

Chapitre 9:

Détecteurs basés sur l'ionisation dans les semiconducteurs

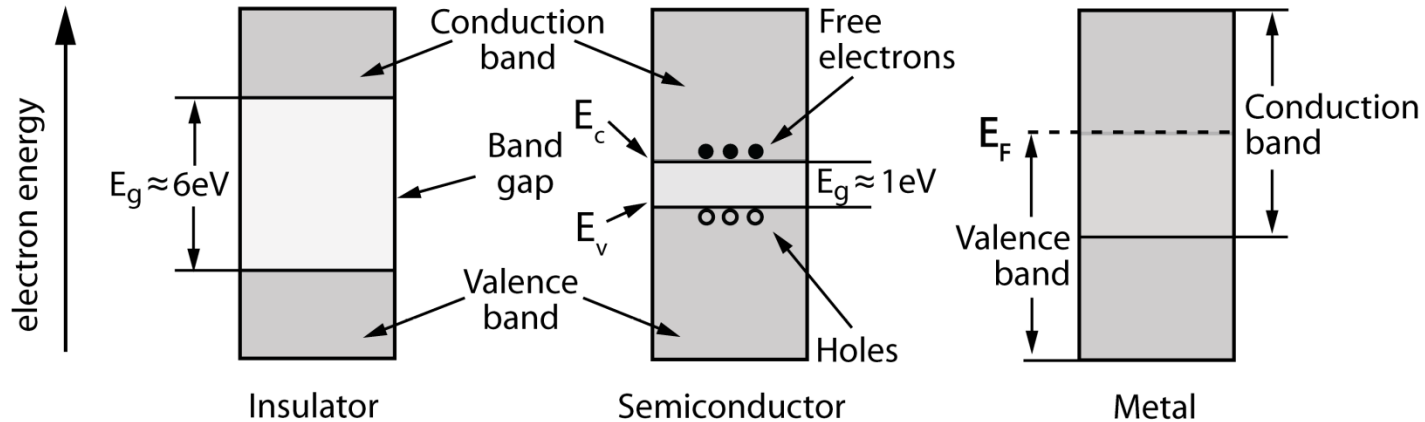
Contenu

- Introduction aux semiconducteurs
- Jonction p-n utilisée comme détecteur
- Détecteurs au silicium
- Détecteurs au germanium
- Autres matériaux

Semiconducteurs comme détecteurs

- Détecteur semiconducteur → « comparable » à un détecteur à gaz où le milieu gazeux est remplacé par un milieu solide placé entre 2 électrodes
- Le passage d'un rayonnement ionisant crée des paires e^-h^+ (à la place des paires e^- -ions dans un détecteur à gaz) → les paires sont collectées par un champ électrique
- Détecteur semiconducteur → chambre d'ionisation solide
- Avantage 1 → énergie moyenne nécessaire pour créer une paire ~ 3 eV → $\sim 10 \times$ plus petite que pour un gaz → meilleure résolution
- Avantage 2 → densité plus élevée que pour un gaz → pouvoir d'arrêt élevé → plus compact
- Inconvénient → nécessite une faible température (sauf le silicium) → système cryogénique nécessaire

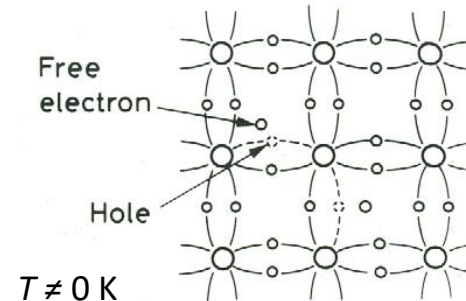
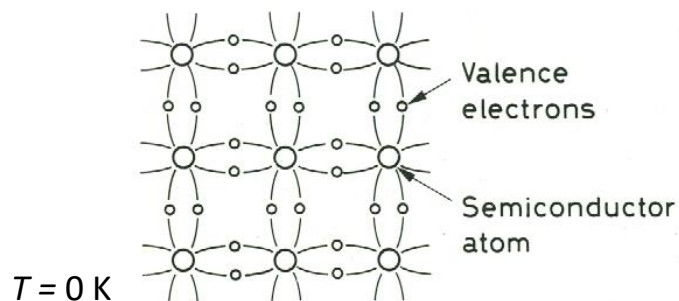
Structure en bandes d'énergie



- Les bandes d'énergie sont constituées de nombreux états électroniques extrêmement proches $\rightarrow$ continuum
- Configuration permise par la structure périodique du réseau cristallin (recouvrement des fonctions d'onde électroniques)
- Existence de domaines d'énergies interdites $\rightarrow$ gap d'énergie (largeur: E_g)
- Les e^- dans la bande de valence sont liés aux atomes
- Les e^- dans la bande de conduction sont libres
- E_F : énergie de Fermi (énergie de l'état occupé le plus élevé à $T = 0\text{ K}$)

Porteurs de charge dans un semiconducteur (1)

- À $T = 0$ K, tous les e^- sont dans la bande de valence → bande de conduction vide → pas de courant si champ électrique appliqué
- À T ambiante → les fluctuations thermiques provoquent l'excitation d'un certain nombre d' e^- de la bande de valence vers la bande de conduction → porteurs de charge négatifs → présence de trous (h^+) à leur position d'origine dans la bande de valence
- Un e^- de la bande de valence peut migrer de sa position d'origine vers le trou et le combler → cette séquence peut se répéter → mouvement des h^+ à travers le cristal → porteurs de charge positifs
- Porteurs de charges → un champ électrique appliqué produit un courant
- Dans un semiconducteur → 2 sources de courant: mouvement des e^- libres dans la bande de conduction et des h^+ dans la bande de valence



Porteurs de charge dans un semiconducteur (2)

- Lorsque de l'énergie est cédée à un atome du cristal par un rayonnement incident sur le semiconducteur $\rightarrow$ un e^- peut être excité dans des niveaux d'énergie élevée de la bande de conduction $\rightarrow$ présence d'un h^+ dans la bande de valence
- Très rapidement après cette 1^{ère} excitation $\rightarrow$ l' e^- redescend vers le bas de la bande de conduction et l'atome ionisé perd son énergie d'excitation laissant un h^+ dans le haut de la bande de valence
- L'énergie perdue au cours de ce processus donne lieu à la création de phonons et à d'autres excitations qui produisent d'autres paires e^-h^+ $\rightarrow$ création de nombreuses paires e^-h^+
- Après $\sim 10^{-12}$ s $\rightarrow$ tous les e^- sont dans le bas de la bande de conduction et tous les h^+ dans le haut de la bande de valence
- L'énergie initiale s'est répartie entre les paires e^-h^+ et le réseau cristallin (création des phonons) $\rightarrow$ équivalence $e^-h^+ \leftrightarrow e^-$ -ions et phonons $\leftrightarrow$ excitations par comparaison à un gaz

Concentration des porteurs de charge pour un sc intrinsèque

- La probabilité qu'un niveau énergétique particulier soit occupé à l'équilibre thermique est donné par la distribution de Fermi-Dirac (avec $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$: la constante de Boltzmann)

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right) + 1}$$

- Les paires e^- - h^+ sont générées en continu par l'énergie thermique et se recombinent en continu aussi $\rightarrow$ pour un s-c intrinsèque à l'équilibre et sous des conditions stables $\rightarrow$ les concentrations de e^- et h^+ sont égales: $n = p = n_i \rightarrow$

$$n_i = AT^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

avec A une constante dépendant du matériau et indépendante de T

Exemples: Si et Ge

- Le silicium et le germanium sont les deux semiconducteurs les plus courants
- Ils sont tous deux utilisés comme milieu détecteur
- Leur réseau cristallin est du type « diamant »

$$n_i(Si) = 2.8 \times 10^{16} T^{3/2} \exp\left(\frac{-6450}{T}\right) / \text{cm}^{-3}$$

$$n_i(Ge) = 9.7 \times 10^{15} T^{3/2} \exp\left(\frac{-4350}{T}\right) / \text{cm}^{-3}$$

- Exemple $\rightarrow$ pour $T = 300 \text{ K} \rightarrow n_i(Si) = 6.7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Mobilités pour un sc intrinsèque

- Sous l'action d'un champ électrique appliqué $E \rightarrow$ vitesses de migration des e^- et des h^+ $\rightarrow$

$$v_e = \mu_e E$$

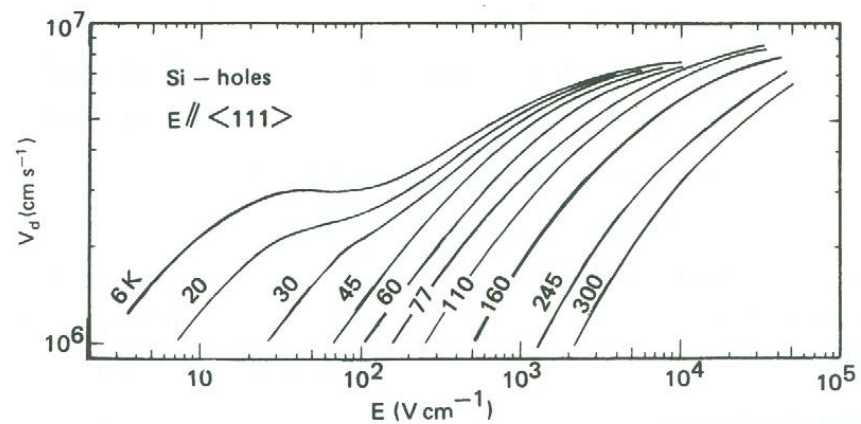
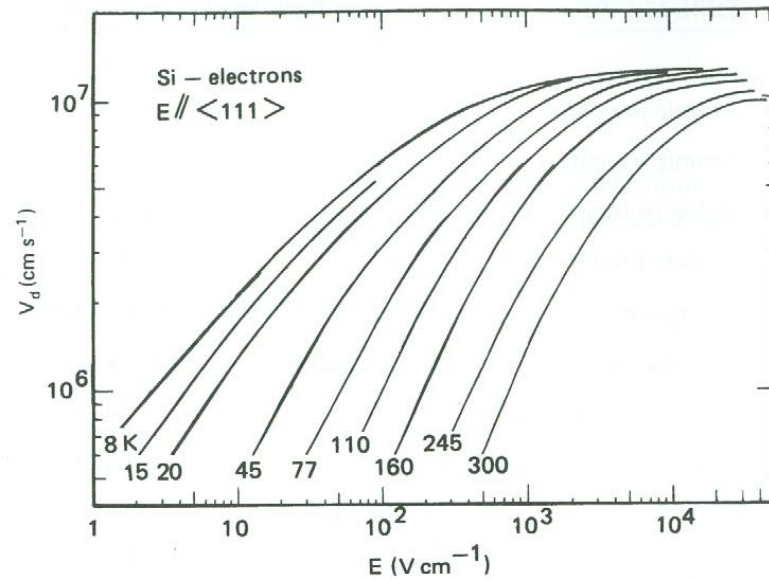
$$v_h = \mu_h E$$

avec $\mu_{e,h}$ les mobilités des e^- et des h^+ (dépendant de E et de $T \rightarrow$ pour les faibles E ($E < 10^6$ V/m) $\rightarrow \mu$ est indépendant de E ; pour les E élevés $\rightarrow \mu$ sature

- Généralement $\mu_h < \mu_e \rightarrow$ le mouvement d'un h^+ nécessite la transition d'un e^- entre atomes voisins (le rapport vaut $\approx 2-3$)
- Les mobilités déterminent le courant $\rightarrow$ et donc la conductivité σ et la résistivité $\rho \rightarrow$

$$\sigma = en_i(\mu_e + \mu_h) \quad \rho = \frac{1}{en_i(\mu_e + \mu_h)}$$

Exemple de vitesses de migration: Si



Caractéristiques du Si et du Ge

	Si	Ge
Atomic number Z	14	32
Atomic weight A	28.1	72.6
Density [g/cm^3]	2.33	5.32
Dielectric constant (relative)	12	16
Intrinsic resistivity (300 K) [Ωcm]	230000	45
Energy gap (300 K) [eV]	1.1	0.7
Energy gap (0 K) [eV]	1.21	0.785
Electron mobility (300 K) [cm^2/Vs]	1350	3900
Hole mobility (300 K) [cm^2/Vs]	480	1900

Contacts ohmiques

- Un contact ohmique permet le passage des e^- dans les deux sens
- Lorsque des e^- et des h^+ sont créés en nombre égal dans le sc $\rightarrow$ ces charges se séparent suivant leur signe
- Certaines arrivent sur leur électrode avant les autres et le milieu initialement neutre est alors chargé $\rightarrow$ cette charge d'espace crée un champ électrique qui entraîne l'injection de charge à une électrode
- Dans notre cas seuls des e^- peuvent être injectés à l'électrode négative pour maintenir les concentrations d'équilibre dans le sc $\rightarrow$ multiplication du nombre d' e^- et apparition d'un courant
- L'intensité de ce courant est peu prévisible $\rightarrow$ dépend de l'endroit où les paires sont créées, de la mobilité des porteurs et de la géométrie du champ électrique interne
- Pas de possibilité d'utilisation du sc tel quel $\rightarrow$ utilisation de jonctions pn

Semiconducteur de type n

- Le silicium et le germanium sont tétravalents
- Si on introduit une impureté (dopage) pentavalente: arsenic, phosphore, antimoine (élément donneur) → remplacement d'un atome du réseau → un e^- supplémentaire est ajouté
- Cet e^- supplémentaire est faiblement lié → facilement excité vers la bande de conduction → présence d'un niveau localisé juste en-dessous du fond de la bande de conduction
- E d'ionisation de ce niveau localisé: qqs 0.01 eV → comparable à l' E thermique → présence d'un e^- dans la bande de conduction sans h^+ dans la bande de valence → **semiconducteur de type n**
- En pratique → concentration de donneurs $N_D \gg n_i$ (concentration de porteurs à l'équilibre pour du Si non-dopé) → concentration d'électron $n \approx N_D$ ($N_D \sim 10^{15}$ atomes/cm³) →

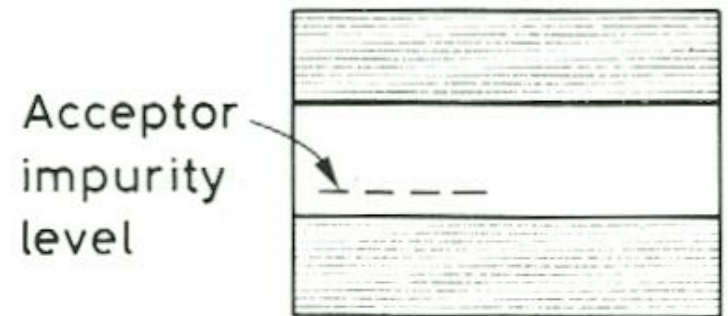
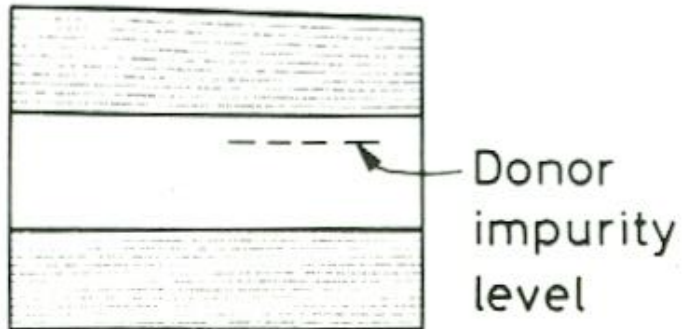
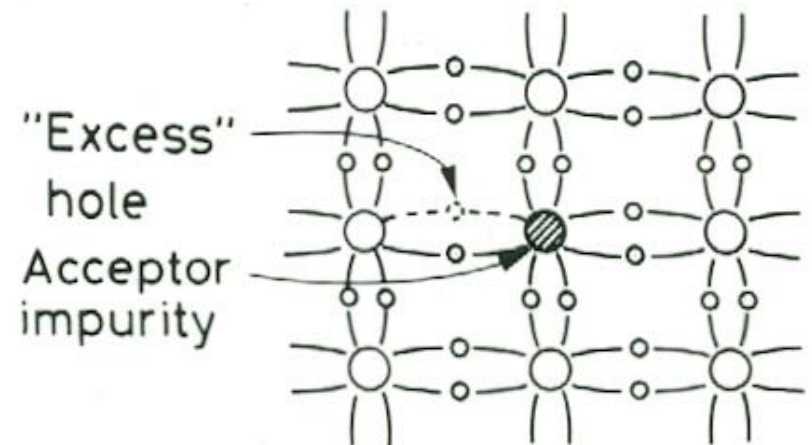
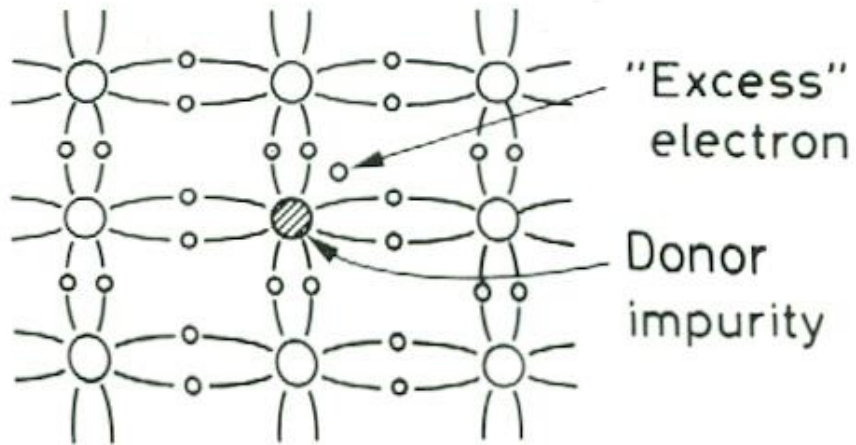
$$\sigma = eN_D\mu_e$$

Semiconducteur de type p

- Si une impureté trivalente est introduite (élément accepteur) comme le gallium, le bore ou l'indium → remplacement d'un atome du réseau → pas assez d'électrons → un h^+ supplémentaire est ajouté
- Un e^- capturé dans ce trou est moins lié qu'un e^- normal → niveau localisé juste au dessus du sommet de la bande de valence
- Les e^- dans la bande de valence sont facilement excités vers ce niveau localisé → trou supplémentaire dans la bande de valence sans e^- dans la bande de conduction → **semiconducteur de type p**
- En pratique → concentration d'accepteurs $N_A \gg n_i$ → concentration de trous: $p \approx N_A$ ($N_A \sim 10^{15}$ atomes/cm³) →

$$\sigma = eN_A\mu_h$$

Représentation des semiconducteurs dopés (extrinsèques)



Concentration des porteurs de charge pour un sc extrinsèque

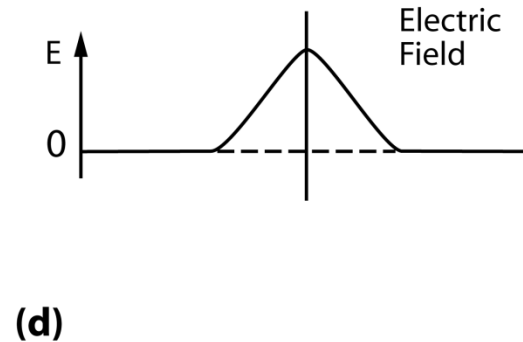
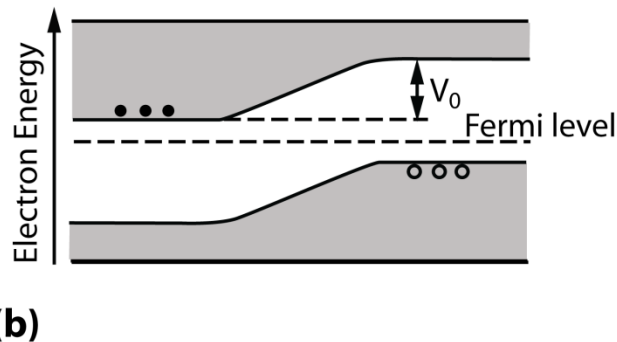
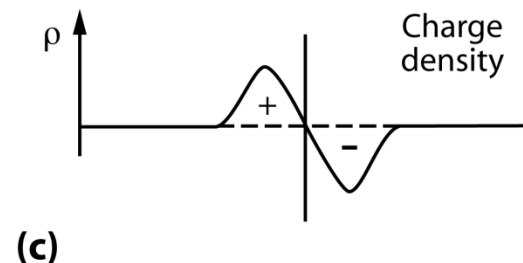
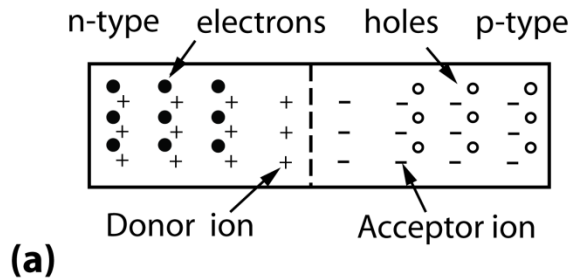
- Pour un type n $\rightarrow$ l'addition de e^- dans la bande de conduction $\rightarrow \nearrow$ du taux de recombinaison avec les h^+ $\rightarrow \searrow$ de la concentration de h^+ dans la bande de valence $\rightarrow$ à l'équilibre $\rightarrow$

$$np = n_i^2$$

- Exemple: à T ambiante, pour du Si d'une densité de $\sim 10^{22}$ atomes/cm³ $\rightarrow$ la densité intrinsèque de porteurs est $\sim 10^{10}$ atomes/cm³ $\rightarrow$ si les impuretés donneuses sont présentes avec une densité de $\sim 10^{17}$ atomes/cm³ $\rightarrow$ la densité d'électrons (n) vaut $\sim 10^{17}$ atomes/cm³ et la densité de trous (p) vaut $\sim 10^3$ atomes/cm³
- Remarque $\rightarrow$ la neutralité est assurée par les noyaux des impuretés

Jonction pn

La $\neq$ de densité de charge implique une diffusion des e^- majoritaires de la région n vers la région p et des h^+ majoritaires de la région p vers la région n $\rightarrow$ dans la zone de jonction $\rightarrow$ recombinaison des e^- et des h^+ $\rightarrow$ présence d'ions + dans la région n et d'ions - dans la région p $\rightarrow$ champ électrique (10^3 V/cm) dans cette région (appelée zone de déplétion)



Taille de la zone de déplétion (1)

- La taille de la zone de déplétion ($= d$) dépend de la concentration en impuretés en n et p $\rightarrow$ elle peut être déterminée à partir de l'équation de Poisson (avec ε la constante diélectrique) $\rightarrow$

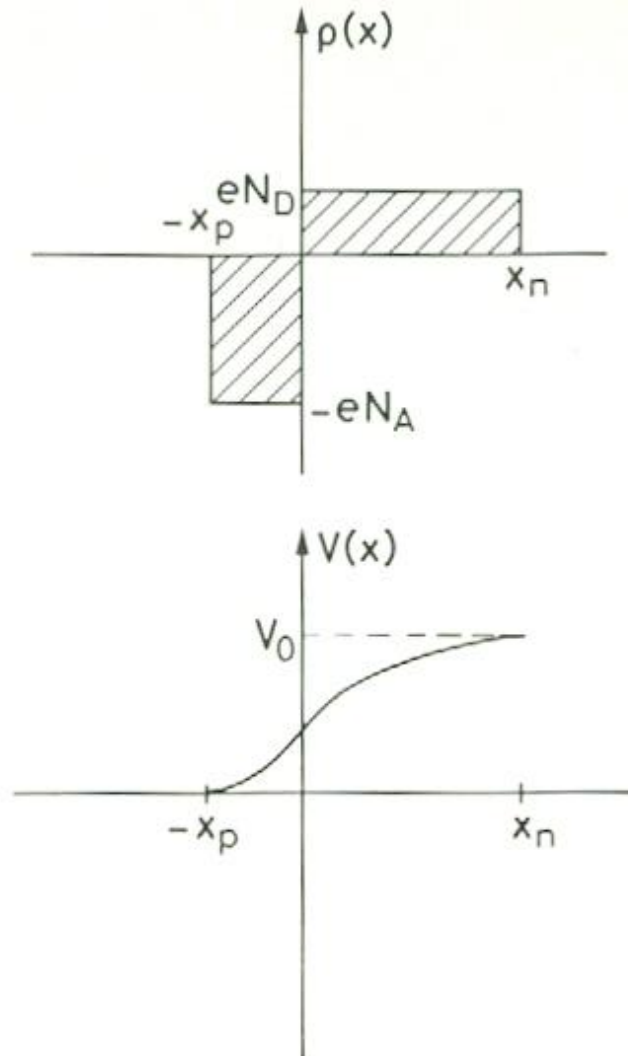
$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon}$$

- On considère une distribution de charge uniforme au niveau de la jonction, x_n et x_p les étendues de la zone de déplétion dans les régions n et p et un potentiel de contact $V_0 \rightarrow$

$$\rho(x) = \begin{cases} eN_D & 0 < x < x_n \\ -eN_A & -x_p < x < 0 \end{cases}$$

- Comme la charge est conservée $\rightarrow N_A x_p = N_D x_n$ (avec la concentration d'accepteurs $N_A \approx p$ et la concentration de donneurs $N_D \approx n$)

Taille de la zone de déplétion (2)



Taille de la zone de déplétion (3)

- En intégrant l'équation de Poisson →

$$\frac{dV}{dx} = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\varepsilon}x + C_n & 0 < x < x_n \\ \frac{eN_A}{\varepsilon}x + C_p & -x_p < x < 0 \end{cases}$$

- Comme $dV/dx = 0$ en $x = x_n$ et $x = -x_p$ →

$$\frac{dV}{dx} = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\varepsilon}(x - x_n) & 0 < x < x_n \\ \frac{eN_A}{\varepsilon}(x + x_p) & -x_p < x < 0 \end{cases}$$

- En intégrant une fois de plus →

$$V(x) = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\varepsilon} \left(\frac{x^2}{2} - x_n x \right) + C & 0 < x < x_n \\ \frac{eN_A}{\varepsilon} \left(\frac{x^2}{2} + x_p x \right) + C' & -x_p < x < 0 \end{cases}$$

Taille de la zone de déplétion (4)

- Les solutions étant égales en $x = 0 \rightarrow C = C'$ et comme $V(x_n) = V_0$ et $V(-x_p) = 0 \rightarrow$

$$V_0 = \frac{eN_D}{2\varepsilon}x_n^2 + C$$

$$0 = -\frac{eN_A}{2\varepsilon}x_p^2 + C$$

- En éliminant $C \rightarrow$

$$V_0 = \frac{e}{2\varepsilon}(N_Dx_n^2 + N_Ax_p^2)$$

- En utilisant l'équation de conservation de la charge $\rightarrow$

$$x_n = \left(\frac{2\varepsilon V_0}{eN_D[1 + N_D/N_A]} \right)^{1/2} \quad \text{et} \quad x_p = \left(\frac{2\varepsilon V_0}{eN_A[1 + N_A/N_D]} \right)^{1/2}$$



$$d = x_n + x_p$$

Taille de la zone de déplétion (5)

- En considérant, par exemple, $N_A \gg N_D \rightarrow x_n \gg x_p \rightarrow$

$$d \simeq x_n \simeq \left(\frac{2\varepsilon V_0}{eN_D} \right)^{1/2}$$

- Extension de la zone de déplétion du côté n
- Pour Si avec $\rho = 20000 \, \Omega\text{cm}$ et $V_0 = 1\text{V} \rightarrow d \approx 75 \, \mu\text{m}$

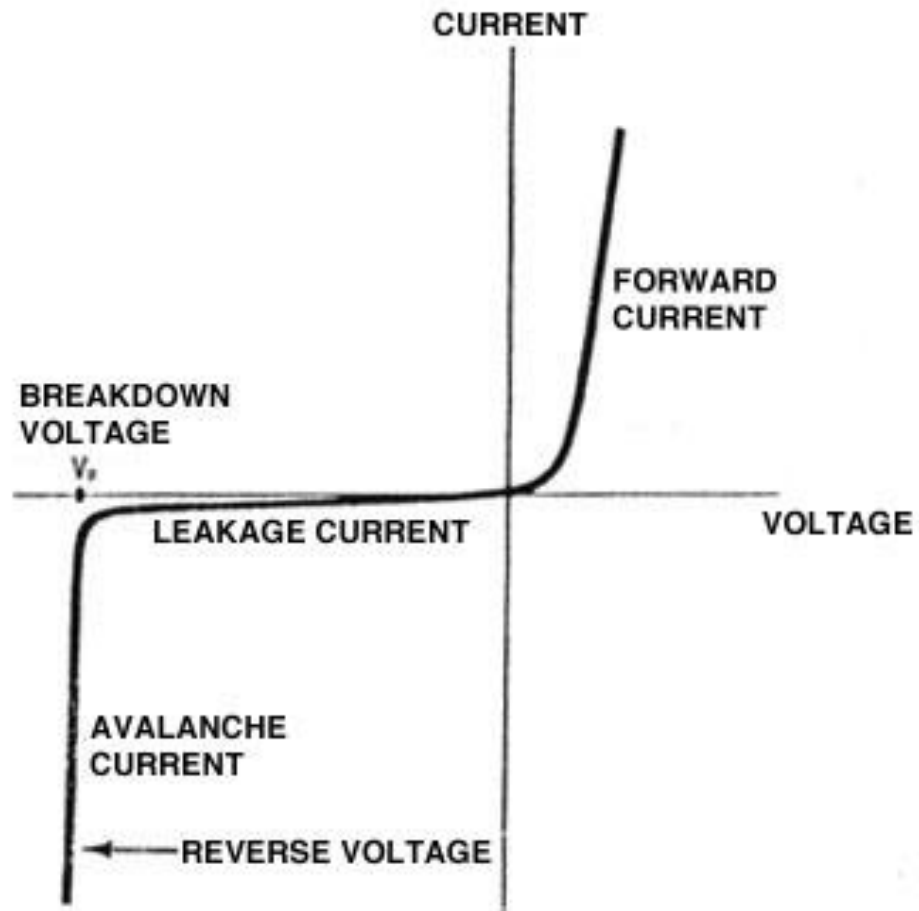
Tension appliquée

- Si une tension externe est appliquée telle que l'anode est portée à un potentiel supérieur à celui de la cathode (polarisation directe) → diminution du potentiel de la jonction → passage d'un courant → pas d'utilisation
- Si une tension externe V_B est appliquée telle que l'anode portée à un potentiel négatif par rapport à celui de la cathode (polarisation inverse) → renforcement de la différence de potentiel à la jonction → pas de courant
 1. Cette tension attire les h^+ de la région p loin de la jonction (et de manière identique les e^- dans la région n → $\nearrow$ de la taille de la zone de déplétion (dans les éqs. précédentes → utilisation de $V_B + V_0 \approx V_B$ car $V_B \gg V_0$) → 5 mm dans du Si et 20 mm dans du Ge
 2. V_B limité → attention au claquage

Claquage

- Claquage de la jonction → brusque augmentation du courant inverse lorsque la tension inverse appliquée atteint une valeur limite (tension de claquage)
- Le claquage n'est pas destructif si le courant inverse est limité par le circuit extérieur pour éviter un échauffement excessif
- 2 mécanismes de claquage → Effet Zener et effet d'avalanche
- Effet Zener → le champ électrique est suffisamment intense pour arracher un électron de la bande de valence et le faire passer dans la bande de conduction → présence d'un courant
- Effet d'avalanche → un électron fortement accéléré peut ioniser un atome lors d'une collision → paire $e^- - h^+$ → le nombre de porteurs libres augmente et le phénomène se reproduit avec le porteur initial et les porteurs secondaires → multiplication des porteurs → courant
- En fonctions des conditions (température,...) → soit Zener soit avalanche apparaît le premier

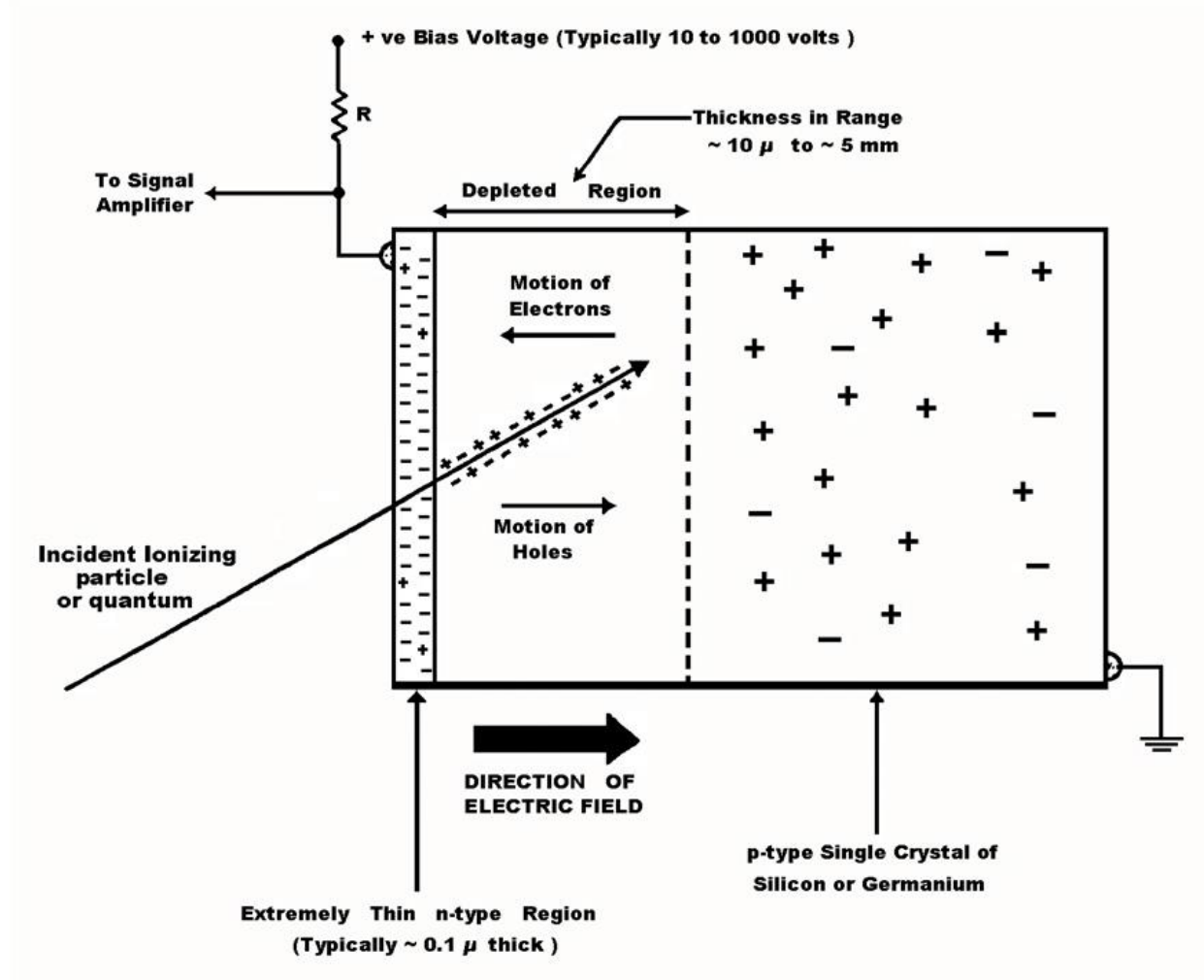
Caractéristique courant - tension



Principe d'un détecteur semiconducteur

- Un rayonnement traversant la zone désertée d'une jonction pn polarisée en inverse crée de nombreuses paires $e^- - h^+$
- Les e^- vont se diriger vers le pôle positif et les h^+ vers le pôle négatif $\rightarrow$ apparition d'un courant comme dans une chambre d'ionisation $\rightarrow$ chambre d'ionisation solide de petite taille
- Le nombre de paires $e^- - h^+$ est directement $\propto$ à l'énergie cédée par le rayonnement dans la jonction $\rightarrow$ l'intensité de courant et donc l'impulsion de tension aux bornes d'une résistance seront $\propto$ à cette énergie $\rightarrow$ détecteur permettant à la fois le comptage et la spectrométrie

Schéma d'un détecteur semiconducteur

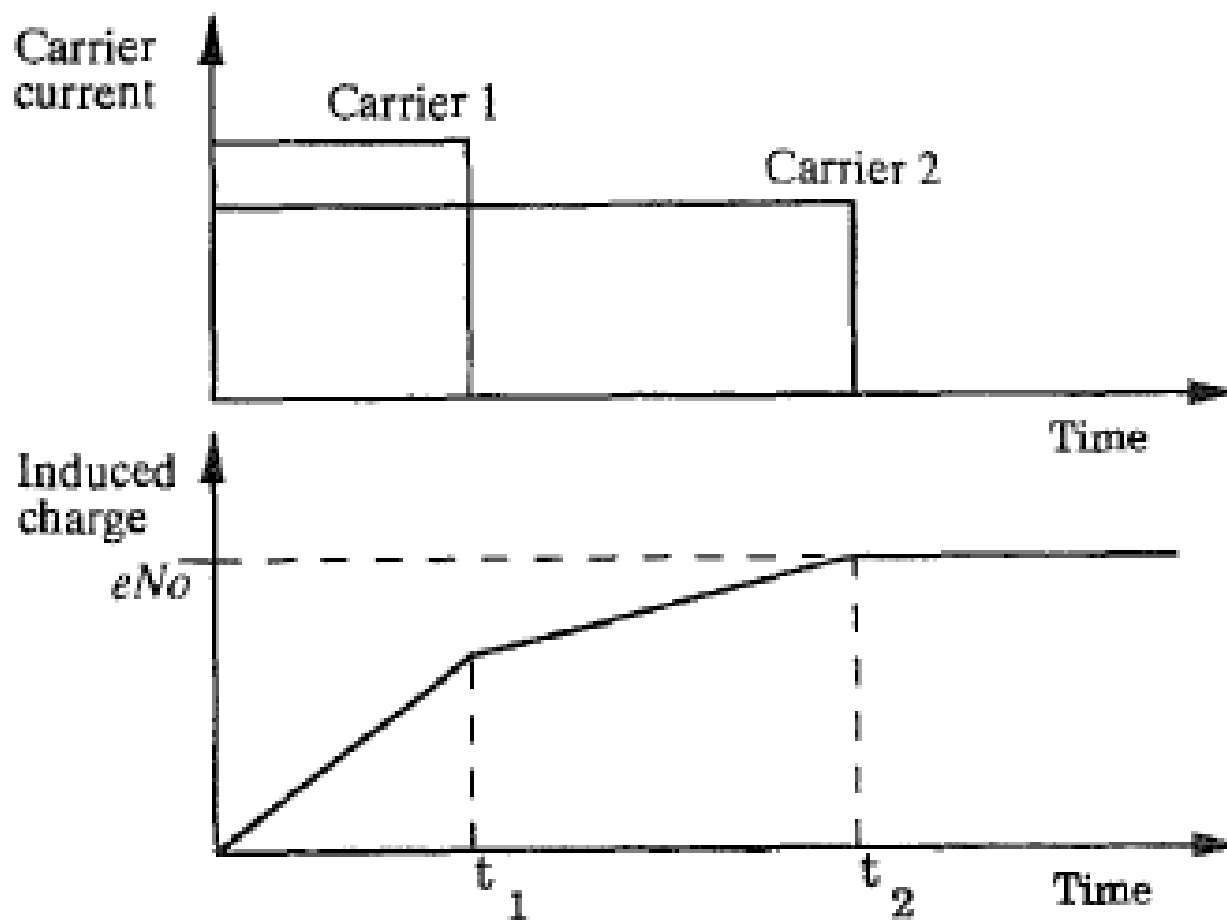


Seules les charges créées dans la zone de déplétion sont collectées

Collecte des charges (1)

- Quand un rayonnement ionisant dépose son énergie dans le volume actif du détecteur (= zone de déplétion) → création d'un nombre égal d' e^- et de h^+
- À cause du champ électrique → migration des porteurs dans des directions opposées → le mouvement des e^- et des h^+ constitue le courant qui persiste jusqu'au moment où les porteurs sont collectés à la frontière du volume actif
- Exactement le même principe que pour la collecte des charges dans une chambre d'ionisation gazeuse avec 1 différence → l'échelle de temps
- La mobilité des e^- est plus grande que celle des h^+ mais seulement d'un facteur 2 ou 3 → les temps de collection des porteurs sont similaires
- Le courant total inclut les courants dus aux 2 types de porteurs

Collecte des charges (2)



Détecteurs au silicium

- Utilisation à température ambiante (à l'exception des Si(Li))
- À température ambiante: énergie moyenne pour la création d'une paire e^-h^+ : 3.62 eV
- Désavantage $\rightarrow$ taille relativement faible de la zone de déplétion (≈ 5 mm) $\rightarrow$ utilisés principalement pour la spectrométrie (ou la détection) des particules chargées (libre parcours moyen des γ trop important)
- Autre application $\rightarrow$ détecteur des trajectoires des particules chargées
- Facteur de Fano seulement déterminé de manière imprécise mais $\approx 0.11 \rightarrow$ résolution typique pour un α de 5.5 MeV $\rightarrow 3.5$ keV (ou 0.063%)

Différents types de détecteurs au Si

- Diode à jonction diffusée
- Jonction à barrière de surface
- Jonction par implantation ionique
- Jonction compensée au lithium – Si(Li) – Diode p-i-n
- Détecteur à microstrips

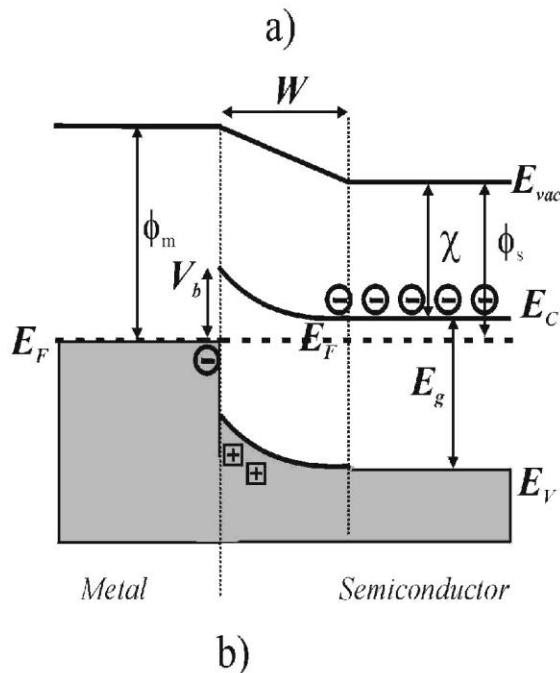
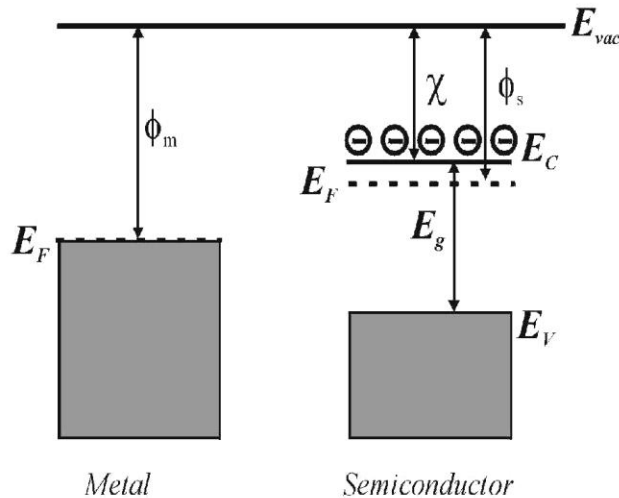
Diode à jonction diffusée

- Historiquement: 1^{ère} jonction pour la détection
- On considère un cristal homogène de type p → on fait diffuser à haute T ($\approx 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) une impureté de type donneur (phosphore par exemple) → conversion d'une zone proche de la surface en type n
- Diode très robuste mais surface très fortement dopée ($N_D \nearrow$) → extension de la zone de déplétion du côté p → présence d'une zone morte équivalente à la zone de diffusion ($\approx 1\text{ }\mu\text{m}$)
- Gênant pour la détection de particules chargées → peu utilisée actuellement

Jonction à barrière de surface

- En anglais → « Surface Barrier Detector » ou SSB
- Type de détecteur au silicium le plus utilisé
- Jonction formée entre un semiconducteur et un métal (généralement → Si de type n + Au ou Si de type p + Al)
- À cause de la $\neq$ entre les niveaux de Fermi des 2 matériaux → modification des bandes dans le sc → formation d'une barrière de Shottky
- Zone de déplétion qui peut atteindre $\approx 5 \text{ mm}$
- Avantages: processus de fabrication simple + zone morte de faible épaisseur $\sim$ épaisseur de métal $\sim 20 \text{ nm}$
- Désavantage: très sensible à la lumière (épaisseur de métal trop faible pour stopper les photons lumineux) → protection nécessaire + fragile
- Remarque: présence d'une couche d'oxyde à l'interface

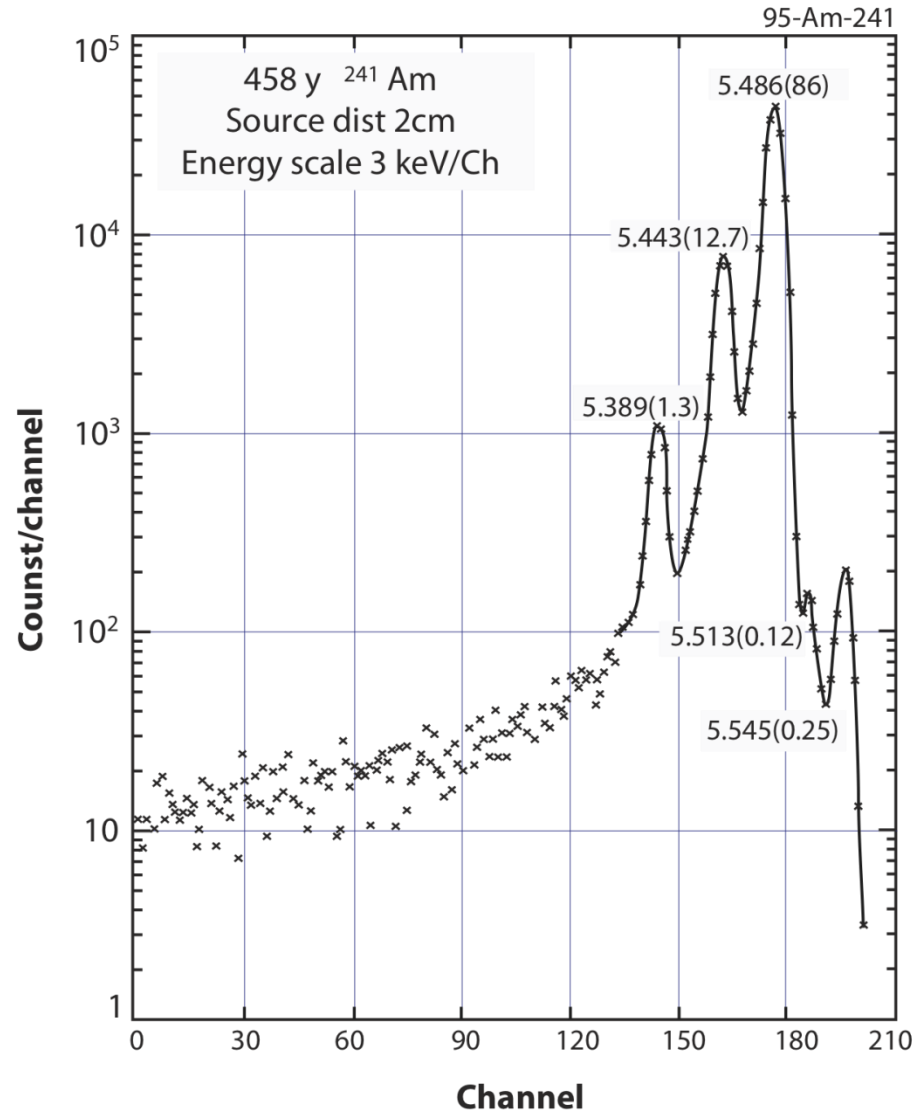
Barrière de Schottky



- Exemple: métal - sc de type n
- Lorsqu'on établit un contact entre le métal et le sc $\rightarrow$ diffusion des e^- du sc vers le métal ($\neq$ entre les E_F) $\rightarrow$ région située au niveau du contact dans le sc se vide d' e^-
- Cette région contient des donneurs positifs $\rightarrow$ apparition d'un champ électrique $\rightarrow$ diffusion des e^- stoppée
- Région de déplétion équivalente à celle d'un contact pn
- 2 différences $\rightarrow$ potentiel de contact plus faible et région de déplétion qui s'étend uniquement dans le sc

Exemple de mesure avec une SSB

Spectre énergétique des particules α émises par une source de ^{241}Am et enregistré par un détecteur à barrière de surface



Jonction par implantation ionique

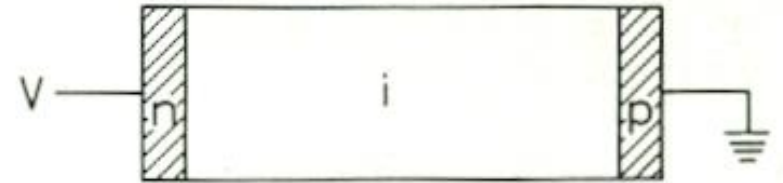
- La surface du sc (de type n ou p) est bombardée par un faisceau d'ions donneurs ou accepteurs → les dopants sont injectés dans le sc
- En ajustant l'énergie des ions du faisceau → contrôle de la profondeur de pénétration, de la concentration d'impuretés et de leur profile en profondeur
- Contrôle parfait → détecteur très stable, zone morte très mince (~ 35 nm) → le meilleur détecteur existant actuellement → utilisé particulièrement en physique des hautes énergies
- Désavantage: prix élevé

Jonction compensée au lithium – Si(Li) – Diode p-i-n (1)

- Le problème des diodes précédentes est la petite taille de leur zone de déplétion
- Solution → utilisation d'un matériau compensé (i) pris en sandwich entre des couches de type p et n → p-i-n
- Semiconducteur compensé → les impuretés d'un type donné peuvent être compensées par injection d'impuretés de l'autre type tel que $N_D = N_A$ → exactement la même quantité de donneurs et d'accepteurs
- On retrouve les caractéristiques d'un matériau intrinsèque → en particulier pas de charge d'espace dans la région i

Jonction compensée au lithium – Si(Li) – Diode p-i-n (2)

- Pas de charge d'espace $\rightarrow$ champ électrique presque constant
- La zone de compensation peut atteindre une épaisseur ≈ 15 mm = zone dans laquelle la particule doit déposer son énergie
- Possibilité de détection des β et des RX de faible énergie



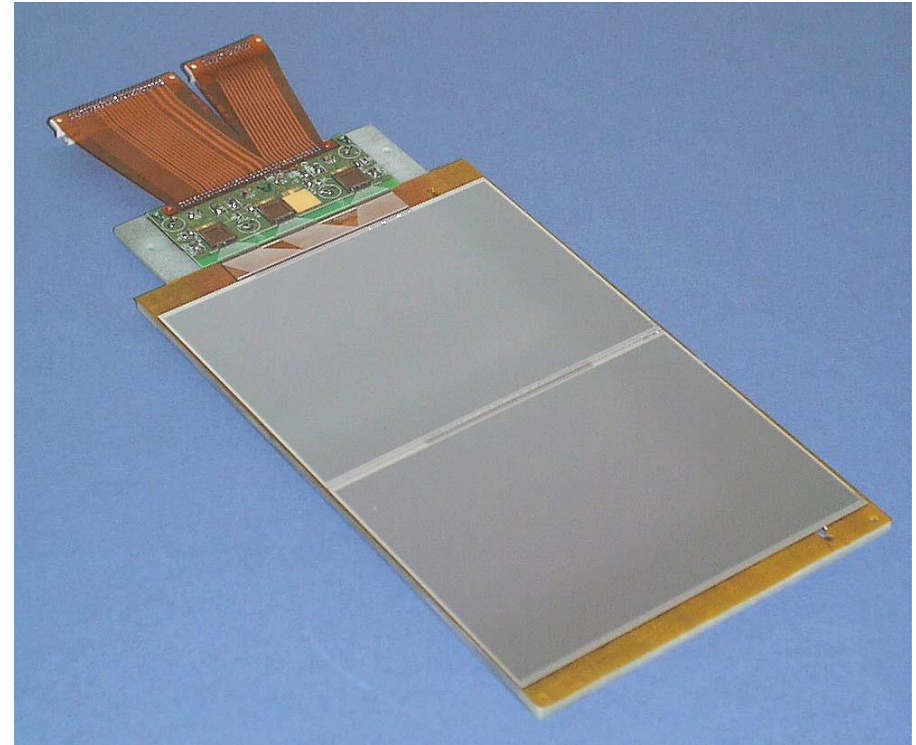
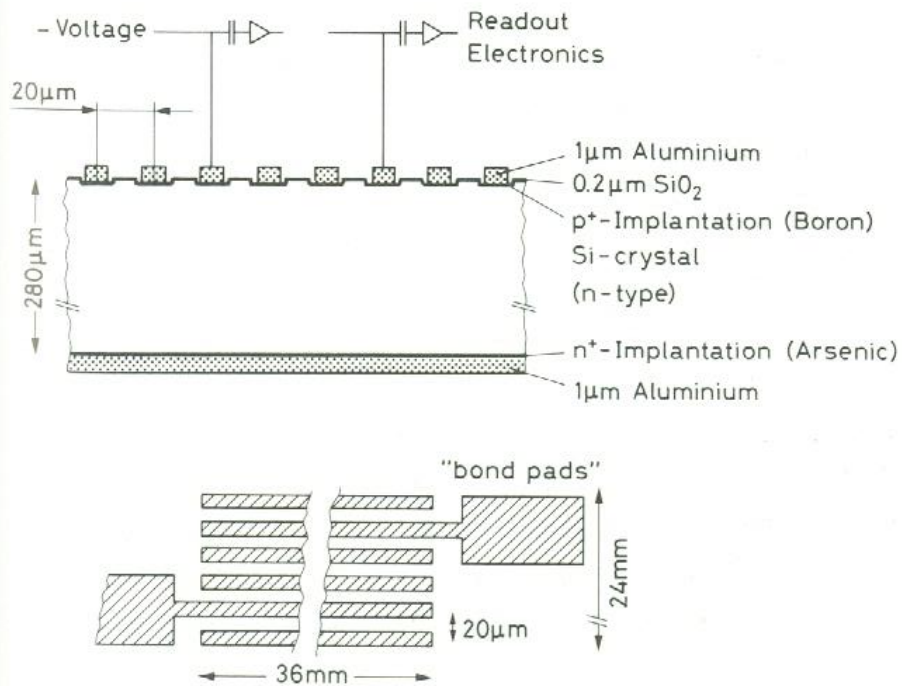
Jonction compensée au lithium – Si(Li) – Diode p-i-n (3)

- On considère du Si de type p
- On fait diffuser du lithium (matériau donneur) qui compense les accepteurs → détecteur Si(Li)
- Le lithium est utilisé en raison de son très haut coefficient de diffusion → il ne se déplace pas sur les sites du réseau mais se glisse dans les interstices et tend à former une paire avec les impuretés de type p du matériau
- Problème: à température ambiante → le Li continue à diffuser → il envahit tout le cristal → nécessité de refroidir le détecteur (même en dehors des périodes d'utilisation) → utilisation d'azote liquide

Détecteur Si à micro-bandes (1)

- Détecteur constitué d'un substrat de Si de type n sur lequel une série de micro-bandes de Si de type p sont implantées à $20\ \mu\text{m}$ d'intervalle et reliées à des contacts en aluminium
- Le nombre de charges collectées à un contact donné est dépendant de la trajectoire de la particule incidente
- Résolution spatiale $\approx 5\ \mu\text{m}$

Détecteur Si à micro-bandes (2)



Détecteur des traces des particules chargées
utilisé pour l'expérience CMS (« Compact
Muon Solenoid »)

Détecteurs au germanium (1)

- À cause de son gap en énergie faible (≈ 0.7 eV) $\rightarrow$ les mesures doivent être effectuées à basse température pour éviter les courants de fuite dus aux paires e^-h^+ générées thermiquement dans la zone de déplétion
- À 77 K (T° de l'azote liquide) $\rightarrow$ énergie moyenne nécessaire pour une paire e^-h^+ : 2.96 eV
- Numéro atomique élevé ($Z_{\text{Ge}} = 32$ tandis que $Z_{\text{Si}} = 14$) $\rightarrow$ grande section efficace pour l'effet photoélectrique ($60 \times$ plus grande pour le Ge que pour le Si) $\rightarrow$ utilisé principalement pour la détection et la spectrométrie de rayonnements γ

Détecteurs au germanium (2)

- Peu utilisé pour la détection de particules chargées car les détecteurs au Ge ne présentent aucun avantage par rapport à ceux au Si (pour ce type de détection) et ils nécessitent un refroidissement
- Résolution Typique pour des γ de 1.33 MeV: 1.7 keV (ou $R = 0.13\%$) avec $F < 0.13$
- Chers!

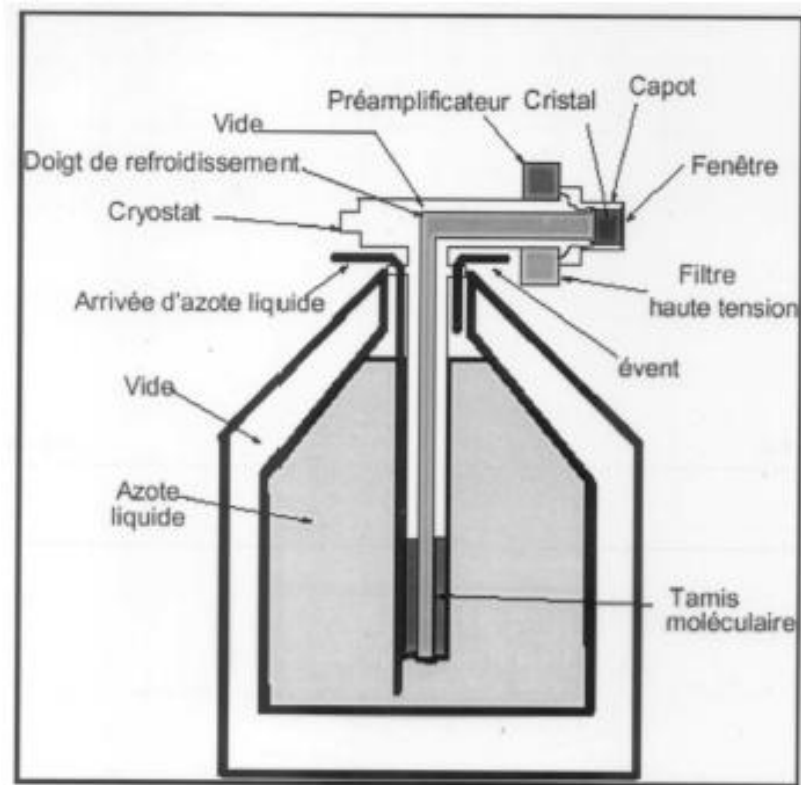
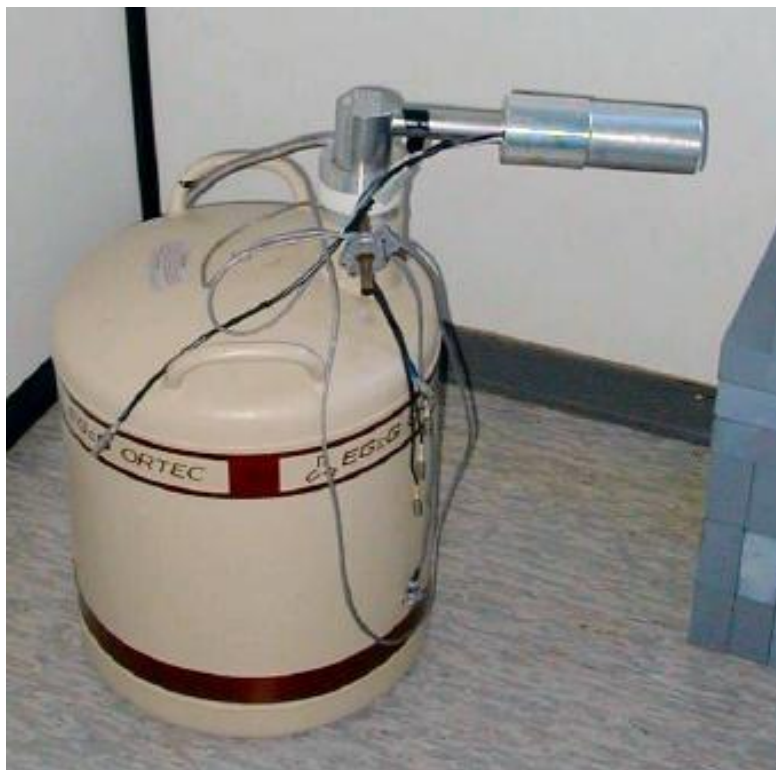
Jonction compensée au lithium – Ge(Li)

- Diffusion de lithium dans du Ge de type p → détecteur Ge(Li)
- En pratique → épaisseur de la zone compensée $\approx 15\text{-}20$ mm
- À cause de la diffusion du Li à température ambiante → nécessité de refroidir le détecteur constamment (et pas seulement pendant l'utilisation)
- Peu utilisé actuellement

Détecteur au Ge intrinsèque - HPGe

- Actuellement → possibilité d'obtenir des cristaux de Ge de haute pureté ($< 10^{10}$ atomes d'impuretés/cm³) → Ge quasi-intrinsèque → développement du détecteur HPGe (« High Purity Germanium »)
- Les cristaux sont légèrement de type p ou de type n selon la nature des traces d'impuretés résiduelles
- Les jonctions détectrices sont réalisées en dopant par implantation ionique une des faces du cristal quasi-intrinsèque qui peut être réalisé dans de gros volumes
- Refroidissement nécessaire uniquement durant leur utilisation sous rayonnement pour réduire le bruit de fond thermique et pas pendant le stockage
- Fréquemment utilisé pour la spectrométrie γ

Photo et schéma d'un détecteur HPGe à azote liquide

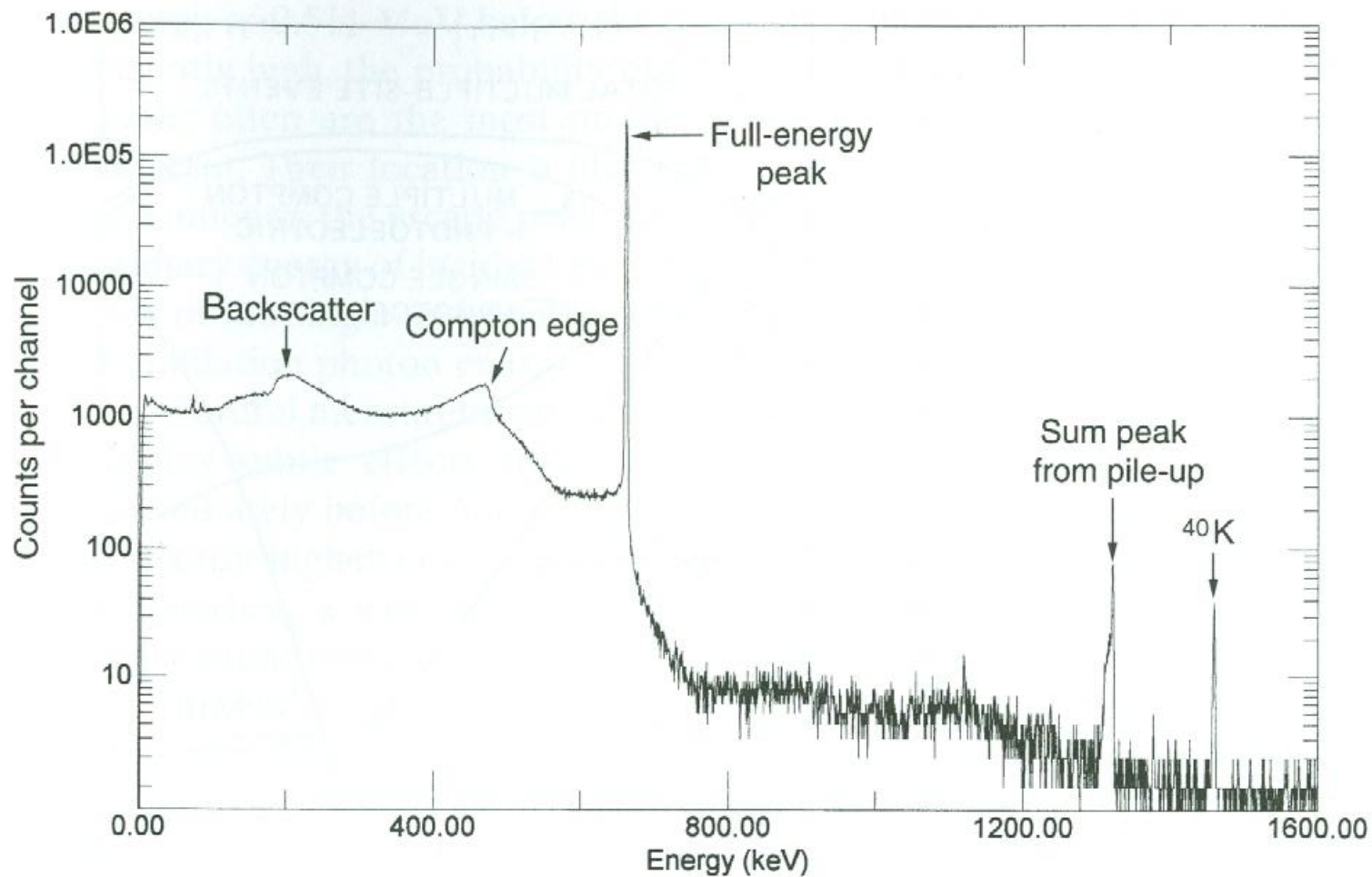


Détecteur HPGe avec refroidissement par tube à gaz pulsé



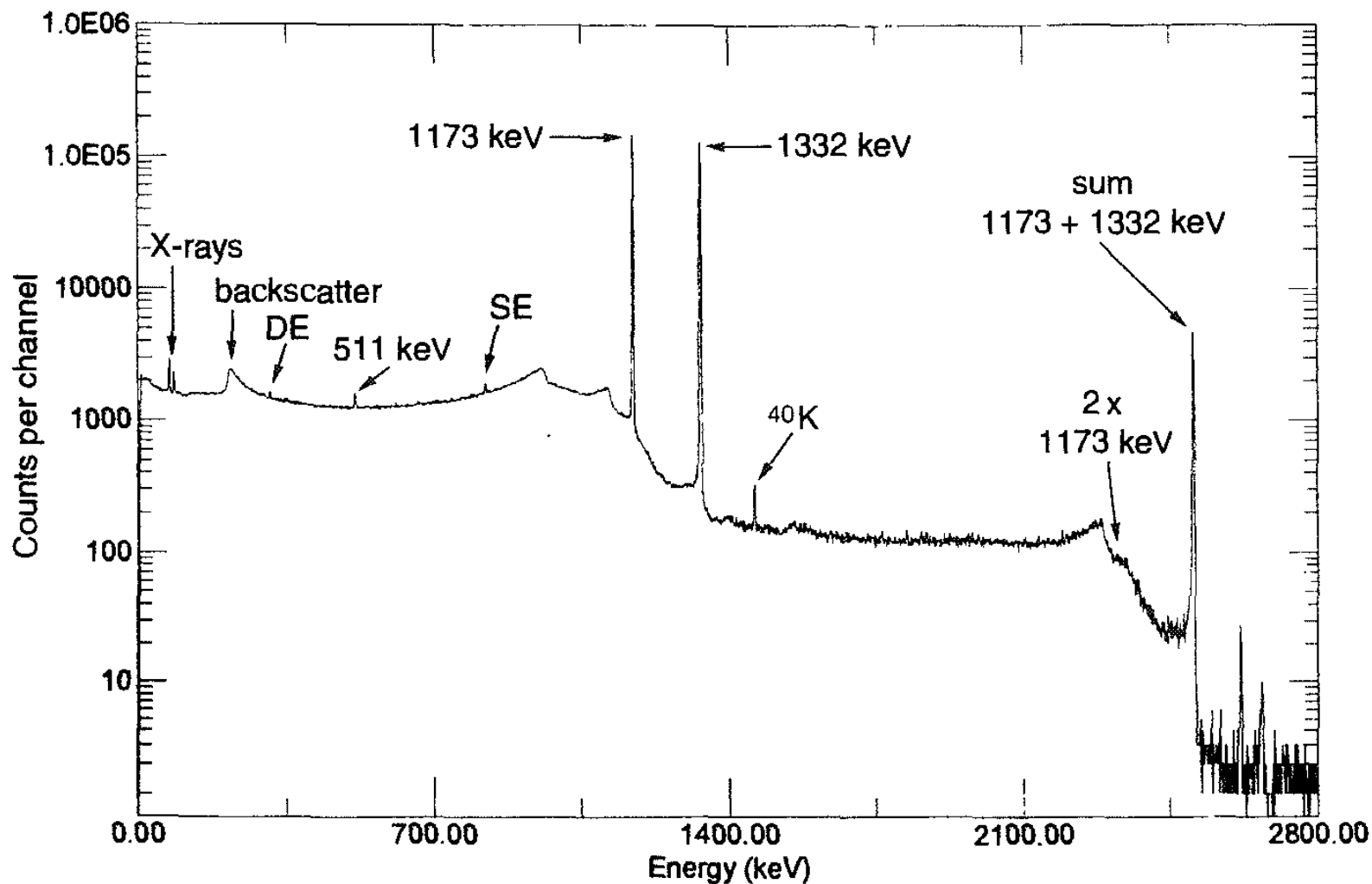
Détecteur HPGe *Falcon 5000* de Canberra avec refroidissement par tube à gaz pulsé (machine frigorifique fonctionnant en cycle fermé → permet d'obtenir des sources froides permanentes ($\approx 3-120$ K) en utilisant le cycles thermodynamique de compression/détente du He gazeux)

Exemple de spectrométrie γ avec un HPGe (1)



Spectre γ d'une source de ^{137}Cs

Exemple de spectrométrie γ avec un HPGe (2)



Spectre γ d'une source de ^{60}Co

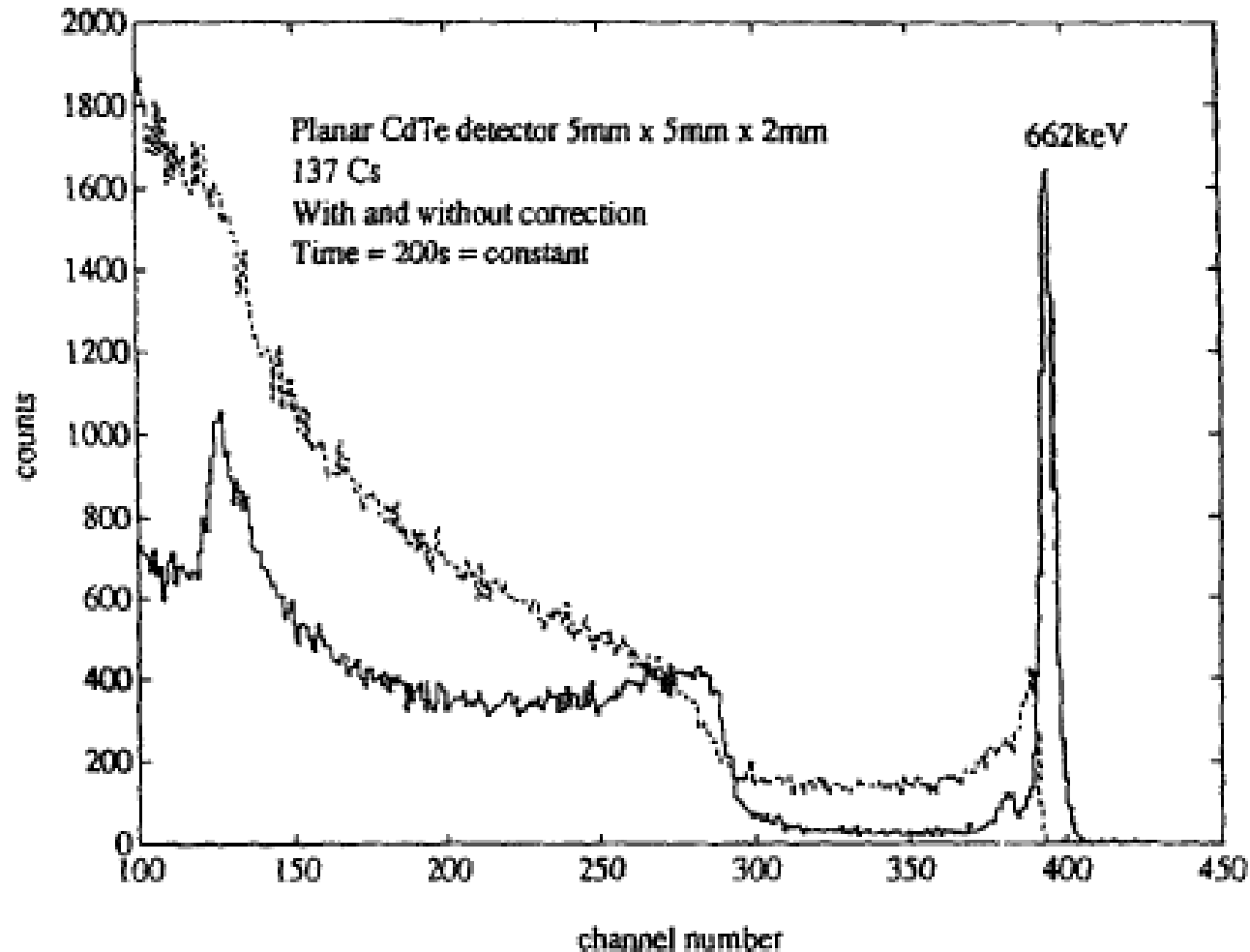
Autres semiconducteurs utilisés comme détecteurs

- Volonté d'utiliser des détecteurs de haute performance ne nécessitant pas un refroidissement → utilisation à température ambiante → peu de bruit de fond thermique → E_g « assez » grand
- Utilisation de matériau à Z élevé pour maximiser l'effet photoélectrique pour la détection des γ
- CdTe, HgI₂, GaAs, GaSb, InSb,...

Détecteurs au tellurure de cadmium (CdTe)

- Z élevé ($Z_{\text{Cd}} = 48$ et $Z_{\text{Te}} = 52$) $\rightarrow$ section efficace pour l'effet photoélectrique $5 \times$ plus grande que pour le Ge
- Bande interdite suffisamment large ($E_g = 1.52$ eV) $\rightarrow$ utilisation à température ambiante
- Efficacité de collection des h^+ faible $\leftrightarrow$ capture par des pièges $\rightarrow$ résolution en énergie moins bonne que pour Si ou Ge
- Piégeage aussi des e^- par des niveaux accepteurs profonds $\rightarrow$ accumulation de charges $\rightarrow$ polarisation variable dans le temps $\rightarrow \searrow$ de la collection des charges et $\searrow$ de l'épaisseur de la région de déplétion $\rightarrow$ efficacité $\searrow$
- Transport des charges difficile $\rightarrow$ volume limité
- Disponible commercialement mais cher
- Utilisé quand l'efficacité de détection de γ de haute énergie est primordiale

Exemple de spectrométrie γ avec un CdTe



Spectre γ d'une source de ^{137}Cs

Possibilité de compenser électroniquement le piégeage des h^+

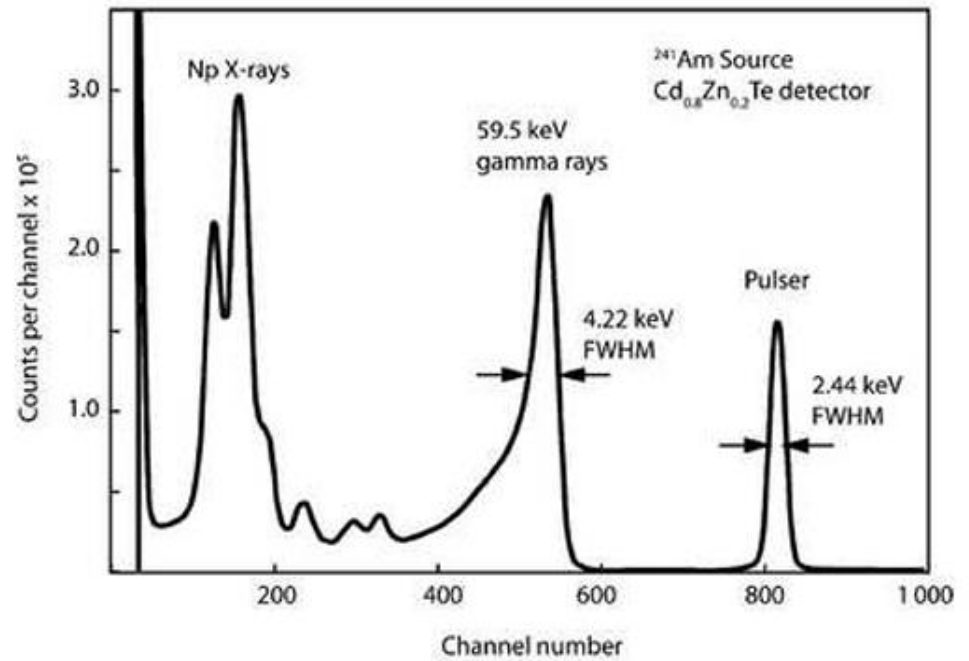
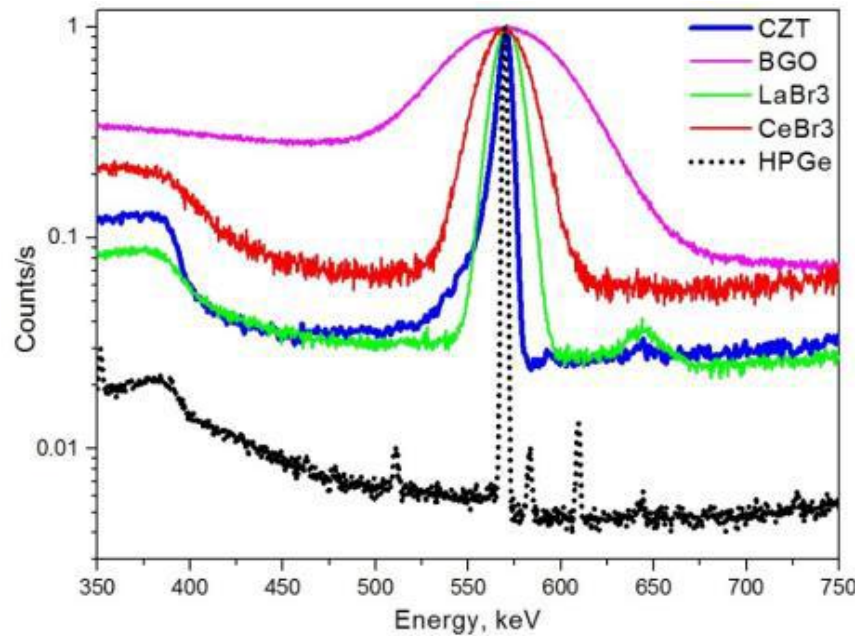
Détecteurs à l'iodure mercurique (HgI_2)

- Z élevé ($Z_{\text{Hg}} = 80$ et $Z_{\text{I}} = 53$) $\rightarrow$ section efficace pour l'effet photoélectrique $50 \times$ plus grande que pour le Ge $\rightarrow$ 85% d'un faisceau de photons de 100 keV est absorbé dans 1 mm d'épaisseur de HgI_2 (pour un même pourcentage $\rightarrow$ il faut 10 mm de Ge ou 2.6 mm de CdTe)
- Bande interdite large ($E_g = 2.13$ eV) $\rightarrow$ utilisation à température ambiante avec très peu de bruit de fond thermique
- Problèmes: mobilité des h^+ faible, piégeage des h^+ , polarisation, dégradation de la surface dans le temps $\rightarrow$ résolution limitée, volume limité, efficacité $\searrow$ dans le temps
- Prix élevé

Détecteur CZT (1)

- Utilisation du composé ternaire $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ (CZT) avec $0.04 < x < 0.2$
- Gap en énergie qui varie entre 1.53 et 1.64 respectivement
- À température ambiante → très bonne résolution en énergie et grand volume possible
- **MAIS** 10 ans auparavant →
 - Pas d'effet de polarisation mais piégeage à court terme des trous → pics asymétriques
 - Difficultés pour obtenir un cristal sans défaut (tels que inclusions métalliques, frontière de grains,...) → reproductibilité compliquée

Détecteur CZT (2)



Détecteur CZT (3)

- Actuellement → solution pour l'asymétrie → utilisation d'anodes coplanaires → le signal dépend uniquement du mouvement des électrons
- L'anode plate est remplacée par un ensemble de fines bandes parallèles connectées alternativement à deux amplificateurs différents → deux électrodes de lecture indépendantes
- Un ensemble de bandes (A) est porté à un potentiel positif légèrement supérieur à celui de l'autre ensemble de bandes (B) → 2 effets

Détecteur CZT (4)

- Effet 1 : les électrons ne se rassemblent que sur l'anode A → le mouvement des électrons à proximité des bandes induit la majeure partie du signal sur l'anode A uniquement
- Effet 2 : le mouvement des charges (trous en particulier) à grande distance du plan des bandes induit le même signal sur les anodes A et B
- La différence entre les signaux sur les deux anodes (A-B) ne dépend que du mouvement des électrons → le signal dû aux trous disparaît → l'asymétrie disparaît pour (A-B)
- Depuis → développement technologique → reproductibilité ↗ → cristaux entre 1 et 8 cm³ → très compact
- Le détecteur CZT sera le détecteur gamma dominant dans les prochaines années

Résumé des applications d'un détecteur semiconducteur

- Détecteurs au silicium (généralement SSB ou implantation) → utilisés principalement pour la spectrométrie (ou la détection) des particules chargées (proton, α ,...) et pour la détermination des trajectoires de particules chargées
- Détecteur au germanium (généralement HPGe) → utilisé principalement pour la détection et la spectrométrie de rayonnements γ
- Détecteur CZT → détection et spectrométrie de rayonnements γ pour la médecine nucléaire