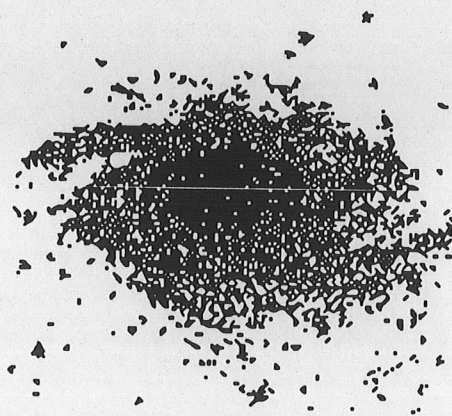


Ionisation à très basse température

M. Chapellier



M. CHAPPELLIER, SPEC/DRECAM/CEA et URA2, ORSAY

DETECTION DE RAYONNEMENT A TRES BASSES TEMPERATURES

Ionisation aux très basses températures

I Généralités sur la détection :

II Gaz

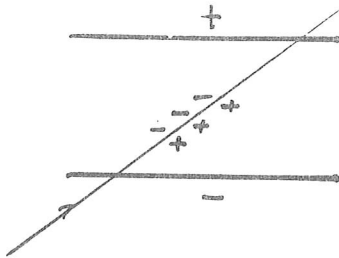
III Liquides

IV Solides

V Conclusion

I GENERALITES SUR LA DETECTION

Que détecte-t-on



On produit par ionisation dans un gaz, liquide ou solide des ions positifs, ions négatifs électrons, trous qui migrent dans le champ électrique appliqué.

Nombre de paires formées. On notera que l'énergie moyenne de formation d'une paire est toujours supérieure à l'énergie d'ionisation. Une partie du rayonnement excite l'atome ou la molécule sans l'ioniser. D'expérience, il n'y a pas de grosse différence entre les différents rayonnements ionisants.

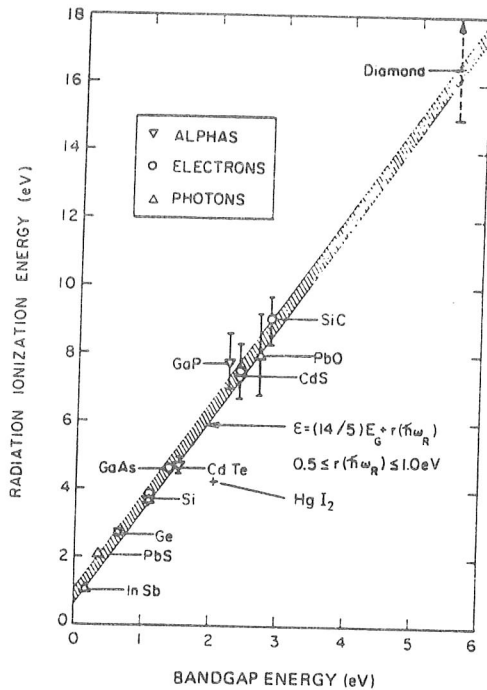


Figure 13-20 The average energy required to form one electron-hole pair (ϵ) versus bandgap energy for a number of semiconductor materials. (From Klein,³⁴)

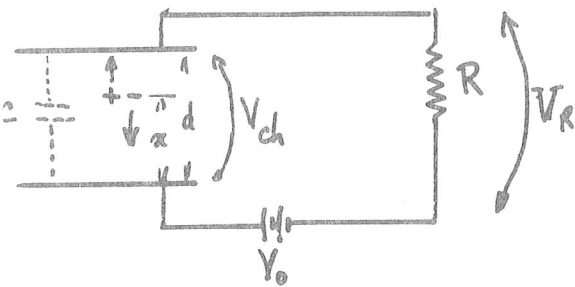
Fluctuations

La seconde caractéristique du nombre d'ions formés est la fluctuation de ce nombre. Si la création de paire était un processus de Poisson, la fluctuation devrait être $\propto \sqrt{N}$ N étant le nombre de paires d'ions formés. On observe qu'il n'en n'est rien et que l'on gagne un facteur sur la variance égale au facteur de Fano F de l'ordre de 0,1.

Pour une FWHM = $2,35 \sigma$ on aura $\sigma = \sqrt{FN}$

Electronique

La plus utilisée est l'amplificateur de charge. Lors du déplacement des charges + et - dans l'armature du "condensateur", un courant se développe. Si les 2 charges atteignent les électrodes, quelque soit l'endroit où elles sont produites, la charge recueillie est strictement égale à e. Dans ces conditions l'énergie \propto au nombre d'ions, sera mesurée par le système. On peut faire le calcul de la façon suivante:



$RC >$ temps de collection des charges

En l'absence de particules

$$E = \frac{1}{2} C V_0^2$$

$$\frac{1}{2} C V_0^2 = \frac{1}{2} C V_{ch}^2 + n_0 e E (v^+ t + v^- t)$$

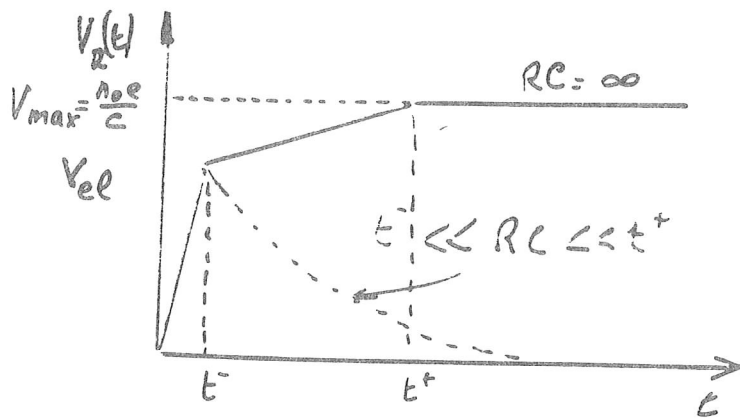
Cette équation traduit la conservation de l'énergie.

Énergie stockée initiale = énergie qui reste dans le condensateur + énergie absorbée par les charges + et - ayant parcouru les distances $v^+ t$ et $v^- t$

En développant, pour des petits signaux ($V_0 - V_{ch} \ll V_0$)

il vient

$$V_R = V_0 - V_{ch} \Rightarrow C V_0 V_R = n_0 e \frac{V_0}{d} (v^+ + v^-) t$$



La figure ci dessus donne la croissance du signal pour des vitesses différentes des ions + et -

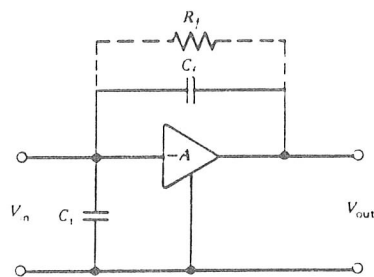
Remarques

Si les vitesses des electrons et ions positifs (ou trous) différent, on aura 2 temps de montée.

Si les trous (ou ions +) ont une mobilité très faible, on perdra leur signal. Le signal obtenu ne provient que du déplacement des electrons et dépend alors de la position a laquelle ils ont été créés

Il n'est pas nécessaire de collecter les charges pour recueillir un signal. Toutefois l'accumulation de charge aux bornes diminuera le champ appliqué (charge d'espace), et à terme annulera les signaux. Si on imagine qu'il existe du piégeage, d'autant plus important que la vitesse des charges est petite, alors la collection de charge diminuera avec le temps

Le signal maximum obtenu est $V_R = \frac{n_0 e}{C}$



Assume $A \gg (C_i + C_f)/C_f$

$$V_{out} = -A V_{in}$$

$$V_{out} = -A \frac{Q}{C_i + (A+1)C_f}$$

$$V_{out} \approx -\frac{Q}{C_f}$$

Dans la réalité, (fig ci dessus) on utilise un ampli de charge et non de tension. Le signal obtenu ne dépend plus de la capacité du détecteur mais de la capacité de contre réaction de l'amplificateur

Que souhaite-t-on

- Un grand nombre d'électron-trou pour sortir du bruit et pour réduire les fluctuations

- Dans certains cas (RX) un matériau de Z élevé pour arrêter les rayons X avec une faible épaisseur.

- Une grande mobilité pour les 2 types charges, un temps de recombinaison lent et absence de piégeage.

Ces conditions, en apparence fort simples, sont très difficiles à obtenir et n'existent ensemble que pour Si et Ge pour lesquels existent des détecteurs de tailles centimétriques ou au-delà (Ge ultrapure, GeLi et SiLi).

Ce problème est dû à l'extrême pureté requise, pureté n'existant que pour des systèmes à 1 atome composant. La purification de substances chimiques à deux composants laisse toujours des impuretés de l'une ou de l'autre composante qui agissent comme pièges pour les charges.

Remarquons que l'intérêt principal s'est plutôt porté vers les composés de Z élevé et/ou de grand gap pour pouvoir travailler à température ordinaire. CdTe, HgI₂, AsGa, diamant.

L'intérêt des semiconducteurs à petit gap est limité par la nécessité de travailler à basse température (He), handicap technique accepté seulement dans certains types très limités d'expériences.

On donnera plus de détails ultérieurement sur les détecteurs Ge et Si et leur utilisation à basse température.

GAZ ET LIQUIDES

Nous ne nous étendrons pas sur cet aspect de la détection qui a été très peu étudié pour les gaz (il existe une étude récente dans l'He₄ à 4.2, avec un remplissage à pression ordinaire à température ambiante). Un aspect intéressant des détecteurs à gaz est le compteur proportionnel ou une multiplication des charges est obtenue à cause du champ très élevé existant près de l'anode de collection des seuls électrons. Une idée semblable existe pour les solides et nous y reviendrons.

Pour les liquides la situation est plus riche à température modérée. nous donnons ci dessous les caractéristiques des principaux liquides froids. utilisé

TABLE 19-1 Properties of Some Condensed Media for Ionization Chambers

	Z	$\left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)$	Boiling Point	W (eV/ion pair)		F (Fano factor)	
				Calculated ^a	Experimental ^a	Model 1 ^b	Model 2 ^c
Liquid Ar	18	1.41	87 K	23.3	23.6	0.107	0.116
Liquid Kr	36	2.15	120 K	19.5		0.057	0.070
Liquid Xe	54	3.52	166 K	15.4	15.6	0.041	0.059
Solid Ar	18	1.62	Melting point 84 K				

^aFrom T. Doke et al.⁷^bBased on W. Shockley, *Czech. J. Phys.* **B11**, 81 (1961).^cBased on G. D. Alkhazov et al., *Nucl. Instrum. Meth.* **48**, 1 (1967).

A température encore plus basse, les He ont un comportement très particulier puisqu'ils forment avec les ions formés des cavités pour l'électron trappé ou des boules de neige (très froide!!) pour les ions positifs. Pour chacun de ces objets la masse effective est énorme et les mobilités très faibles ce qui rends leur détection difficile.

SOLIDES

Nous rappellerons qu'un solide peut être soit métallique, les électrons sont "libres", constituant un gaz d'électrons obéissant à la statistique de Fermi-Dirac. Un tel solide est conducteur, c'est le cas des métaux où un électron par atome est mis à la disposition de cristal tout entier. L'ensemble des électrons forme une bande d'énergie à moitié remplie.

Un semiconducteur (ou un isolant) est un solide où chaque électron est engagé dans une liaison chimique covalente ou polaire. Les propriétés électroniques d'un tel système est bien décrit par 2 bandes d'énergies séparées par un intervalle sans niveau d'énergie permise (gap). La force de cette liaison détermine le gap.

Au zéro absolu un tel solide est toujours isolant, la bande inférieure est pleine (bande de valence), la bande supérieure est vide (bande de conduction).

Quand la température devient comparable à l'énergie du gap une population thermiquement excitée d'électrons apparaît qui conduit à une conduction électrique croissante avec la température

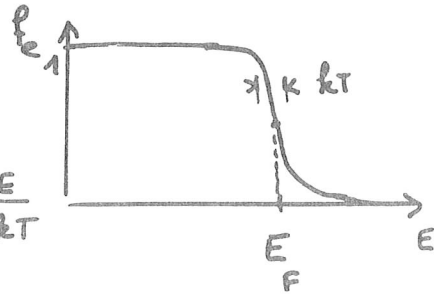
Corrélativement apparaissent des "trous" dans la bande de valence qui assurent aussi une conduction électrique. de signe opposé Ce sont, les porteurs de charges + et - créés par l'ionisation résultant de l'interaction d'une particule ou d'un photon de lumière sur le cristal.

Un cristal isolant est simplement un solide pour lequel la grandeur du gap interdit une conduction notable à température ordinaire. De ce point de vue le diamant ou le saphir sont des isolants, bien que devenant conducteur à température élevée. Avec le schéma simple défini ci-dessus, essayons de calculer le nombre d'e et de trous présents à température T pas trop basse.

On rappelle que le nombre d'occupation par un électron de l'état d'énergie E par un électron (probabilité à l'équilibre thermique de l'état d'énergie E) est donné par la statistique de Fermi-Dirac pour une bande

$$(1) \quad f_e = \frac{1}{1 + \exp \frac{E - E_F}{kT}}$$

Si $E - E_F \gg kT$ $f \approx \exp \frac{E_F}{kT} \exp - \frac{E}{kT}$

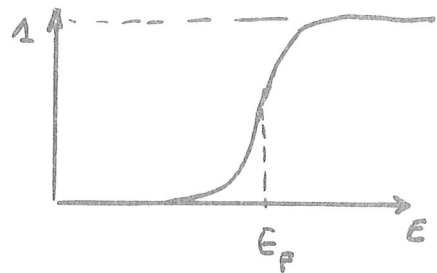


Si état localisé (1) est fausse (Voir cours de l'X)

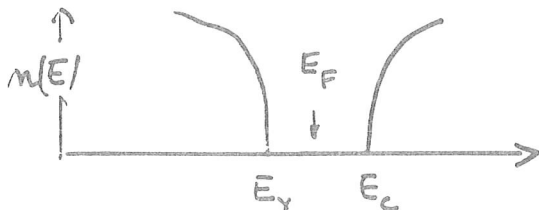
$$f' = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \exp \frac{E - E_F}{kT}}$$

Pour un trou la probabilité est le complément à 1 de la probabilité d'avoir un électron

$$f'_t = 1 - f_e$$



Semiconducteurs pur ou intrinsèque



bandes de valence et de conduction paraboliques
Soit n le nombre d'électrons dans la bande de conduction

$$n = \int_{Bc} n_c(E) f'_e(E) dE$$

$$n_c(E) = 4\pi (2m_e)^{3/2} \frac{1}{R^3} (E - E_c)^{1/2} \quad (\text{par unité de volume})$$

Comme $E_c - E_f \gg kT$ on peut prendre le développement de la fonction f

$$n = N_c \exp \frac{E_f - E_c}{kT}$$

Ne joue le rôle de la dégénérescence d'un état unique d'énergie E_c . On l'appelle densité équivalente de la bande de conduction.

D'où

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

On peut faire un calcul similaire pour les trous. On trouvera

$$p = N_v \exp \frac{E_v - E_f}{kT}$$

avec

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_h kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

m_e et m_h ne sont pas isotropes. On peut remplacer les m par des moyennes sur les bandes considérées. Pour Si, la bande de valence est dégénérée

$$N_c = 10^{25} / m^3 \quad \text{à } 300K$$

On aura

$$np = N_c N_v \exp - \frac{E_g}{kT} = n_i^2$$

° REMARQUE

Il y a beaucoup moins de porteurs que dans un métal. Le nombre de porteurs à température ordinaire est très faible.

Pour Si $n_i \approx 1,6 \cdot 10^{16} / m^3$ à 300K pour une concentration en atomes de

silicium de $\approx 10^{29} / m^3$

On conçoit aisément que toute impureté peu profonde, donc ionisée (shallow impurity) modifiera profondément les propriétés du cristal. On donne ci dessous le tableau des propriétés du Si et Ge comme détecteur ainsi que les niveaux d'énergie des impuretés

TABLE 11-1 Properties of Intrinsic Silicon and Germanium

	Si	Ge
Atomic number	14	32
Atomic weight	28.09	72.60
Stable isotope mass numbers	28-29-30	70-72-73-74-76
Density (300 K); g/cm ³	2.33	5.32
Atoms/cm ³	4.96 × 10 ²²	4.41 × 10 ²²
Dielectric constant	12	16
Forbidden energy gap (300 K); eV	1.115	0.665
Forbidden energy gap (0 K); eV	1.165	0.746
Intrinsic carrier density (300 K); cm ⁻³	1.5 × 10 ¹⁰	2.4 × 10 ¹³
Intrinsic resistivity (300 K); Ω · cm	2.3 × 10 ⁵	47
Electron mobility (300 K); cm ² /V · s	1350	3900
Hole mobility (300 K); cm ² /V · s	480	1900
Electron mobility (77 K); cm ² /V · s	2.1 × 10 ⁴	3.6 × 10 ⁴
Hole mobility (77 K); cm ² /V · s	1.1 × 10 ⁴	4.2 × 10 ⁴
Energy per electron-hole pair (300 K); eV	3.62	2.96
Energy per electron-hole pair (77 K); eV	3.76	2.96
Fano factor (77 K)	0.143 (Ref. 7) 0.084 (Ref. 8) 0.085 } (Ref. 12) to } (Ref. 12) 0.137 } 0.16 (Ref. 13)	0.129 (Ref. 9) 0.08 (Ref. 10) < 0.11 (Ref. 11) 0.057 } (Ref. 12) 0.064 } 0.058 (Ref. 14)

Source: G. Bertolini and A. Coche (eds.), *Semiconductor Detectors*, Elsevier-North Holland, Amsterdam, 1968, except where noted.

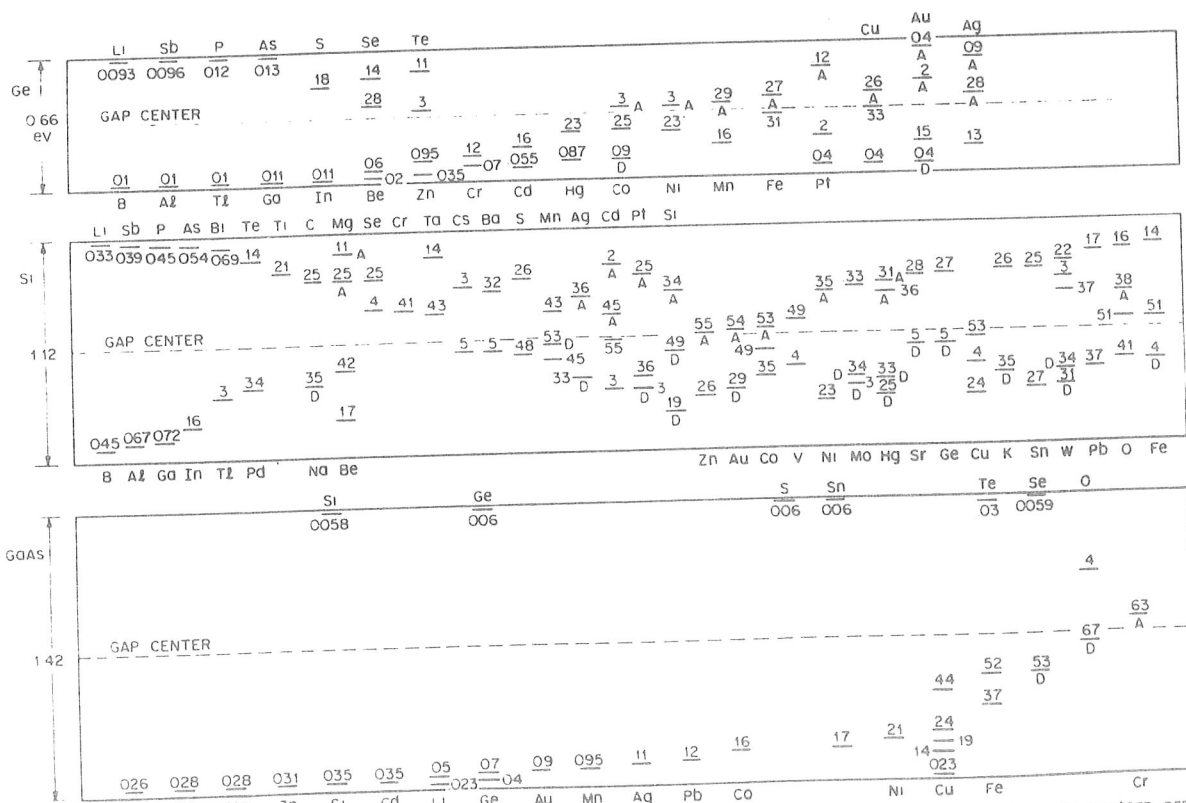


Fig. 13 Measured ionization energies for various impurities in Ge, Si, and GaAs. The levels below the gap centers are measured from the top of the valence band and are acceptor levels unless indicated by D for donor level. The levels above the gap centers are measured from the bottom of the conduction-band level and are donor levels unless indicated by A for acceptor level. The bandgaps at 300 K are 0.66, 1.12, and 1.42 eV for Ge, Si, and GaAs, respectively. (After Conwell, Ref. 27; Sze and Levin, Ref. 28; Milnes, Ref. 24.)

INTRODUCTION D'IMPURETES

Quand on introduit un atome voisin dans la table de Mendélev de l'atome de Si, par exemple le phosphore, l'atome P avec ses 5 électrons de valence a tendance à saturer les 4 liaisons offertes. L'électron supplémentaire est peu lié à P (il forme un atome hydrogénoïde, le phosphore étant le centre de charge +1) il peut se détacher si on lui fournit une énergie supérieure à 0,045eV (alors que le gap de Si est de l'ordre de 1,1eV) et se trouver ensuite dans la bande de conduction, c'est un atome donneur. Pour $kT \gg E_c - E_d$ tous les atomes de phosphore sont ionisés.

On a $n \approx N_D$

et comme $np = n_i^2$ $p = \frac{n_i^2}{N_D}$

$$\frac{n}{p} = \frac{N_D^2}{n_i^2} \approx 10^{12} \text{ à } 300K$$

Ce nombre est très grand. Les électrons sont appelés porteurs majoritaires et les trous porteurs minoritaires. La conductivité d'un tel cristal ne dépend dans une large zone de température que de sa concentration en impuretés. On dit avoir une conductivité extrinsèque de type n.

On aura la situation inverse si on dope le cristal avec des accepteurs. On voit sur la figure ci dessous l'évolution de la concentration en electron quand on abaisse la température.

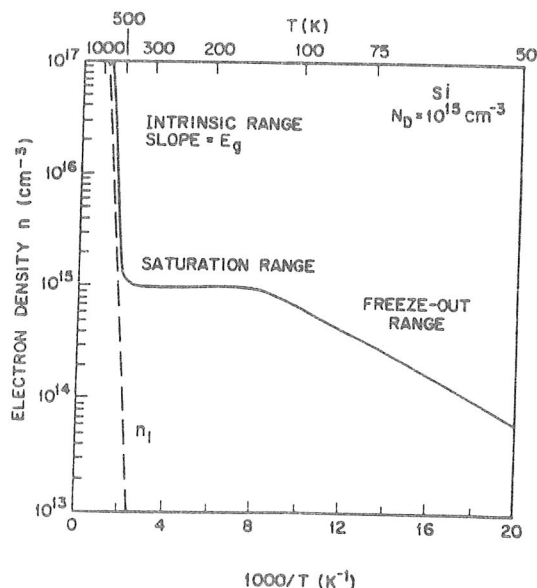


Fig. 16 Electron density as a function of temperature for a Si sample with donor impurity concentration of 10^{15} cm^{-3} . (After Smith, Ref. 5.)

On a maintenant les éléments de construction d'un détecteur

- à T ordinaire, toutes les résistivités (Ge, Si) sont trop petites, les signaux seront noyés dans le bruit. Ceci est encore exacte à la température de l'azote.
- à plus basse température on pourrait envisager d'utiliser Si ou Ge sans malice, mais il reste le problème de la mobilité et du piégeage

On va utiliser quelques astuces des semi-conducteurs

Un contact entre une zone dopée p et une zone n (diode) produit un abaissement localisé des porteurs majoritaires. Un tel système polarisé en inverse augmente la taille de la zone dépletiée

A 300K on peut réaliser des diodes Si d'épaisseur < 1 mm.

Le Ge est encore trop conducteur.

A 77K on pourra améliorer la situation avec des matériaux purs (ultrapurs), dopés avec du Li (qui neutralise les impuretés de type p)

La situation est restée dans cet état,

les Physiciens Nucleaire ou des Particules s'en satisfaisant.

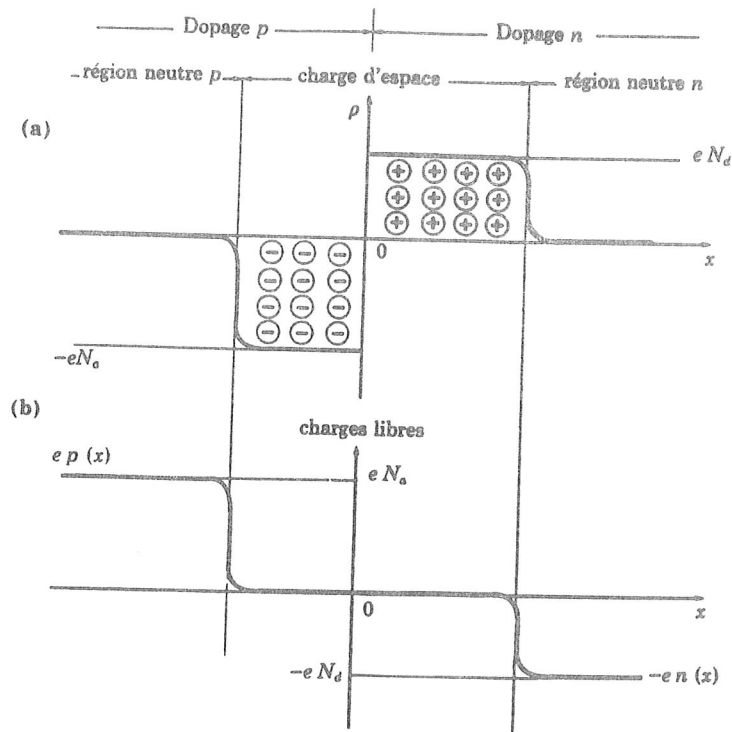
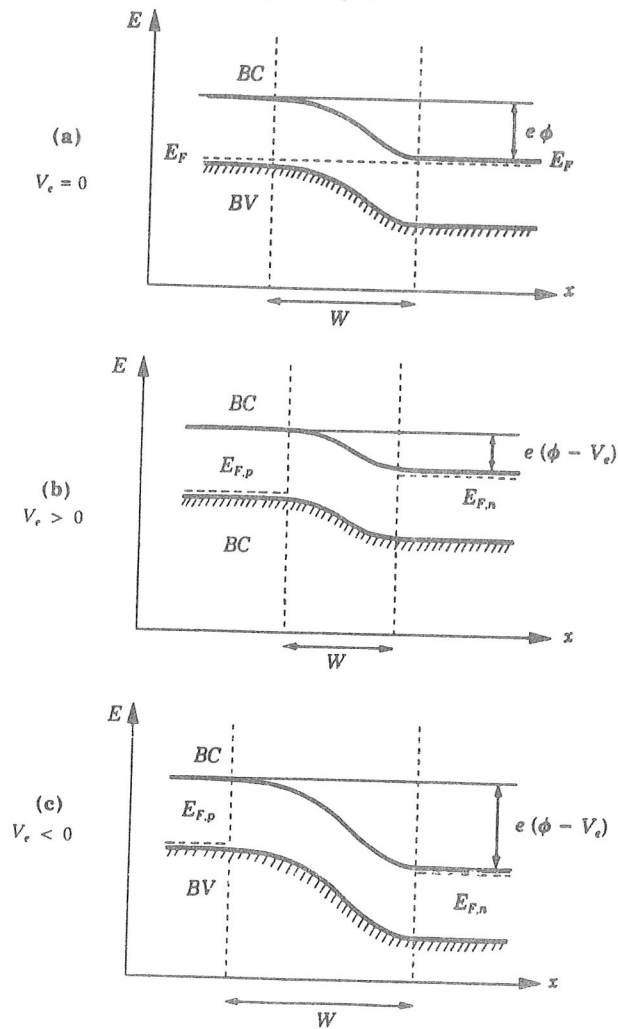


Figure 4 - Densité volumique a) de charge résultante $\rho(x)$ et b) de charges libres dans une jonction p-n.



Donnons maintenant description des quelques essais à plus basse température,

▶ Avec SiLi, pas de bon fonctionnement à $T < 50K$ piégeage des porteurs

On a vu à Saclay (Bassou) des signaux très anormaux à $4^{\circ}2$

▶ Avec Ge ultra pur

Groupe du CNRS Strasbourg

IEEE Trans Nucl. Sc. 19 n°1 (1972)

Le système fonctionne bien jusque vers 5K on observe une composante lente, attribuée à la partie résistive des électrodes implantées

On notera que le système ne fonctionne bien qu'avec des tensions élevées.

Le point nouveau à cette époque est une augmentation de la mobilité jusqu'au plus faible températures due à la pureté du matériau

Ce sont les seules mesures de mobilité à BT sur du Ge

On ne connaît pas le comportement ($\mu \uparrow ?$) en dessous de 7K

Si $\mu \uparrow$ on peut avoir un régime équivalent au vide ?

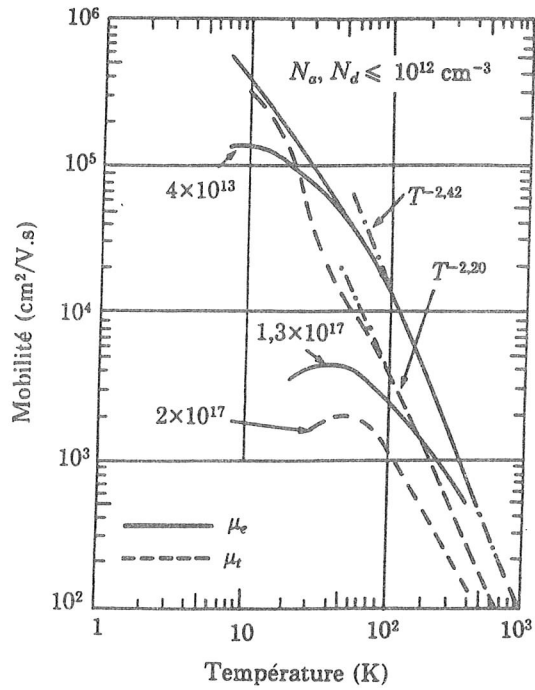


Figure 4 - Variation de la mobilité des électrons μ_e et des trous μ_t dans du silicium en fonction de la température pour des échantillons de différents dopages. La mobilité des électrons est représentée en traits continus, celle des trous en traits interrompus. Les courbes (— · —) sont le meilleur ajustement aux courbes expérimentales.

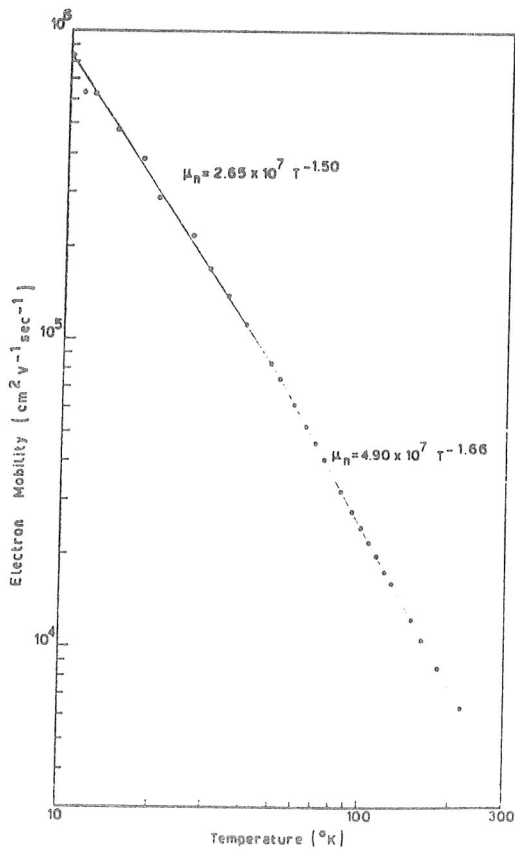


Fig. 7. Electron mobility versus temperature for a n-type sample.

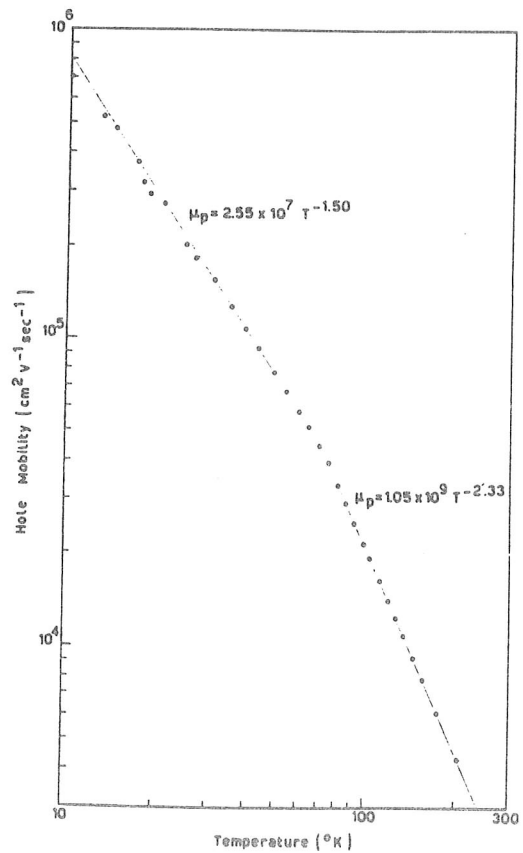


Fig. 8. Hole mobility versus temperature for a p-type sample.

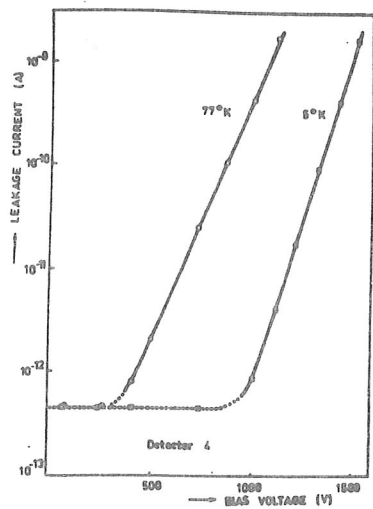


Fig. 2. Reverse current vs voltage characteristics of detector 4 at 77°K and 5°K. At low bias voltage the current at 77°K and 5°K has the same value due to measurement limitations.

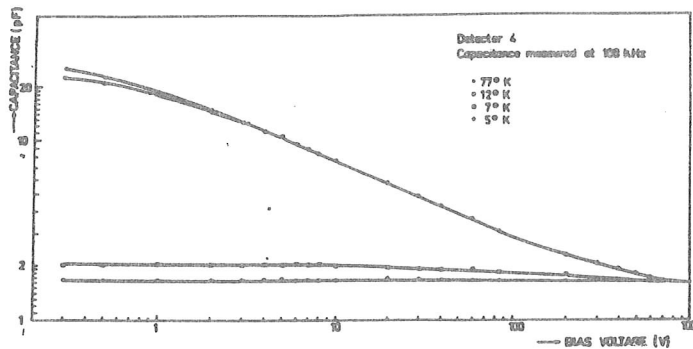


Fig. 3. Capacitance vs voltage characteristics measured at 100 kHz frequency at different temperatures.

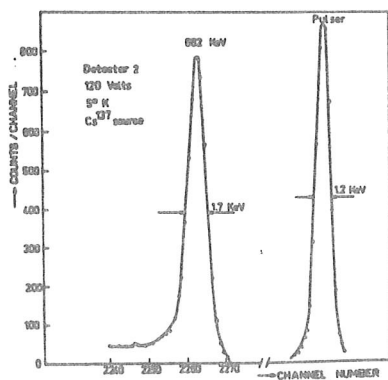


Fig. 5. Pulse height distributions for uniform irradiation with ^{137}Cs V-rays at 5°K observed with detector 2 at 120 volts.

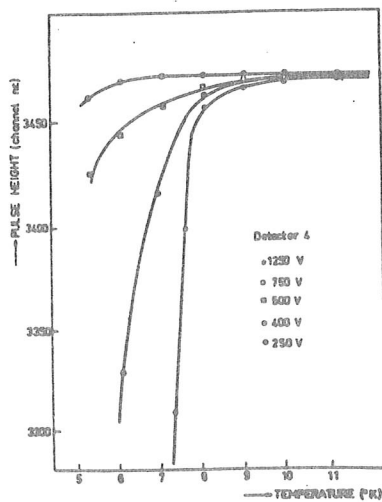


Fig. 6. Pulse height decrease observed as a function of temperature for different bias voltages with detector 4.

Commentaires des diodes Ge haute pureté fonctionnent bien de 77 K à 4,2 K

Sur la Fig 3 on voit que la zone déplétée est grande même à faible polarisation inverse.

Toutefois à faible polarisation on perd très vite du signal. Qu'en serait-il avec 1 volt ?

► Les diodes Si semblent fonctionner convenablement à 3,8 K (Baran)

L'essai est en cours à plus basse température.

► $T < 4,2 \text{ K}$

Les seuls essais sont ceux effectués à Berkeley (puis Saclay)

→ A Berkeley Ge type p ($\approx 10^{18} / \text{cm}^3$)
épaisseur 1 cm. $T = 25 \text{ mK}$

electrodes $p^+ p^+$

Les signaux sont obtenus avec une tension $< 1 \text{ volt}$ et montrent une collection de charge remarquable pendant un temps de l'ordre de 10 ns.

Il faut ensuite court-circuiter les électrodes pour recombiner les charges piégées.

→ A Saclay
diode Ge ($2 \cdot 10^{18} / \text{cm}^3$) type p.

electrodes $p^+ p n^+$

Le système fonctionne bien en diode.

On peut appliquer en inverse 10 à 20 volt (sans doute plus)

Pour une raison encore inexpliquée la charge d'espace se développe très rapidement

Pour 10 volt
1 volt

temps de comptage $\sim 5 \mu s$.
10 sec. !

17

On n'est pas sûr de la conservation de cristaux implantés, les gaz extérieurs ayant une diffusion bien supérieure dans les électrodes que dans la paroi pure.

Une autre "explication" est le piégeage par les centres A^0 et D^0 , qui existent en quantité ($\approx 10^{18}/cm^3$) dans le cristal.

Conclusion ... provisoire

- ▷ Les semi-conducteurs détectent à très basse température
- ▷ On ne comprend pas encore les origines des charges d'espaces
- ▷ On ne connaît pas encore leur fonctionnement sous haute tension
- ▷ Les semi-conducteurs ne sont pas de simples isolants
- ▷ Exotique : peut-on jouer avec les paires e-t sans les recombinaison tout de suite
peut-on amplifier un signal d'ionisation

Bibliographie

Détecteurs et détection en général (très complet)

- ▷ Radiation Detection and Measurement
Glenn F. Knoll (John Wiley)

Semi-conducteurs

- ▷ Physique des Semi-Conducteurs

Bernard Sapoval, Claudine Hermann

Cours de l'X (Ellipses)

- ▷ Sur les propriétés fines, non souvent décrites
 H^- -like impurity centers and molecular complexes
created by them in semi conductors.

E.M. Gershenzon et al

Sov Phys Usp 23 (10) Oct 1980.

+ Sze et Mathien Physique des Semi-conducteurs
et composants électronique, mais ^{rien.} peu sur les
détecteurs de particules.