

# Chapitre 9:

## Détecteurs basés sur l'ionisation dans les semiconducteurs

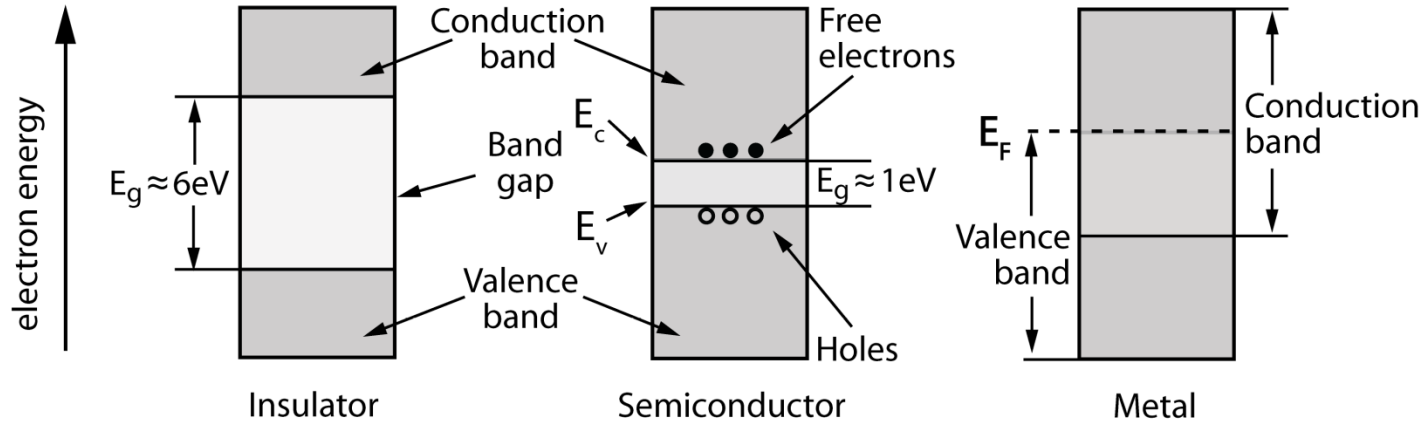
# Contenu

- 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  $\sim 3$  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

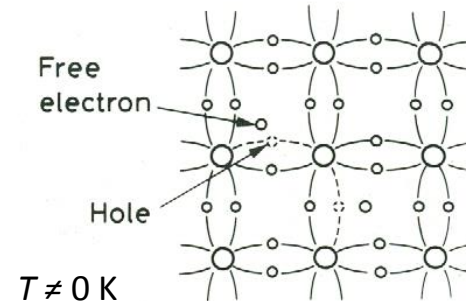
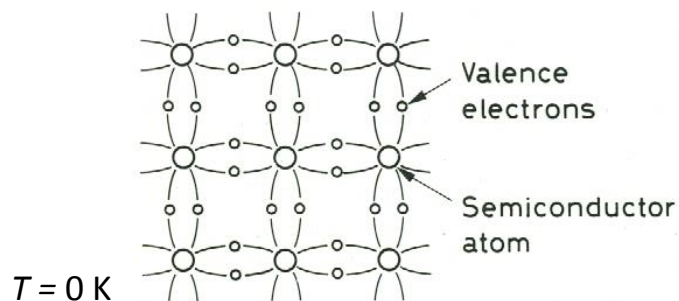
# Structure en bandes d'énergie



- 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  $\rightarrow$  bande de conduction vide  $\rightarrow$  pas de courant si champ électrique appliqué
- À  $T$  ambiante  $\rightarrow$  les fluctuations thermiques provoquent l'excitation d'un certain nombre d' $e^-$  de la bande de valence vers la bande de conduction  $\rightarrow$  porteurs de charge négatifs  $\rightarrow$  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  $\rightarrow$  cette séquence peut se répéter  $\rightarrow$  mouvement des  $h^+$  à travers le cristal  $\rightarrow$  porteurs de charge positifs
- Porteurs de charges  $\rightarrow$  un champ électrique appliqué produit un courant
- Dans un semiconducteur  $\rightarrow$  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<sup>ère</sup> 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  $h^+$   $\rightarrow$

$$v_e = \mu_e E$$

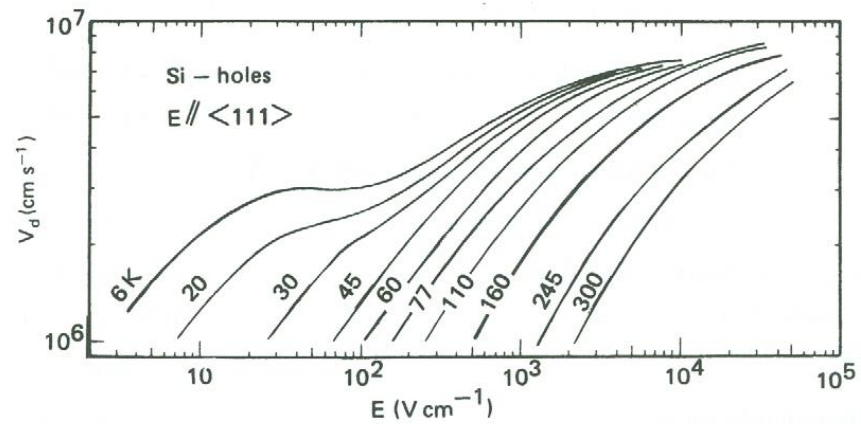
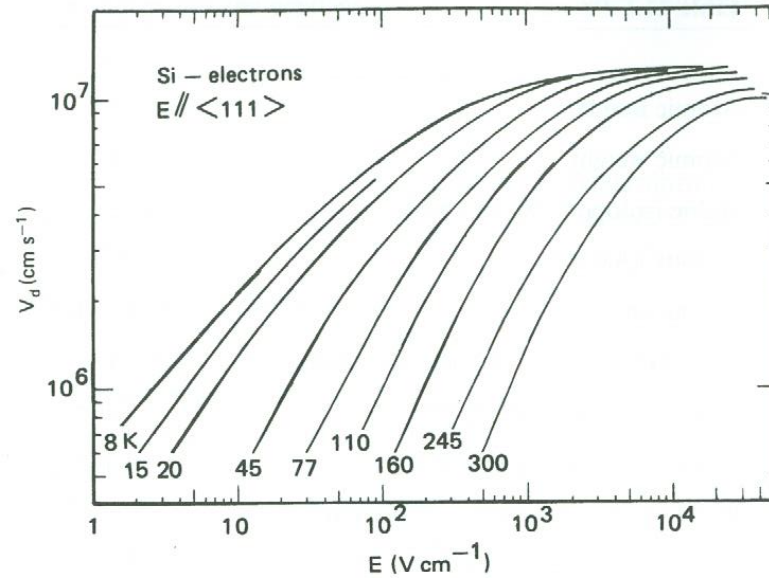
$$v_h = \mu_h E$$

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  $\sigma$  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 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]                    | 2.33   | 5.32  |
| Dielectric constant (relative)                        | 12     | 16    |
| Intrinsic resistivity (300 K) [ $\Omega\text{cm}$ ]   | 230000 | 45    |
| Energy gap (300 K) [eV]                               | 1.1    | 0.7   |
| Energy gap (0 K) [eV]                                 | 1.21   | 0.785 |
| Electron mobility (300 K) [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ] | 1350   | 3900  |
| Hole mobility (300 K) [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]     | 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/cm<sup>3</sup>) →

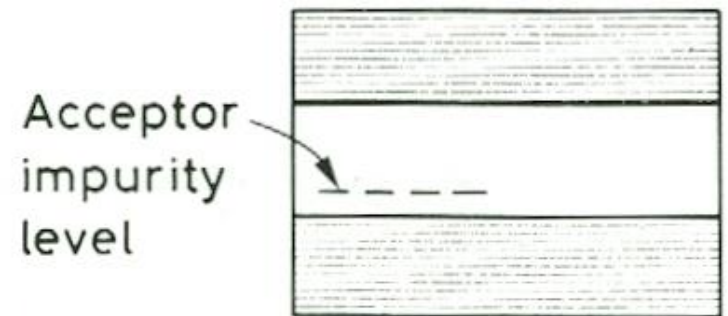
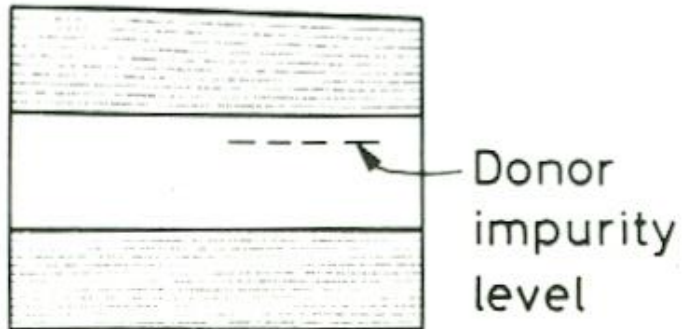
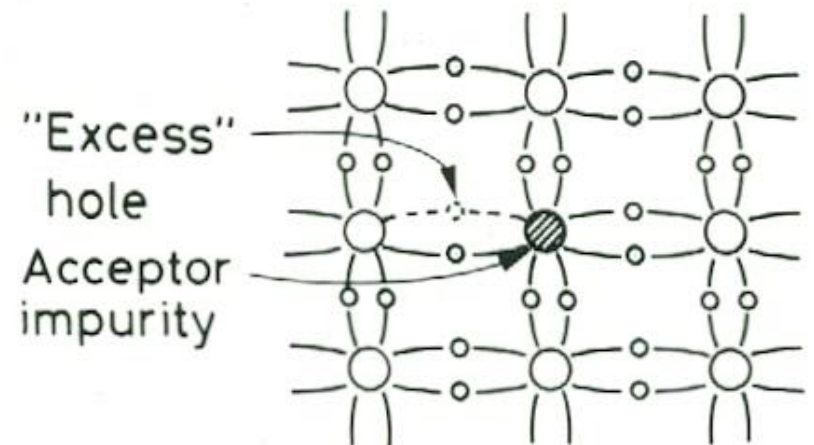
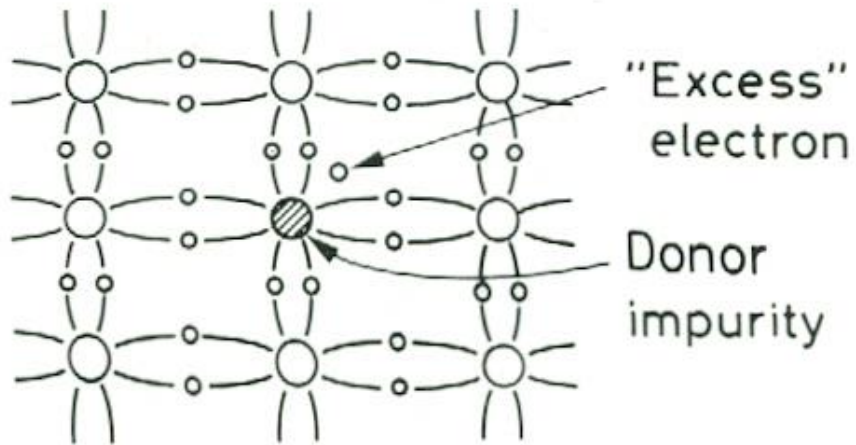
$$\sigma = eN_D\mu_e$$

## 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/cm<sup>3</sup>) →

$$\sigma = eN_A\mu_h$$

# 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  $\rightarrow$

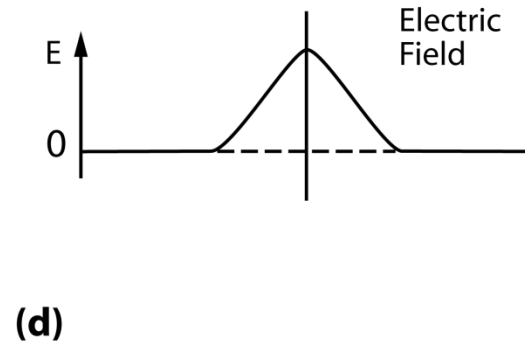
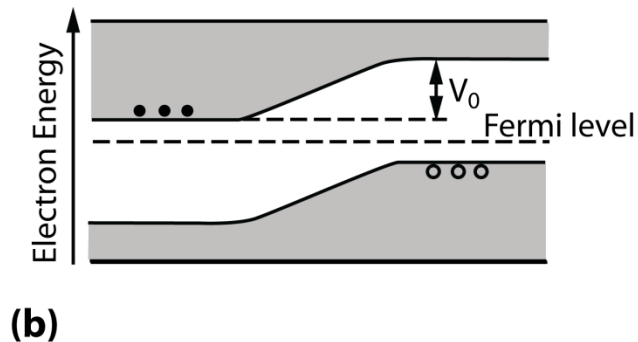
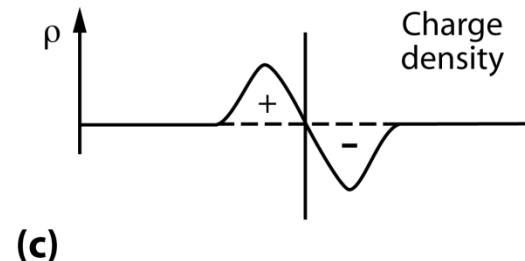
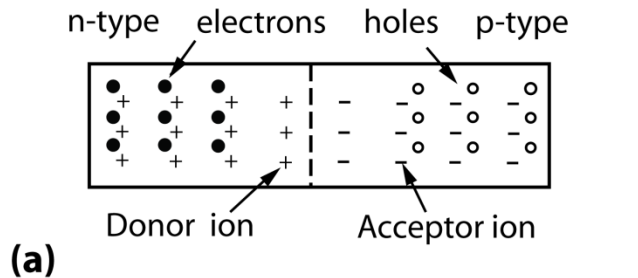
$$np = n_i^2$$

- Exemple: à  $T$  ambiante, pour du Si d'une densité de  $\sim 10^{22}$  atomes/cm<sup>3</sup>  $\rightarrow$  la densité intrinsèque de porteurs est  $\sim 10^{10}$  atomes/cm<sup>3</sup>  $\rightarrow$  si les impuretés donneuses sont présentes avec une densité de  $\sim 10^{17}$  atomes/cm<sup>3</sup>  $\rightarrow$  la densité d'électrons ( $n$ ) vaut  $\sim 10^{17}$  atomes/cm<sup>3</sup> et la densité de trous ( $p$ ) vaut  $\sim 10^3$  atomes/cm<sup>3</sup>
- 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  $\epsilon$  la constante diélectrique)  $\rightarrow$

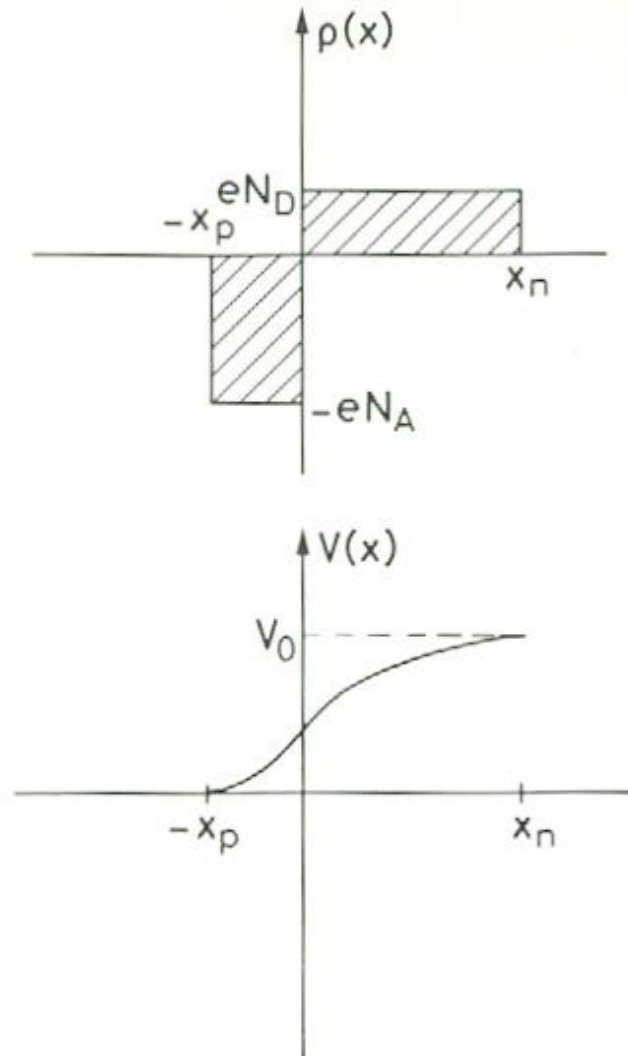
$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon}$$

- 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  $V(-x_p) = 0 \rightarrow$

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

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

- En éliminant  $C \rightarrow$

$$V_0 = \frac{e}{2\epsilon} (N_D x_n^2 + N_A x_p^2)$$

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

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



$$d = x_n + x_p$$

## 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

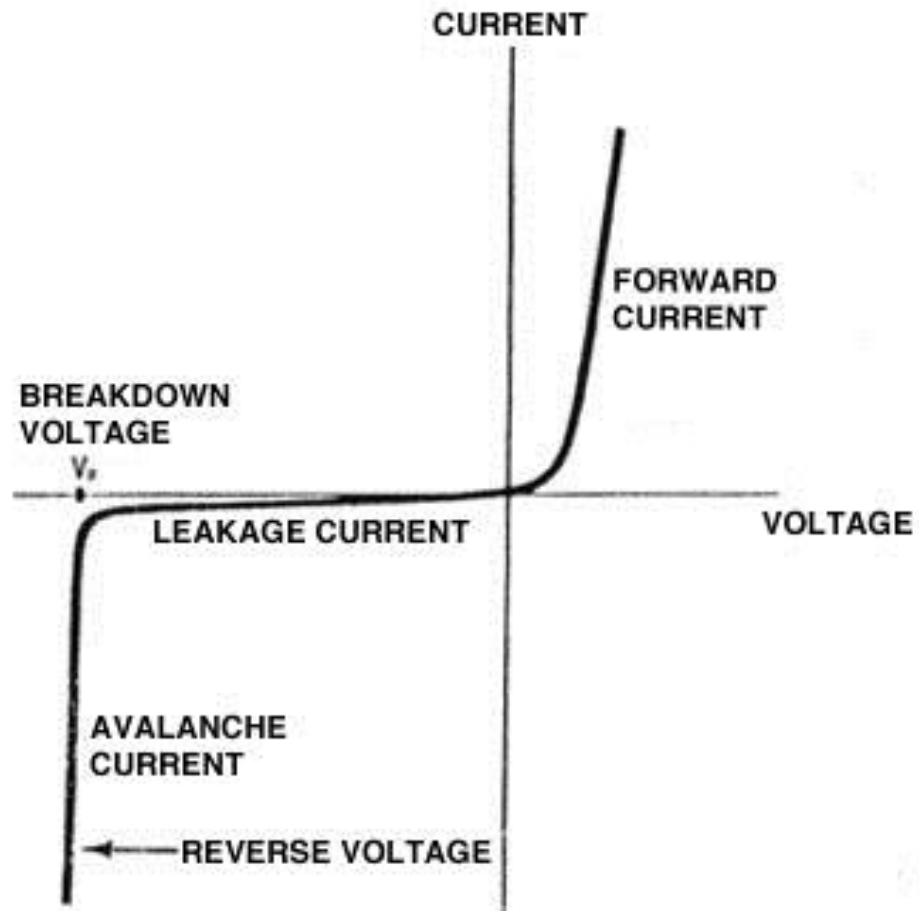
- Si une tension externe est appliquée telle que l'anode est portée à un potentiel supérieur à celui de la cathode (polarisation directe) → diminution du potentiel de la jonction → passage d'un courant → pas d'utilisation
- Si une tension externe  $V_B$  est appliquée telle que l'anode portée à un potentiel 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 → ↗ 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



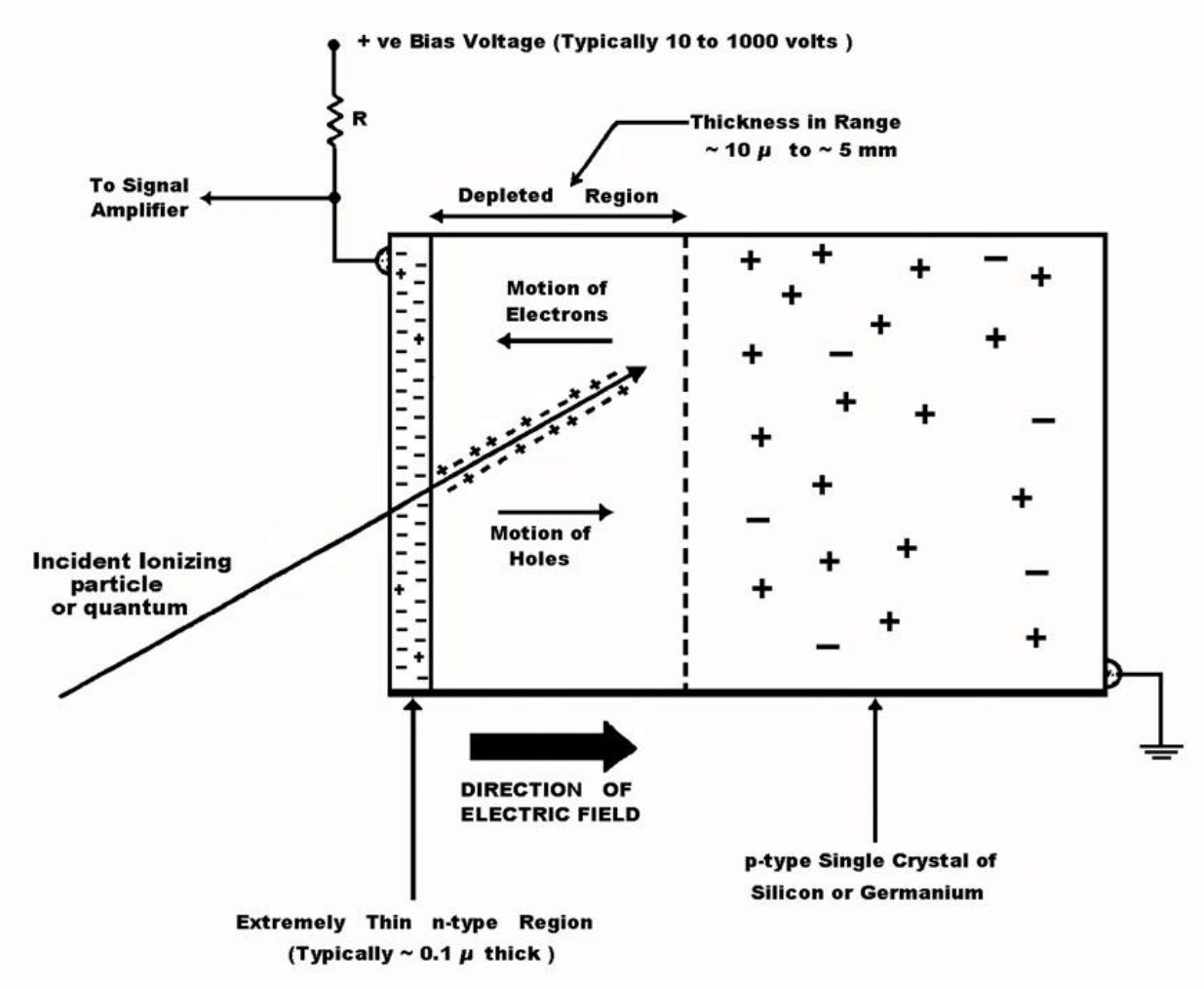
# Caractéristique courant - tension



# 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

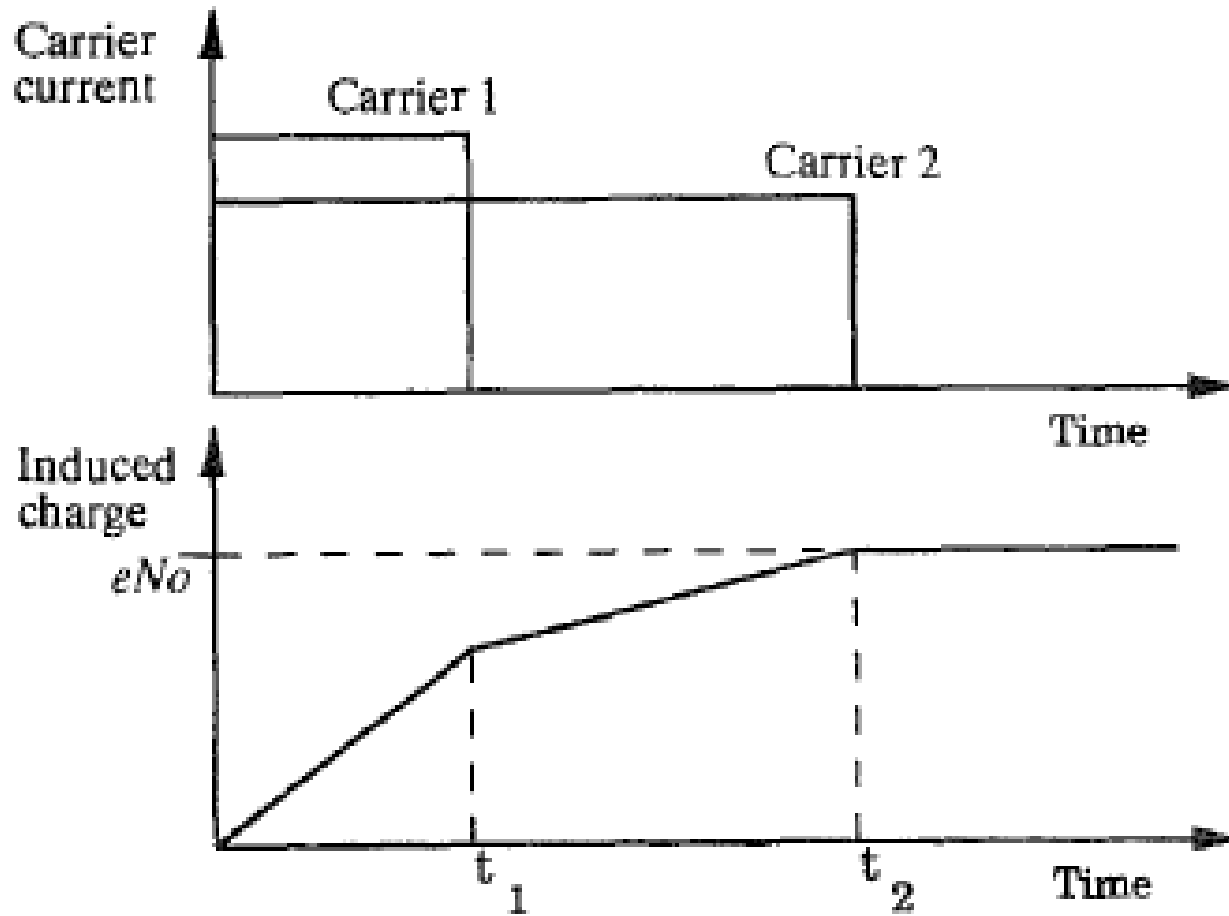


Seules les charges créées dans la zone de déplétion sont collectées

# 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 ( $\approx 5$  mm)  $\rightarrow$  utilisés principalement pour la spectrométrie (ou la détection) des particules chargées (libre parcours moyen des  $\gamma$  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  $\alpha$  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

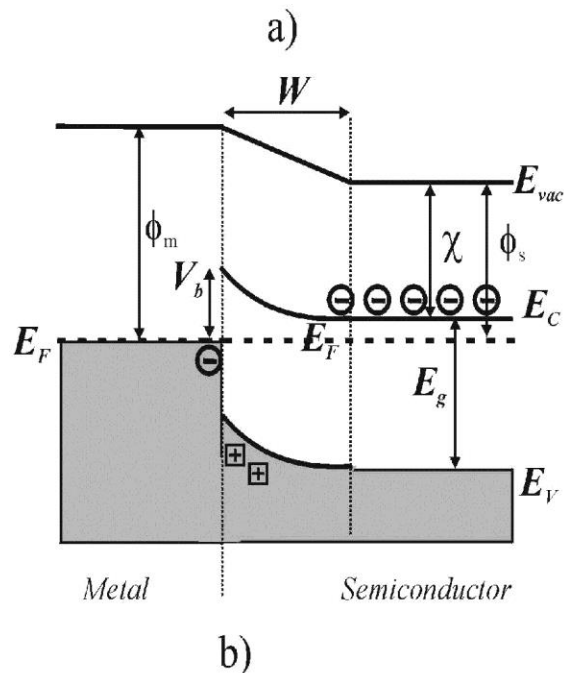
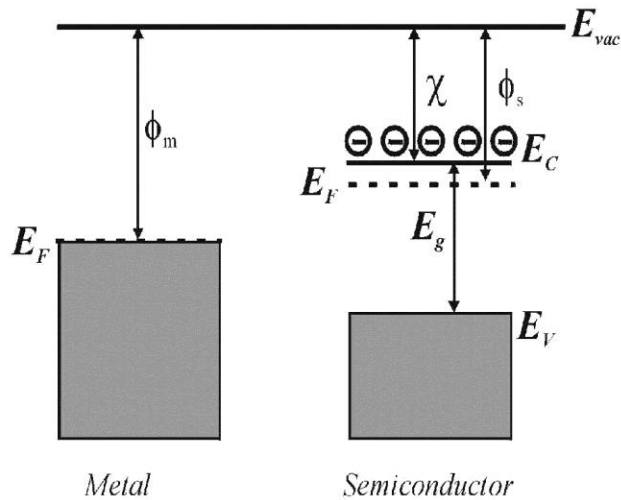
- Historiquement: 1<sup>ère</sup> jonction pour la détection
- On considère un cristal homogène de type p → on fait diffuser à haute T ( $\approx 1000$  °C) une impureté de type donneur (phosphore par exemple) → conversion d'une zone proche de la surface en type n
- Diode très robuste mais surface très 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 ( $\approx 1 \mu\text{m}$ )
- 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

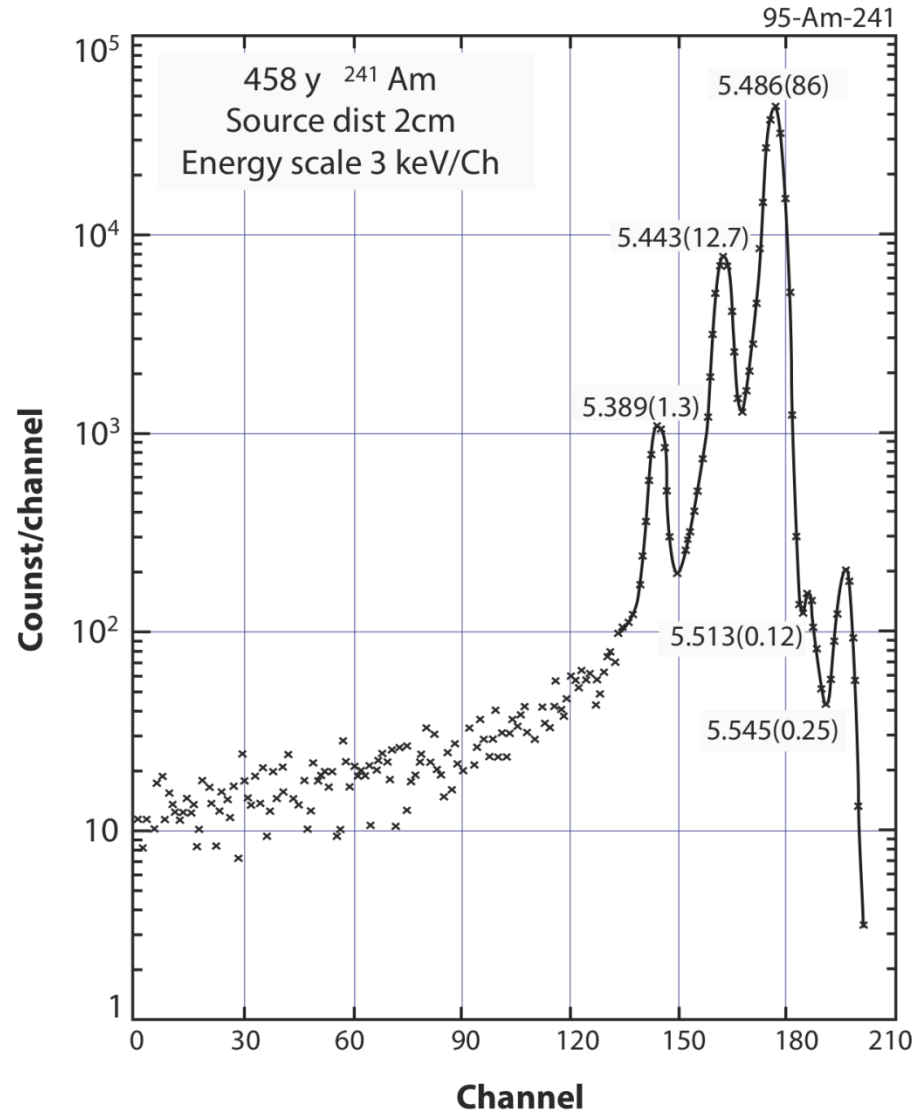
# Barrière de Shottky



- 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  $\alpha$  émises par une source de  $^{241}\text{Am}$  et enregistré par un détecteur à barrière de surface



# Jonction par implantation ionique

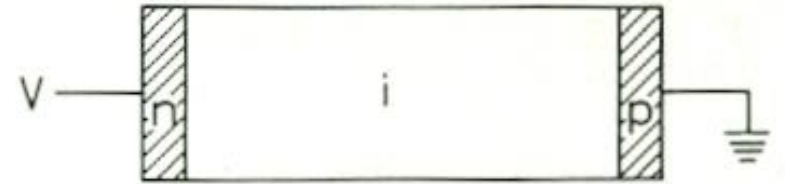
- La surface du sc (de type n ou p) est bombardée par un faisceau d'ions donneurs ou accepteurs → les dopants sont injectés dans le sc
- En ajustant l'énergie des ions du faisceau → contrôle de la profondeur de pénétration, de la concentration d'impuretés et de leur profile en profondeur
- Contrôle parfait → détecteur très stable, zone morte très mince ( $\sim 35$  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  $\approx 15$  mm = zone dans laquelle la particule doit déposer son énergie
- Possibilité de détection des  $\beta$  et des RX de faible énergie



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

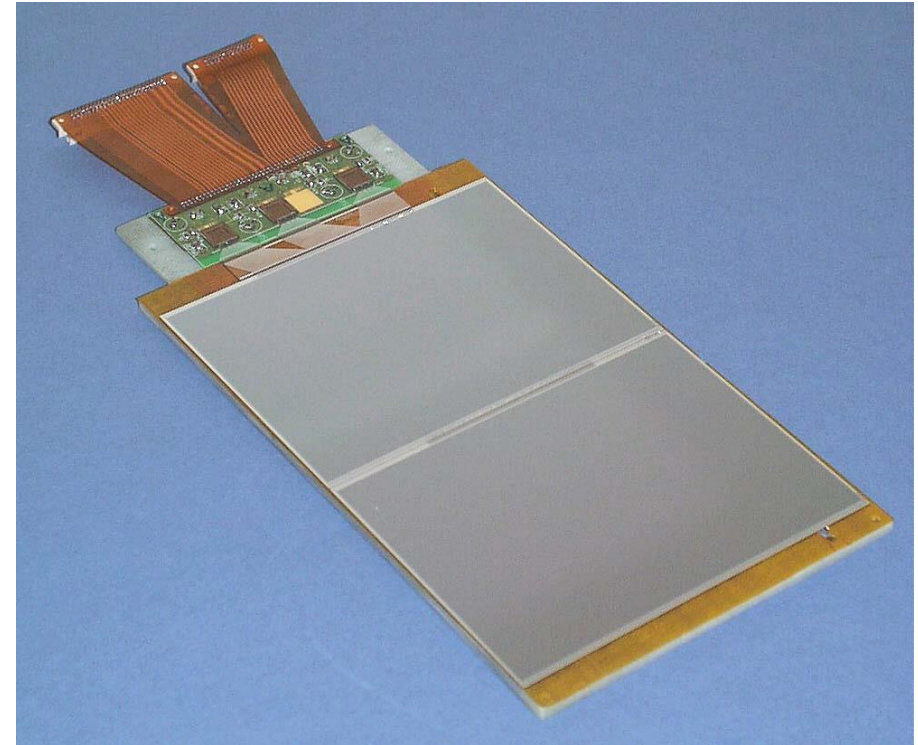
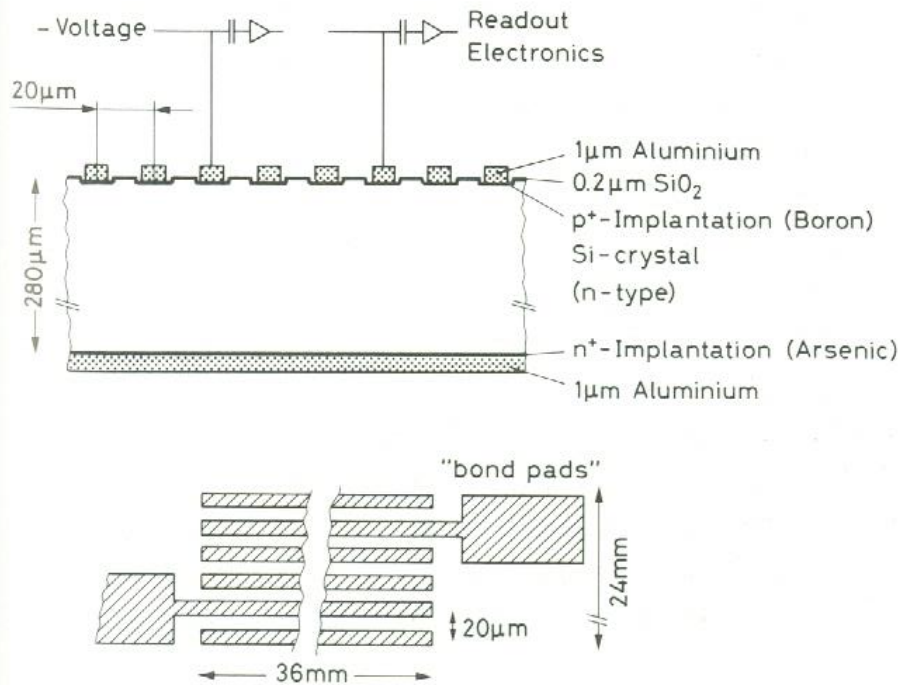
- On considère du Si de type p
- On fait diffuser du lithium (matériau donneur) qui compense les accepteurs → détecteur Si(Li)
- Le lithium est utilisé en raison de son très haut coefficient de diffusion → il ne se déplace pas sur les sites du réseau mais se glisse dans les interstices et tend à former 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 ( $\approx 0.7$  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 ( $T^\circ$  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  $\gamma$

## 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  $\gamma$  de 1.33 MeV: 1.7 keV (ou  $R = 0.13\%$ ) avec  $F < 0.13$
- Chers!

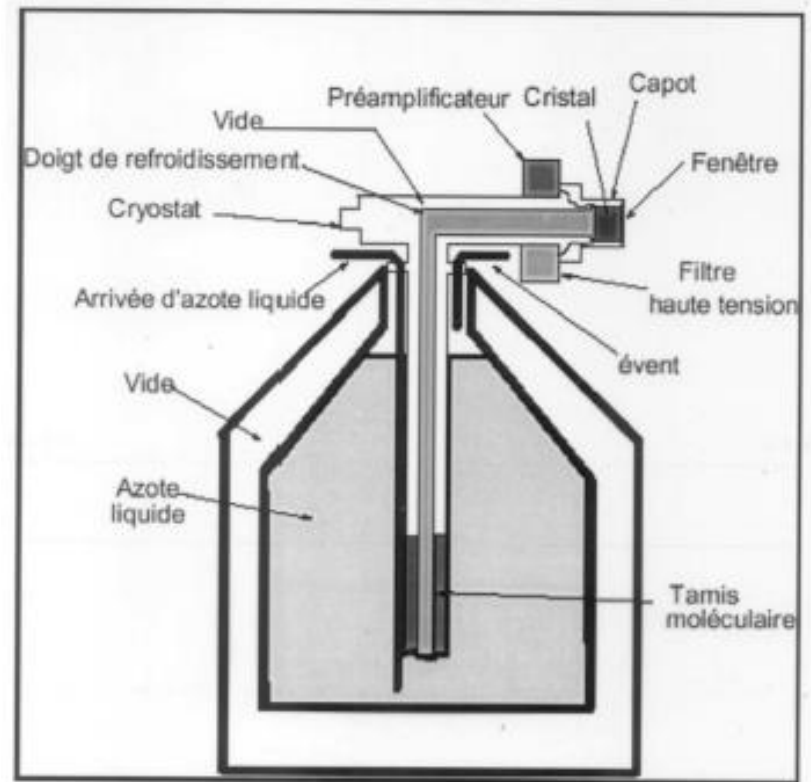
## Jonction compensée au lithium – Ge(Li)

- Diffusion de lithium dans du Ge de type p → détecteur Ge(Li)
- En pratique → épaisseur de la zone compensée  $\approx$  15-20 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

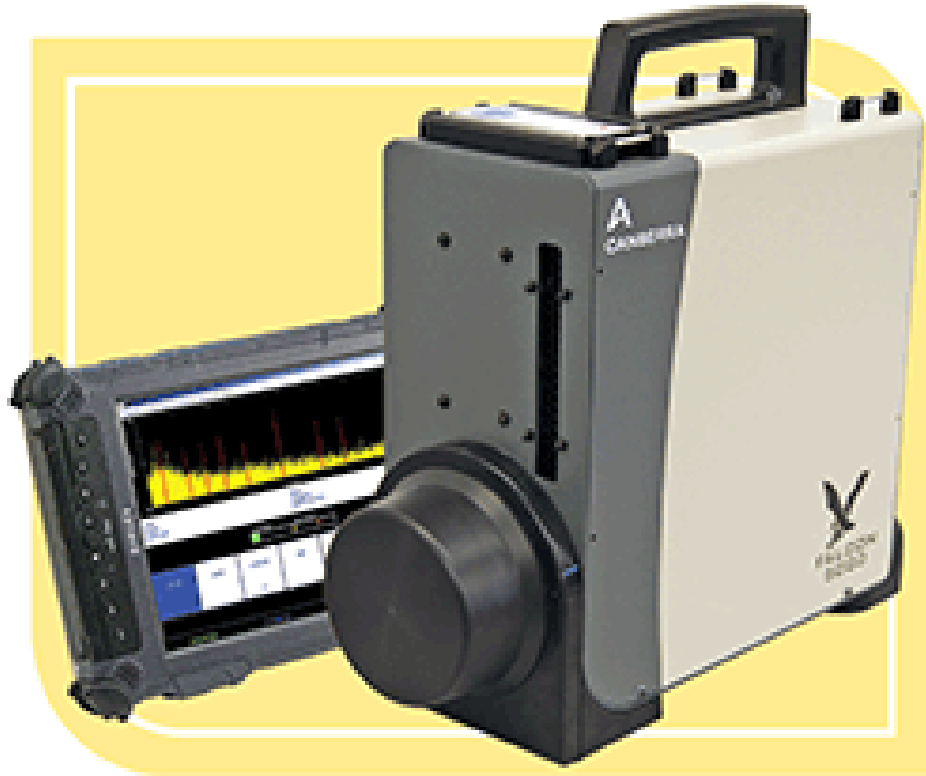
# Détecteur au Ge intrinsèque - HPGe

- Actuellement → possibilité d'obtenir des cristaux de Ge de haute pureté ( $< 10^{10}$  atomes d'impuretés/cm<sup>3</sup>) → 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  $\gamma$

# Photo et schéma d'un détecteur HPGe à azote liquide

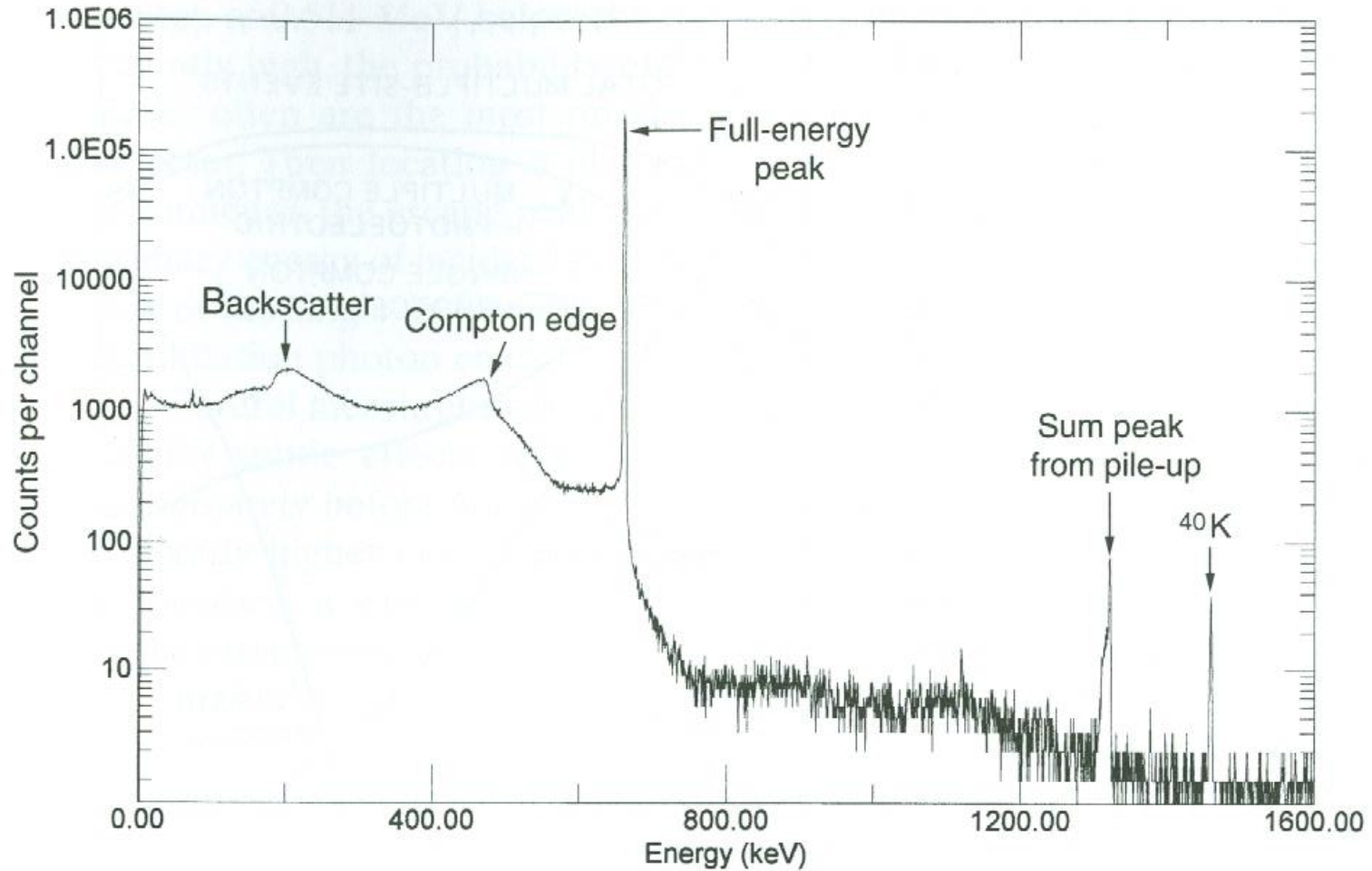


# Détecteur HPGe avec refroidissement par tube à gaz pulsé



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)

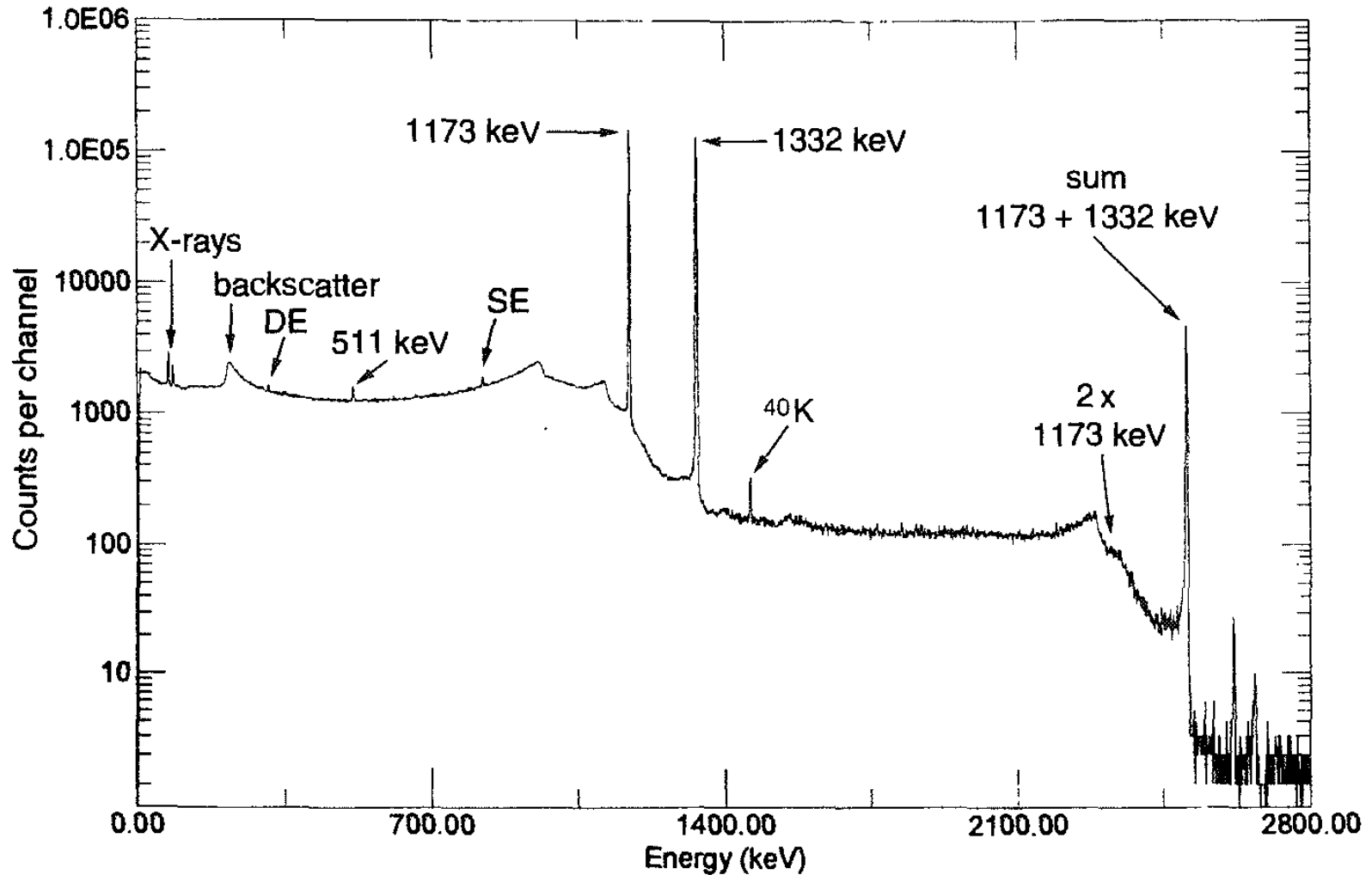
# Exemple de spectrométrie $\gamma$ avec un HPGe (1)



Spectre  $\gamma$  d'une source de  $^{137}\text{Cs}$



# Exemple de spectrométrie $\gamma$ avec un HPGe (2)



Spectre  $\gamma$  d'une source de  $^{60}\text{Co}$

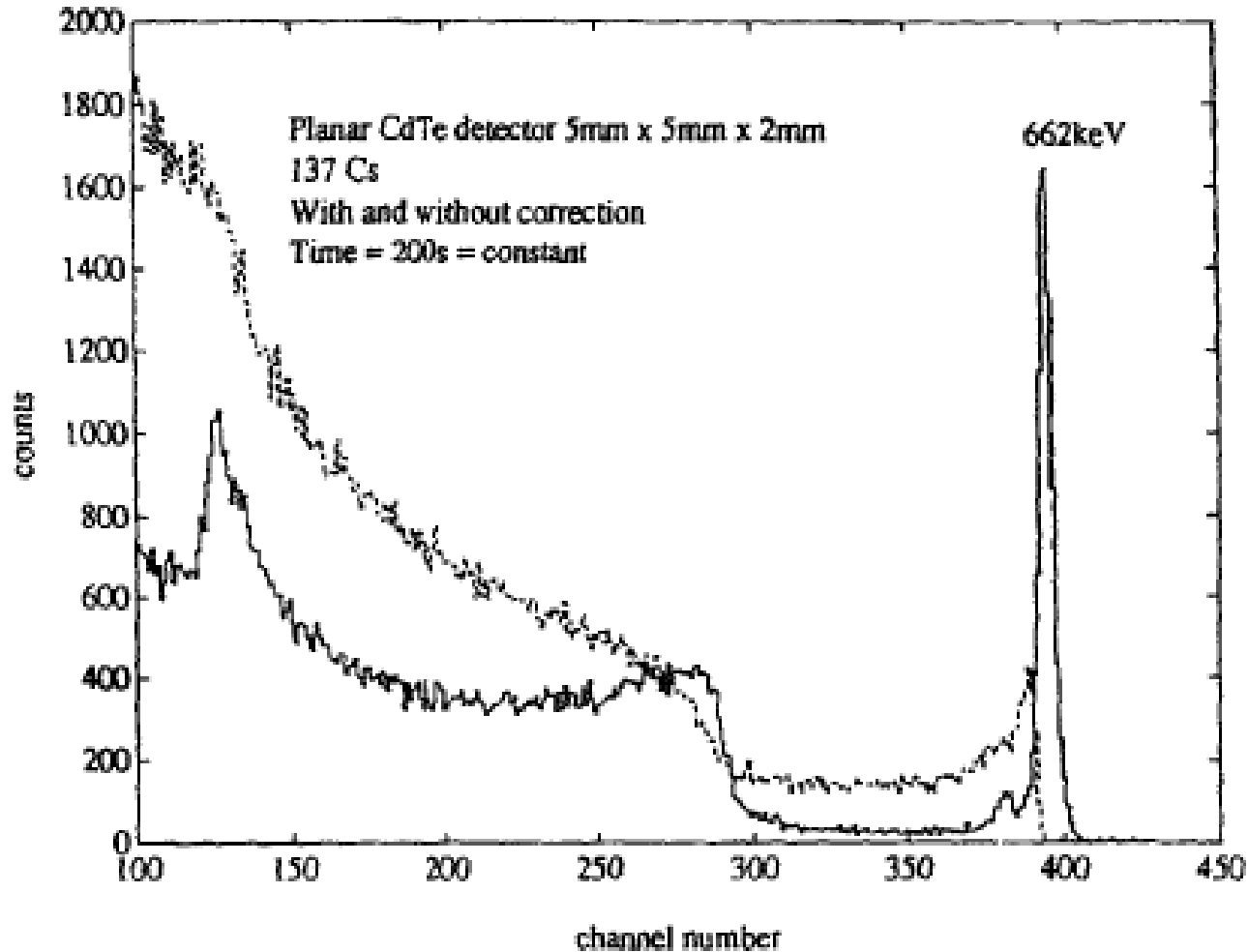
## Autres semiconducteurs utilisés comme détecteurs

- 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  $\gamma$
- CdTe, HgI<sub>2</sub>, 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  $\gamma$  de haute énergie est primordiale

## Exemple de spectrométrie $\gamma$ avec un CdTe



Spectre  $\gamma$  d'une source de  $^{137}\text{Cs}$

Possibilité de compenser électroniquement le piégeage des  $\text{h}^+$

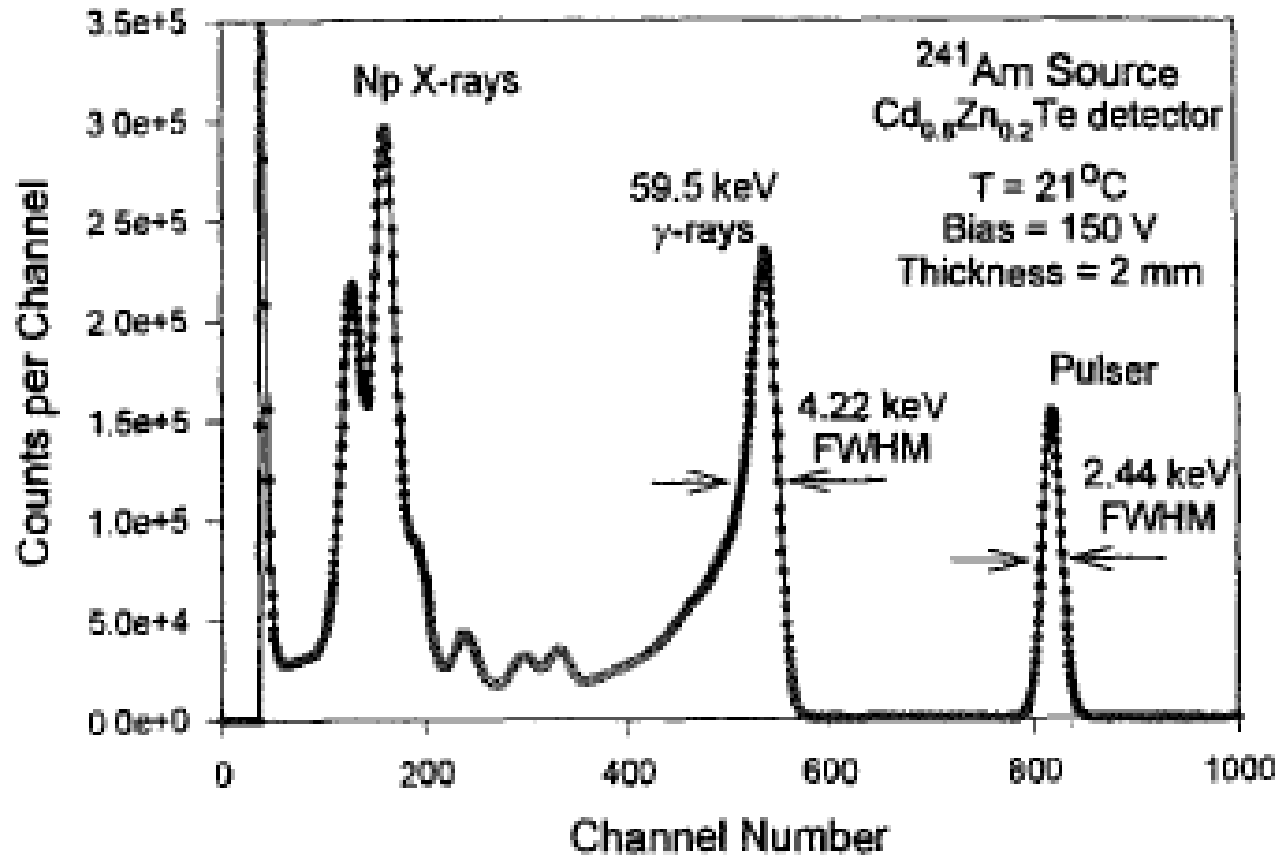
## Détecteurs à l'iodure mercurique ( $\text{HgI}_2$ )

- 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  $\text{HgI}_2$  (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

# Détecteurs CZT

- 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
- Pas d'effet de polarisation mais piégeage à cours terme des trous → pics asymétriques
- Difficultés pour obtenir un cristal sans défaut (tels que inclusions métalliques, frontière de grains,...) → reproductibilité compliquée
- Chers (même s'ils se démocratisent)

# Exemple de spectrométrie X avec un $\text{Cd}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Te}$



Spectre X et  $\gamma$  d'une source de  $^{241}\text{Am}$

# 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,  $\alpha$ ,...) et pour la détermination des trajectoires de particules chargées
- Détecteur au germanium (généralement HPGe) → utilisé principalement pour la détection et la spectrométrie de rayonnements  $\gamma$