecteurs au silicium sera expliqué brièvement et une description de leur fabrication aura lieu.

On termine ce chapitre par l'effet des endommagements d'irradiation sur des détecteurs au silicium.

1.2. Matériaux pour les détecteurs :

En général, un détecteur est une jonction $p-n$ qui est fabriquée par des techniques épitaxiales [9]. Les besoins en matériaux pour la fabrication des détecteurs de particules au silicium utilisés dans les applications en physique des énergies élevées doivent avoir deux conditions :

- résistivité élevée, ρ
- durée de vie des porteurs minoritaires élevés, τ_0

Une résistivité très élevée ($\geq 10^3 \Omega cm$) est nécessaire afin de dépléter entièrement le volume de détecteur d'épaisseur $\approx 200 - 300 \mu m$ par une tension au-dessous de 300 V.

Pour un prix raisonnable et une distribution homogène de résistivité (non seulement au-dessus d'une couche simple mais également au-dessus du lingot entier), le silicium préparé par la méthode de la zone fondue est le meilleur choix du matériel pour des applications exclusivement utilisées dans les détecteurs d'aujourd'hui [10]. En outre, la condition de fabrication inclut également une grande vitesse des porteurs (temps de transition élevée), une conversion élevée (particule \rightarrow paire électron trous (e-t)) et une bonne résistance à l'endommagement par les rayonnements. La grande vitesse peut être obtenue si la longueur de la région déplétée est courte et les mobilités de porteur sont grandes. Pour une efficacité élevée de conversion pour les particules au minimum d'ionisation (en Anglais MIP¹), la longueur de la région déplétée devrait être longue et tous les porteurs libres créés devraient quitter cette région rapidement.

1.3. Opération des détecteurs au silicium :

1.3.1. Principe de base d'opération de la détection:

Un détecteur de silicium est une diode polarisée en inverse avec la zone déplétée (épuisée) agissant comme la chambre d'ionisation. Si la particule incidente est arrêtée dans le détecteur, son énergie peut être mesurée, par contre, si elle traverse le détecteur on peut seulement dire que la particule a traversée [11]. Le dispositif de semi-conducteur le plus répandu pour le cheminement de particules est le détecteur microruban au silicium et donc qui sera présenté

¹ - Minimum Ionizing Particles

dans ce travail. La particule d'ionisation minimale (MIP) traverse un détecteur au silicium de 300 microns d'épaisseur laisse une énergie de ≈ 90 KeV.

Bien que le gap d'énergie de silicium soit 1.1 eV à la température ambiante et l'énergie moyenne exigée pour produire une paire électron trou est d'ordre 3.6 eV. Donc environ 25000 paires électron trou sont créées par MIP (environ 85 paires électron trou par micron) [12]. Si le détecteur est entièrement épuisé tous les électrons et les trous sont séparés par le champ électrique dans le volume épuisé et la dérive vers l'anode (électrons) ou la cathode (trous) [13].

1.4. Détecteurs en Microruban:

Afin de faire un détecteur au silicium sensible à la position, le côté fortement dopé de type p^+ est divisé en rubans étroits. La figure (1.1) montre schématiquement la coupe d'un détecteur de particules de microruban au silicium. Deux couches fortement dopées p^+ et n^+ sont implantées sur un substrat de 300 microns, dopé n.

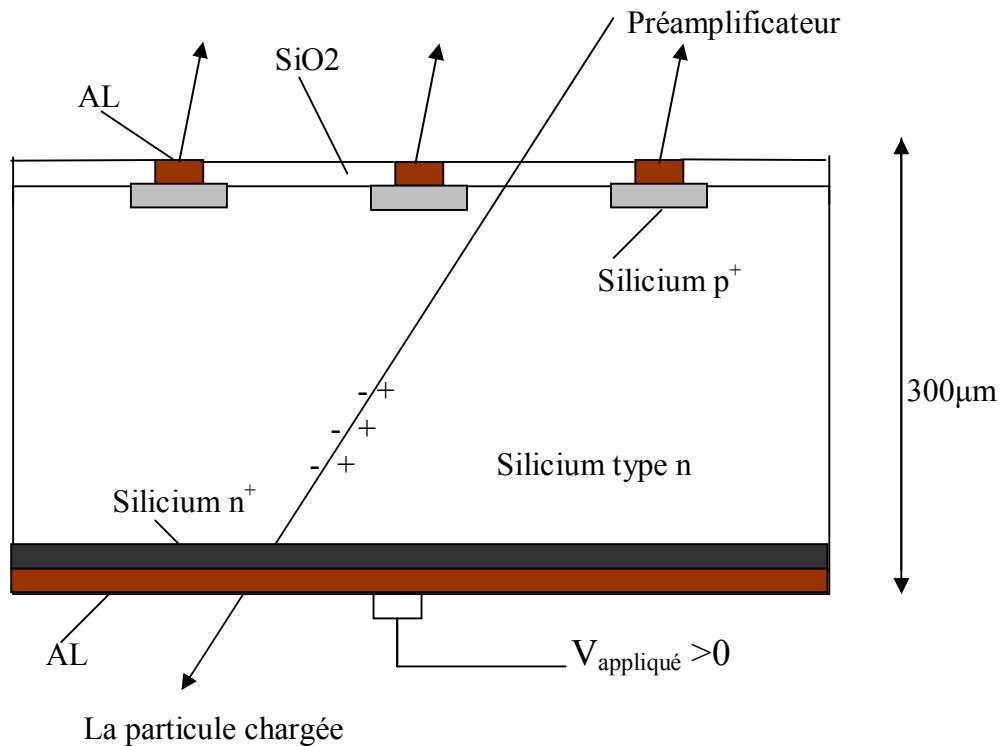


Figure 1.1 : Schéma d'un détecteur de type $p^+ n$.

Un tel détecteur s'appelle le détecteur p^+n , où les trous sont rassemblés aux rubans p^+ . Le ruban p^+ servi à créer une zone de déplétion avec la couche n^- dans la jonction et la couche n^+ est posée pour empêcher la zone d'épuisement d'atteindre la face arrière et pour assurer un bon contact ohmique.

Les rubans p^+ doivent être métallisés pour permettre le contact des rubans aux circuits externes. Autres structures sont possibles comme les détecteurs n^+p (n^- rubans, p^- substrat), où le rôle des couches p^+ et n^+ est permuté. Car au lieu des trous ce sont les électrons qui sont collectés [14].

1.5. Endommagements des radiations sur les semi-conducteurs:

L'endommagement induit par les radiations sur les détecteurs au silicium se fait de plusieurs manières. La manière de classer les effets d'irradiation du point de vue physique est basée sur la distinction entre les endommagements de déplacement et d'ionisation. Les endommagements d'irradiation du point de vue spatiale peuvent être divisés en endommagement de surface et de volume [15]. Le dernier est le facteur limitant l'usage des détecteurs au silicium dans l'environnement d'irradiation intense. Dans ce travail seul l'endommagement de volume sera donc considéré.

1.5.1. Mécanisme d'endommagements:

Les particules d'ionisation fortement énergiques traversant un détecteur s'interagissent avec les atomes du silicium et produisent des paires (électron-trous), si les particules incidentes (hadrons [neutrons, protons], leptons, photons) ont assez d'énergie, elles peuvent déplacer les atomes de sa position initiale (Frappe primaire sur l'atome ou le FPA) qui laissent des lacunes, le résultat des paires Frenkel (un silicium avec des atomes interstitiels et des vacants). A cause de leur mobilité très élevée, la plupart de ces paires recombinent rapidement, mais une proportion significative peut interagir avec des impuretés et produit des défauts électriquement actifs qui ont des états d'énergie dans le gap. Ces défauts se comportent comme des centres de recombinaison et/ou des pièges de porteurs. Les défauts les plus importants créés par l'irradiation sont le divacant (V_2) et le complexe $C_i O_i$ (carbone,

oxygène) à cause de leurs taux d'introduction élevés énergiquement se trouve au milieu du gap d'énergie [16,17].

Ces deux défauts jouent un rôle important dans la détermination du comportement macroscopique des dispositifs endommagés par rayonnement, y compris l'effet de type d'inversion (voir chapitre 2).

À l'extrémité du chemin de recul de FPA, des agglomérations denses de défauts sont formées et ayant comme résultat des régions désordonnées habituellement référées comme des clusters [17,18]. Ces régions sont très petites (dont le diamètre typique est de l'ordre de $\approx 10\text{nm}$) contiennent des concentrations de défaut extrêmement élevées ($\approx 10^{19}\text{cm}^{-3}$), qui fait qu'un échange direct de porteur de charge entre les niveaux profonds. L'échange direct de charge a comme conséquence l'augmentation des taux de recombinaison, qui sont les responsables d'une augmentation du courant de fuite [19].

1.5.2. Les pièges profonds dans les semi-conducteurs

Les niveaux profonds dans les semi-conducteurs ont des énergie d'ionisation très supérieure à $k_B T$. Ces défauts jouent le rôle des centres de piégeage. Ils peuvent augmenter considérablement le taux de recombinaison des porteurs libres s'ils sont situés près du milieu du gap, ceux ci sont des centres de génération- recombinaison ($g-r$) puisque à cette position les taux de piégeage des électrons et des trous sont comparables. Si les défauts sont plus proches de la bande de conduction ou à la bande de valence, leurs interactions avec les deux bandes ne sont plus de la même nature. Donc, un niveau profond peut agir comme un centre $g-r$ ou un centre de piégeage selon sa position dans le gap.

1.5.2.1. Les centres de génération- recombinaison (g-r)

Les centres $g-r$ sont des défauts profonds génèrent ou recombinent facilement les paires $e-t$. Un centre $g-r$ peut être occupé par un électron comme il peut être occupé par un trou. Si un électron est capturé par un centre $g-r$, il peut être suivi par une recombinaison ou une réémission. Le processus est représenté dans la figure 1.2

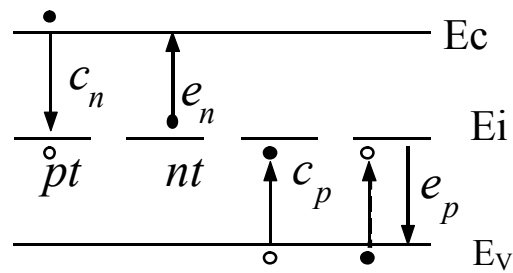


Figure 1.2. Diagramme de bande d'énergie pour un semi-conducteur ayant des centres g-r. Le cas nt se produit quand le centre g-r est occupé par un électron, et le cas pt se produit quand il est occupé par un trou.

Dans cette figure :

- | | |
|--|---|
| c_n : Le coefficient de capture d'un électron. | E_c : niveau d'énergie de la bande de conduction. |
| c_p : Le coefficient de capture d'un trou. | E_v : niveau d'énergie de la bande de valence. |
| e_n : Le coefficient d'émission d'un électron. | E_i : niveau de Fermi intrinsèque. |
| e_p : Le coefficient d'émission d'un trou. | |
| pt : Le centre g-r occupé par un électron. | |
| nt : Le centre g-r occupé par un trou. | |

1.5.2.2. Les centres de piégeage

Les centres de piégeage sont des défauts profonds peuvent être ionisés à l'équilibre. Dans les régions de déplétion, ces centres contribuent à la charge d'espace et donc à la tension nécessaire pour une déplétion totale. Un centre de piégeage a tendance à émettre sa charge vers la bande appropriée que de la maintenir jusqu'à l'annulation par la capture d'une charge opposée. Donc le piégeage est une capture avec une émission lente. Ce processus est montré dans la figure 1.3.

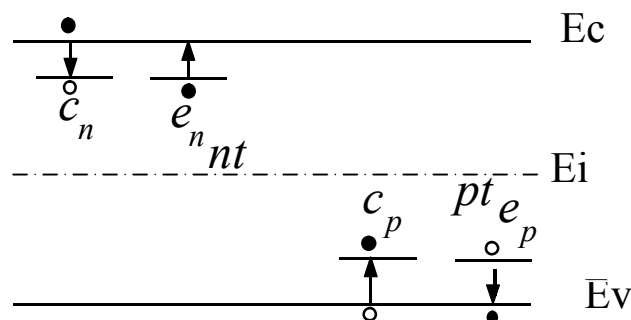


Figure 1.3. Diagramme de bande d'énergie pour un semi-conducteur ayant des pièges. Le cas nt se produit quand le piège est occupé par un électron, et le cas pt lorsqu'il est occupé par un trou.

1.5.3. Recombinaison directe et indirecte :

Le semi-conducteur est mis hors l'équilibre par une excitation extérieure mais toujours tend vers à l'équilibre, ceci a fait par la recombinaison des porteurs générés. La recombinaison peut être directe ou indirecte. Le premier cas se fait de bande à bande, c'est-à-dire un électron excité de la bande de valence vers la bande de conduction a tendance à retourner vers la bande de valence directement.

Le deuxième cas, le retour à l'équilibre se fait à travers des centres dans le gap. Ce dernier est le plus probable à cause de l'énergie mise en œuvre est inférieur à celle du premier cas. Les probabilités de recombinaison indirecte sont établies par Shockley, Read [20] et Hall [21].

L'occupation des pièges par des électrons ou des trous, respectivement, est déterminée par l'interaction avec la bande de conduction ou de valence.

Les étapes qui peuvent se produire dans le procédé de génération-recombinaison sont montrées dans la figure 1.4, les flèches indiquent la transition de l'électron pendant chaque processus.

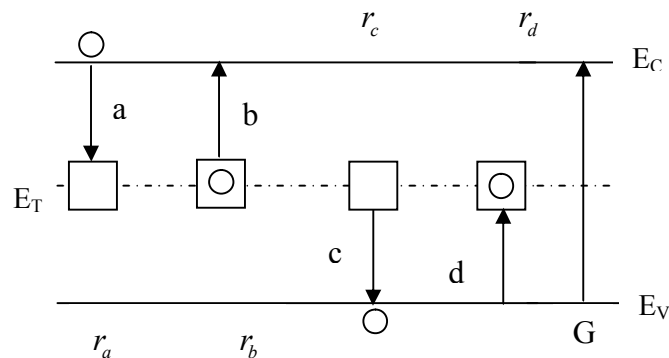


Figure 1.4. Procédés de transition directe et indirecte par l'intermédiaire d'un seul niveau de piège. Taux d'émission et de capture (r_i) et taux de génération (G). [22].

Comme indiqué dans la figure.1.4, quatre réactions de concurrence ont lieu.

- Capture des électrons dans les états non occupés (processus a).
- Émission des électrons vers la bande de conduction (processus b).
- Émission des trous vers la bande de valence (processus c).
- Capture des trous dans des états occupés par des électrons (processus d).

Le taux de capture électronique r_a (processus (a)) est proportionnel à la concentration des électrons libres dans la bande de conduction et également à la concentration des pièges vides.

Si la concentration des pièges est N_T , la concentration des pièges inoccupés est $N_T.(1-f)$, où f est la probabilité d'occupation par un électron donnée par :

$$f = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_F - E_T}{k_B T}\right)} \quad (1.1)$$

Le taux du processus (a) est proportionnel à $nN_T(1-f)$:

$$\begin{aligned} r_a &= v_{th} \sigma_n n N_T (1-f) \\ &= c_n n N_T (1-f) \end{aligned} \quad (1.2)$$

où v_{th} : est la vitesse thermique des porteurs ; $v_{th} \equiv \sqrt{3k_B T / m_e} \equiv 1.2 \times 10^7 \text{ cm.s}^{-1}$ à 300 K, σ_n est la section efficace de capture des centres pour les électrons, le terme $c_n = v_{th} \sigma_n$ est le coefficient de capture des électrons et n est la densité des électrons dans la bande de conduction.

Le taux d'émission d'électron r_b (processus (b)), est proportionnel à la concentration du pièges qui sont occupés par des électrons :

$$r_b = e_n N_T f \quad (1.3)$$

La constante de proportionnalité e_n , est la 'probabilité d'émission' d'un électron par le piège occupé vers la bande de conduction. La valeur e_n ainsi dépend de la densité des états inoccupés dans la bande de conduction

Le taux de capture de trou r_c , par analogie au processus (a), est donné par :

$$\begin{aligned} r_c &= v_{th} \sigma_p p N_T f \\ &= c_p p N_T f \end{aligned} \quad (1.4)$$

où p est la densité des trous dans la bande de valence, σ_p est la section efficace de capture des centres pour les trous et c_p est le coefficient de capture d'un trou.

Ce processus est proportionnel à la concentration des pièges occupés. Le taux d'émission de trou r_d est donné par :

$$r_d = e_p N_T (1 - f) \quad (1.5)$$

où e_p est la probabilité d'émission des trous.

La première étape est d'évaluer les probabilités de taux d'émission, e_n et e_p . Dans le cas de l'équilibre thermique, les taux des deux processus en relation avec la bande de conduction ont lieu doivent être égaux $r_a = r_b$. On remplace r_a et r_b par leurs expressions (1.2 et 1.3 respectivement) et sachant que la concentration d'électron à l'équilibre est donnée par:

$$n = n_i \exp((E_F - E_i)/k_B T) \quad (1.6)$$

où $E_i = (E_V + E_C)/2$ et n_i est la densité intrinsèque d'électron libre.

L'expression de e_n sera :

$$e_n = v_{th} \sigma_n n_i \exp((E_T - E_i)/k_B T) \quad (1.7)$$

De même, dans l'équilibre, les deux processus par lesquels les trous passent de la bande de valence ou revient, doivent être égaux $r_c = r_d$. Lorsqu'on remplace r_c et r_d par leurs expressions (1.4 et 1.5 respectivement), on trouve :

$$e_p = v_{th} \sigma_p n_i \exp((E_i - E_T)/k_B T) \quad (1.8)$$

L'excitation extérieure mène le semi-conducteur hors équilibre. Cette situation est caractérisée par un taux de génération G , l'évaluation de la génération-recombinaison est donnée par (la variation de la densité des électrons):

$$\frac{dn}{dt} = G - (r_a - r_b) \quad (1.9)$$

Dans l'état stationnaire $\frac{dn}{dt} = 0$, par conséquent, $G = r_a - r_b$

De même, pour les trous :

$$\frac{dp}{dt} = G - (r_c - r_d) = 0 \quad (1.10)$$

Il est possible d'éliminer G dans les deux équations précédentes pour trouver le taux net de recombinaison U , en posant:

$$r_a - r_b = r_c - r_d = U \quad (1.11)$$

En substituant les expressions des r_a, r_b, r_c et r_d dans l'équation (1.11), la fonction d'occupation f des centres aura l'expression suivante :

$$f = \frac{\sigma_n n + \sigma_p n_i \exp((E_i - E_T)/k_B T)}{\sigma_n (n + n_i \exp(E_T - E_i)/k_B T) + \sigma_p ((p + n_i \exp(E_i - E_T)/k_B T))} \quad (1.12)$$

Ceci peut également être écrit sous la forme :

$$f = \frac{\sigma_n n + \sigma_p n_i e^{-\beta}}{\sigma_n (n + n_i e^{\beta}) + \sigma_p (p + n_i e^{-\beta})}, \quad \text{où} \quad \beta \equiv \frac{E_T - E_i}{k_B T} \quad (1.13)$$

En substituant la valeur de f dans les taux des différents processus pour obtenir le taux net de recombinaison (dans les unités de cm^{-3}/s) :

$$U = U_{SRH} = \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} N_T (pn - n_i^2)}{\sigma_n (n + n_i e^{\beta}) + \sigma_p (p + n_i e^{-\beta})} \quad (1.14)$$

L'indice SRH est l'abréviation de Shockley, Read et Hall.

$$U_{SRH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_{0p}(n + n_0) + \tau_{0n}(p + p_0)} \quad (1.15)$$

où $\tau_{0n} = \frac{1}{\sigma_n v_{th} N_T}$ et $\tau_{0p} = \frac{1}{\sigma_p v_{th} N_T}$ sont les durées de vie des électrons et trous respectivement.

Le taux de recombinaison est maximal lorsque le centre de recombinaison est au milieu de gap ($E_T = E_i$). Ainsi, les centres de recombinaisons les plus efficaces sont ceux situés au milieu de gap, en conséquence l'équation (1.15) s'écrira comme suit :

$$U_{SRH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_{0p}(n + n_i) + \tau_{0n}(p + n_i)} \quad (1.16)$$

On aura $c_n \approx c_p$ et $n_0 = p_0 = n_i$ les durées de vie seront données par :

$$\tau = \tau_{0n(p)} = \frac{1}{c_{n(p)} \times N_T} \quad (1.17)$$