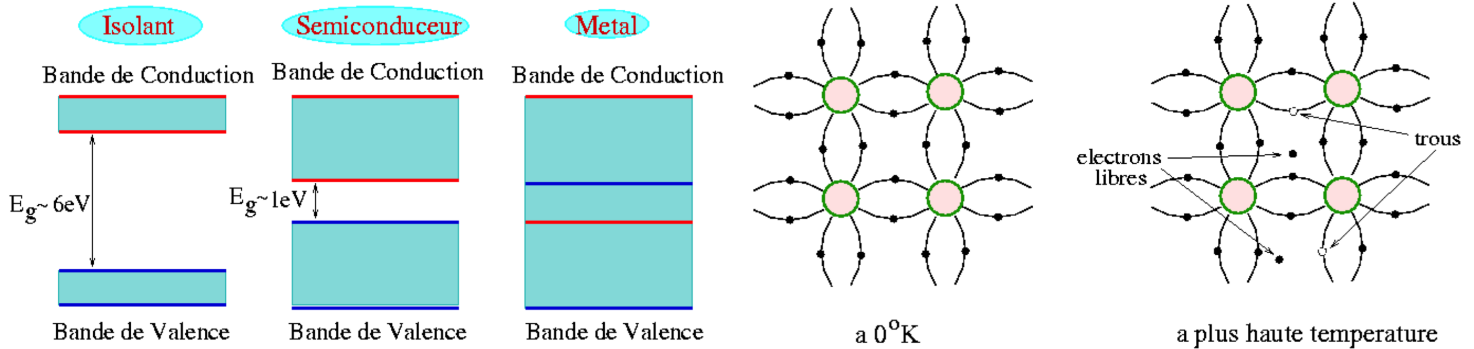


LES DÉTECTEURS SEMI-CONDUCTEURS

1. Généralités et Principe de Fonctionnement

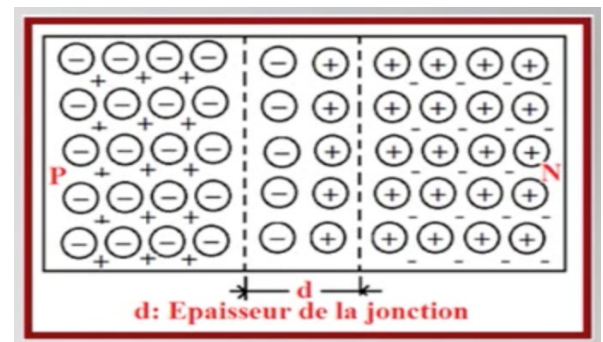
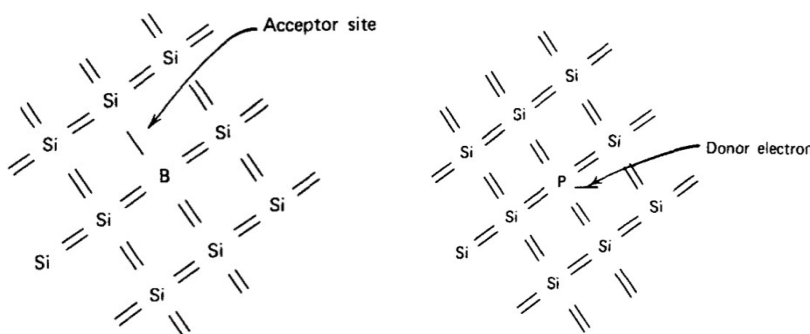
Dans un réseau cristallin semi-conducteur, les atomes ne peuvent être considérés isolément les uns des autres. Les électrons atomiques réalisent des liaisons covalentes (figure 1 à droite). Leurs niveaux d'énergie se regroupent en bandes d'énergie continues (la bande de valence et la bande de conduction) séparées par des bandes dites "interdites" appelée aussi Gap (voir figure 1 à gauche).



- Lorsqu'une particule ionisante interagit dans le semi-conducteur, en cédant de l'énergie au milieu, des paires électrons-trous sont produites le long de son parcours. Des électrons sont arrachés aux atomes du milieu et passent de la bande de valence à la bande de conduction et deviennent libres de se déplacer au sein du cristal semi-conducteur. Ils laissent leur place vacante (vide) en quittant leur site dans le cristal. Ces vacances (ou absence d'électrons) se comportent comme des trappes (ou piège) des électrons. On les appelle trous.

- Dans un détecteur semi-conducteur, les porteurs de charges sont donc des électrons et les trous. Sous l'effet d'un champ électrique, les électrons et les trous se déplacent dans des directions opposées. Les électrons et les trous ont des mobilités du même ordre de grandeur et contribuent donc tout deux à la formation de l'impulsion finale: contrairement aux détecteurs à gaz. Le fonctionnement des détecteurs à semi-conducteurs peut être assimilé par analogie à celui de petite chambre d'ionisation solides.

Les porteurs de charge dans un semi-conducteur sont les électrons dans la bande de conduction et les trous dans la bande de valence. Dans un semi-conducteur intrinsèque la concentration d'électrons est égale à la concentration de trous. La présence d'impuretés de substitution, trivalentes ou pentavalentes dans le cristal favorise la création de porteurs car l'ionisation des impuretés est plus probable. L'énergie d'ionisation des impuretés est du même ordre que l'énergie d'agitation thermique qui, à température ambiante, est égale à $kT = 0,025 \text{ eV}$ (où k désigne la constante de Boltzmann). Les impuretés trivalentes acceptent un électron (et donc créent un trou) alors que les impuretés pentavalentes donnent leur électron. À ces deux types d'impuretés sont associés des niveaux donneurs et accepteurs entre bande de valence et bande de conduction. L'adjonction volontaire d'impuretés dans le cristal (dopage) favorise les porteurs d'un certain type: Électrons (dopage N), trous (dopage P). On parle de semi-conducteur de type N ou de semi-conducteur de type P respectivement (voir figure 2 ci dessous à gauche).



- Pour réaliser détecteur on utilise des matériaux semi-conducteurs de haute pureté car les impuretés créent un bruit de fond important à température ambiante (dû à l'agitation thermique), on utilise généralement des techniques de dopage avec des impuretés déterminées c-à-d en accolant un semi-conducteur de type N (donneur d'électrons) à un semi conducteurs de type P (accepteurs d'électrons).

En l'absence de champ électrique appliqué les électrons de la zone N diffusent vers la zone P, et les trous diffusent en direction opposée, jusqu'à ce qu'un équilibre s'établisse. On crée ainsi au niveau de la jonction une région

désertée par les porteurs de charges (figure 2 à droite). Cette région désertée se comporte comme une chambre d'ionisation.

- Si on polarise cette jonction en inverse pour accroître l'étendue (la taille) de la zone désertée ($d \cong \left(\frac{2eV}{eN}\right)^{1/2}$) et

bloquer le déplacement des charges dû à l'agitation thermique. Le passage d'une particule ionisante dans cette région génère des paires électron-trous attirées par les pôles positif et négatif et qui génèrent une impulsion électrique que l'on peut mesurer.

* L'énergie nécessaire pour produire une paire électron-trou et de l'ordre de 3 eV dans le silicium et le germanium, soit 10 fois plus faible que dans un détecteur à remplissage gazeux (34eV dans l'air) et environ 100 fois plus faible que dans un scintillateur inorganique (250 eV en moyenne pour un NaI(Tl) + PM). Par conséquent le nombre de charges collectées sera un à deux ordres de grandeur plus élevé que dans une chambre d'ionisation ou dans un détecteur à scintillation. Cela améliore considérablement la qualité de détection (notamment la résolution en énergie).

2. Types de détecteurs à semi-conducteur

Il existe trois principales familles de détecteurs :

a) Détecteur à barrière de surface

L'oxydation de la surface d'un semi-conducteur de type N produit à la formation d'une mince couche dopée P, ainsi une jonction à la surface du semi-conducteur. Cette couche est protégée par le dépôt d'un voile d'or et de platine qui assure le contact électrique (la polarisation).

Ce type de détecteurs est particulièrement adapté à la détection de particules ionisantes lourdes, peu pénétrantes, car les fenêtres d'entrée peuvent être réduites à quelques dixièmes de μm . L'épaisseur de la zone désertée et limitée en quelques centaines de micromètres, ne permettant pas leurs applications pour la spectrométrie de rayonnements beta de forte énergie ou de rayonnement X et γ , fortement pénétrants.

b) Détecteur à jonction PN au PIN

Ces jonctions sont obtenus en réalisant, au voisinage de la surface du semi-conducteur (type N ou quasi intrinsèque I) un dopage de type P par diffusion thermique ou par implantation. L'épaisseur des fenêtres d'entrée obtenus est de l'ordre de 0,1 μm et permet la détection de particules chargées lourdes tels que les particules alpha où les produits de fission. La largeur de la zone désertée (environ 1 mm) est limitée pour une mesure en énergie de rayonnements beta de forte énergie ($>$ quelques centaines de KeV).

c) Détecteurs hyper-purs et compensée au lithium

Pour la spectrométrie de rayonnements fortement pénétrants, on utilise soit des détecteurs en germanium hyper-pur, soit des détecteurs silicium ou germanium compensés au lithium. Pour ces derniers, les impuretés résiduelles de type P du cristal sont compensées par la diffusion de lithium pour produire une zone quasi intrinsèque.

On peut réaliser ainsi des détecteurs de quelques millimètres à quelques centimètres d'épaisseur pour la mesure des beta de forte énergie mais aussi principalement pour la spectrométrie γ . On réalise actuellement des détecteurs qui permettent d'obtenir des efficacité relatives excellentes (jusqu'à 90 %). Deux géométries (plane ou coaxiale) sont réalisées en fonction des applications recherchées.

* Les détecteurs germanium hyper-pur peuvent être stockés sans dommage important à température ambiante mais nécessitent d'être refroidis à 77 k au moins pendant leur utilisation.

* Les détecteurs compensés au lithium doivent être maintenus en dessous de 300 k pour le Si et de 220 k pour le Ge pour éviter une diffusion thermique irréversible du lithium dans le cristal. Par conséquent, les détecteurs compensés au Li reste en permanence refroidis à l'azote liquide.

Remarque: * Le détecteur semi-conducteur le plus couramment utilisé en spectrométrie gamma et le cristal de germanium hyper-pur. Son inconvénient principal sous un aspect pratique d'utilisation et la nécessité d'être refroidi à l'azote liquide (77 k) pour réduire le courant de fuite dû à l'agitation thermique .

* Les détecteurs au silicium ont l'avantage de ne pas nécessiter de refroidissement et sont très utilisés pour la spectrométrie en dessous de 50 KeV. Le pouvoir d'arrêt du silicium par effet photoélectrique est cependant plus faibles que celui du germanium (numéro atomique plus petit) ce qui restreint leur domaine d'application à la spectrométrie X.

* Les semi-conducteurs utilisés comme détecteurs contiennent le moins d'impureté possible: Le silicium qualité détecteur ou le germanium hyper pur atteignent la limite de purification, soit 10^{10} impuretés par cm^3 .

* D'autres semi-conducteurs sont à l'étude pour s'affranchir de la contrainte de refroidissement tels que CdTe, Hgl2, AsGa mais Leur résolution et moins bonne et il est actuellement très difficile de produire des cristaux de taille comparable à celle des détecteurs au germanium.