



HAL
open science

Détecteurs de rayons X à semi-conducteurs. Evolutions récentes

J. Ponpon, P. Siffert

► **To cite this version:**

J. Ponpon, P. Siffert. Détecteurs de rayons X à semi-conducteurs. Evolutions récentes. Journal de Physique IV Proceedings, 1996, 06 (C4), pp.C4-703-C4-719. 10.1051/jp4:1996468 . jpa-00254351

HAL Id: jpa-00254351

<https://hal.science/jpa-00254351>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Détecteurs de rayons X à semi-conducteurs. Evolutions récentes

J.P. Ponpon et P. Siffert

Laboratoire PHASE, UPR 292 du CNRS, BP. 20, 67037 Strasbourg cedex, France

Résumé: Les progrès récents dans la détection des rayons X à l'aide de semi-conducteurs sont passés en revue. Le développement des matériaux à large bande interdite d'une part, l'utilisation des techniques micro-électroniques sur le silicium d'autre part, permettent d'envisager la spectrométrie des rayons X à température ambiante, avec des performances proches de celles obtenues à l'aide de détecteurs refroidis. Les possibilités offertes par de nouveaux dispositifs semi-conducteurs dans le domaine de l'imagerie X sont quant à elles en pleine évolution.

Abstract: Recent advances in the field of X-ray detection with semiconductor detectors are reviewed. The improvement of wide bandgap materials on one hand, the use of microelectronics technology on silicon on the other hand, allow one to perform X-ray spectrometry with performance equivalent to that supplied by cooled detectors. A growing interest for X-ray imaging results from the possibilities given by new semiconductor devices.

1. INTRODUCTION

La détection du rayonnement constitue une part essentielle dans l'utilisation des rayons X. Suivant les applications envisagées, différents moyens ont été mis en œuvre pour enregistrer les informations résultant de l'interaction de rayons X avec la matière: plaques photographiques, écrans luminescents, chambres à fils proportionnelles, scintillateurs associés à des photomultiplicateurs ou à des photodiodes, systèmes à tube TV fournissant une conversion X/visible, écrans à image latente restituée par luminescence photo stimulée, CCD associés à des scintillateurs ou à des écrans phosphorescents, par exemple. Les performances de ces systèmes couvrent une large gamme en résolution en énergie, sensibilité, résolution spatiale, rapidité, flux admissible, etc. Les détecteurs à semi-conducteurs présentent pour leur part divers avantages, liés à la possibilité d'obtenir, à partir d'un même dispositif, une bonne résolution en énergie, une réponse rapide et une forte efficacité dans une gamme d'énergie s'étendant de quelques centaines d'eV à une centaine de keV, avec une relative simplicité

d'utilisation. La détection localisée à haute résolution et l'enregistrement d'images en temps réel constituent les prochains objectifs de ce type de compteurs et certains dispositifs présentent déjà des résultats prometteurs.

Nous rappellerons tout d'abord dans cet article le principe de fonctionnement d'un détecteur de rayonnements à semi-conducteurs, en nous attachant à faire apparaître les possibilités et les limitations dans le domaine des rayons X, puis nous passerons en revue les différents types de dispositifs disponibles actuellement ou susceptibles d'être développés dans un avenir proche. Plusieurs matériaux semi-conducteurs sont utilisés pour fabriquer des détecteurs de rayons X. Le germanium ou le silicium (éventuellement compensés au lithium), employés de longue date, fournissent à l'heure actuelle les meilleurs résultats en spectrométrie (résolution en énergie proche de 100 eV à 6 keV), mais doivent être refroidis aux environs de 77K. Deux voies sont ouvertes pour réduire cette contrainte et permettre un fonctionnement à température ambiante tout en maintenant des performances équivalentes: l'utilisation pour le silicium des techniques issues de la micro-électronique d'une part, la mise en œuvre de matériaux à large bande interdite, tels que le tellure de cadmium CdTe ou l'iodure mercurique HgI₂, d'autre part. Un autre aspect du développement des détecteurs à semi-conducteurs concerne l'imagerie. Pour des raisons de simplicité, les détecteurs capables de fonctionner à température ambiante constituent une solution privilégiée. La segmentation de détecteurs de grande surface réalisés sur CdTe ou HgI₂ pour former des matrices de pixels dont la résolution spatiale est meilleure que 100 μm est en pleine évolution. Une approche différente consiste à mettre à profit les techniques développées en micro-électronique pour adapter à la détection des rayonnements X des dispositifs tels que les CCD (dispositifs à couplage de charge).

2. DETECTION DES RAYONNEMENTS PAR UN SEMI-CONDUCTEUR

2.1 Principe

L'interaction d'un rayonnement électromagnétique avec un semi-conducteur s'effectue par effet photoélectrique, effet Compton et création directe de paires. L'importance relative de ces effets dépend de l'énergie du rayonnement et du numéro atomique du matériau. L'absorption par interaction photoélectrique prédomine en dessous de quelques dizaines à quelques centaines de keV, selon les matériaux. Pour une énergie donnée, la part de l'absorption par

Tableau I: Epaisseur de matériau nécessaire pour absorber 90% d'un rayonnement
Absorption depth for stopping 90% of an incident radiation

E (keV)	Si	Ge	CdTe	HgI ₂
5	60 μm	25 μm	6 μm	6 μm
50	40 mm	1.5 mm	0.5 mm	0.5 mm
100	80 mm	10 mm	2.5 mm	1 mm
200	120 mm	40 mm	25 mm	10 mm

effet Compton est d'autant plus faible que le numéro atomique moyen de l'absorbeur est élevé. Elle ne devient comparable à l'absorption photoélectrique qu'aux environs de 50 keV pour le silicium et 500 keV pour l'iodure mercurique, par exemple. La création de paires ne se produit que pour des énergies supérieures à deux fois la masse de l'électron au repos, soit 1.022 MeV. A une profondeur x , le flux de photons $I(x)$ résultant de la pénétration d'un rayonnement de flux initial I_0 dans un solide possédant un coefficient d'atténuation linéaire α vaut:

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

Le Tableau I indique pour quelques semi-conducteurs l'épaisseur nécessaire pour absorber 90% d'un rayonnement incident d'énergie donnée. L'absorption de l'énergie E_0 d'un rayonnement dans un semi-conducteur se traduit par la création d'un nombre N_0 de paires électron-trou, qui dépend de l'énergie du rayonnement et du matériau:

$$N_0 = E_0 / w \quad (2)$$

L'énergie w nécessaire à la création d'une paire est liée à la largeur de la bande interdite E_g du semi-conducteur. Quelques valeurs pour les matériaux les plus couramment employés en détection sont indiquées dans le Tableau II. On voit que le nombre n_F de paires électron-trou créées par keV d'énergie absorbée décroît lorsque la largeur de la bande interdite augmente.

Tableau II: Propriétés de quelques semi-conducteurs utilisés en détection
Main properties of semiconductor materials used for detection

	Ge (77K)	Si (300K)	GaAs	CdTe	Cd _{1-x} Zn _x Te	Hgl ₂	Pbl ₂	a-Si	C
E_r (eV)	0.74	1.1	1.43	1.44	1.5-2.3	2.13	2.32	1.8	5.5
ϵ_r	16.2	11.8	13	10		7.4			5.6
w (eV)	2.97	3.62	4.27	4.42		4.15	4.9	3.4-4.4	13
n_F	337	276	234	226		241	204	227-294	77
F	0.07	0.1		0.04-1		0.04-0.1	0.19-0.34		
H_e (cm ² /Vs)	45000	1500	8500	1000	1120	100	8	1	2000
H_h (cm ² /Vs)	3800	400	400	80	200	4	2	<< 1	1600
τ_e	>> ms	> ms	1 μ s	1 μ s	0.01- 1 μ s	1-10 μ s	1 μ s	0.1-1 μ s	10 ns
τ_h	>> ms	> ms	0.1 μ s	2 μ s	10-100 ns	0.5-5 μ s	0.5 μ s		

Pour les matériaux usuels, il demeure cependant environ dix fois supérieur au nombre obtenu à l'aide d'un compteur à gaz. Les fluctuations statistiques du nombre de paires générées étant égales à $\sqrt{N_0}$, la valeur élevée de N_0 dans les semi-conducteurs permet de prévoir que la

limite de la résolution en énergie imposée par la statistique ($I/\sqrt{N_0}$) sera nettement meilleure que pour un compteur à gaz ou un scintillateur.

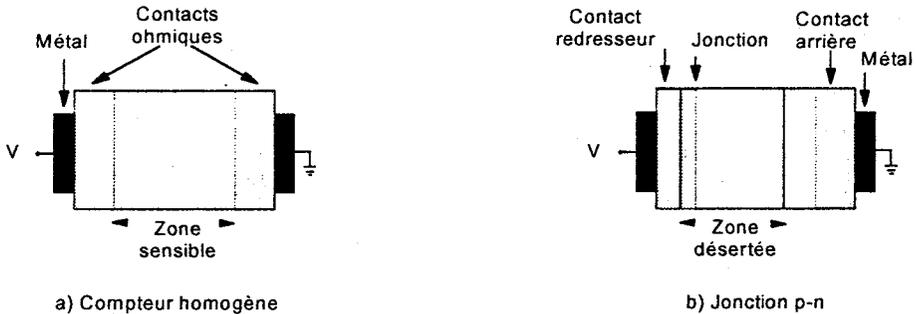


Figure 1: Structure d'un détecteur à semi-conducteur
Basic structure of a semiconductor detector

La collecte de la totalité des paires créées peut engendrer aux bornes du détecteur un signal électrique dont l'amplitude sera, en principe, proportionnelle à l'énergie déposée par le rayonnement incident. Pour être collectées convenablement, les paires électron-trou doivent être produites dans une région vide de porteurs libres et être entraînées par un champ électrique. Le détecteur doit par conséquent posséder la structure d'une chambre à ionisation solide. Deux types de compteurs permettent de satisfaire ces exigences (figure 1): les diodes polarisées en inverse (jonction p-n ou diode Schottky) pour les matériaux dont la résistivité est faible ou moyenne (Ge, Si, GaAs, CdTe) et les compteurs homogènes, pour les semi-conducteurs dont la résistivité est très élevée (CdTe, HgI₂, PbI₂, C). Les capacités C_h et C_j d'un compteur homogène et d'une diode non complètement désertée sont données par les relations:

$$C_h = \epsilon S / d \quad (3)$$

$$C_j = S \sqrt{\frac{\epsilon q |N_d - N_a|}{2(V + V_0)}} \quad (4)$$

dans lesquelles S représente la surface sensible, d l'épaisseur, V la tension de polarisation, V_0 la tension de diffusion, ϵ la constante diélectrique du matériau et $|N_d - N_a|$ la concentration nette d'impuretés dopantes.

Le déplacement, sous l'influence du champ électrique, d'un porteur de charge créé au point d'interaction x_0 induit sur l'électrode de collecte un courant $i(t)$ pendant le temps de migration t_{m} ou t_{rp} du porteur considéré (théorème de Ramo). Une impulsion de charge apparaît par conséquent sur les électrodes, la charge totale $Q(t)$ étant due à la contribution des trous et des

électrons. Une fois toutes les paires collectées, après une durée correspondant à la migration des porteurs les plus lents ou ayant la plus longue distance à parcourir, la charge finale recueillie Q est égale à qN_0 . La Figure 2 illustre le principe de la collecte des charges dans un détecteur à semi-conducteur. L'impulsion de charge peut alors être transformée en impulsion

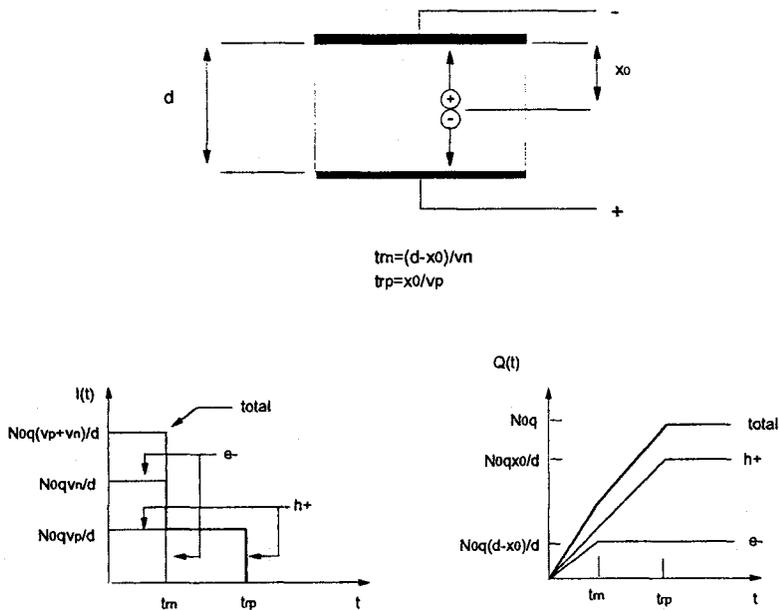


Figure 2: Principe de la formation de l'impulsion de courant $I(t)$ et de charge $Q(t)$ dans un détecteur
Principle of the formation of the current $I(t)$ and charge $Q(t)$ pulses in a detector

de tension, par l'intermédiaire d'une capacité. Après amplification et mise en forme, cette impulsion, elle même proportionnelle à l'énergie, est enregistrée par un analyseur multicanaux. Un schéma simplifié du circuit équivalent du détecteur (générateur de courant en parallèle avec la capacité de la zone sensible) et du premier étage amplificateur avec sa capacité de contre réaction, est représenté sur la Figure 3.

En pratique, la plupart des matériaux présentent des défauts (défauts cristallins, impuretés) susceptibles d'introduire dans la bande interdite des niveaux d'énergie, qui peuvent se comporter comme des pièges ou des centres de recombinaison. Les porteurs générés par un rayonnement ont alors une probabilité non négligeable de se recombiner ou d'être capturés pendant une durée plus ou moins longue. Une perte de charge et l'apparition de composantes lentes dans les impulsions, si certains porteurs sont relâchés dans un laps de temps inférieur à

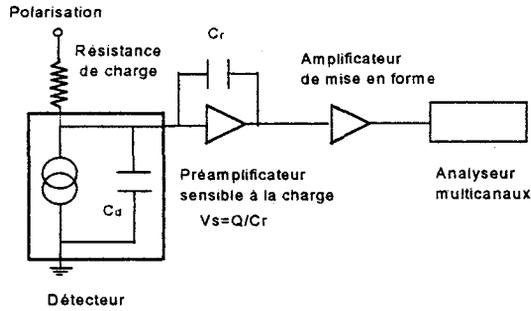


Figure 3: Schéma de principe d'un détecteur et de son préamplificateur
Schematic diagram of a detector and associated preamplifier

la constante de temps de l'amplificateur, en résultent. Ces effets se traduisent par une diminution de l'amplitude des impulsions, l'apparition de traînées à basse énergie dans les spectres de rayonnements et une dégradation de la résolution en énergie.

La collecte par un champ électrique ξ des paires électron-trou générées à la profondeur x est caractérisée par l'efficacité de collecte $\eta(x)$ (rapport du nombre de paires collectées au nombre de paires créées), qui fait apparaître les contributions respectives des électrons et des trous:

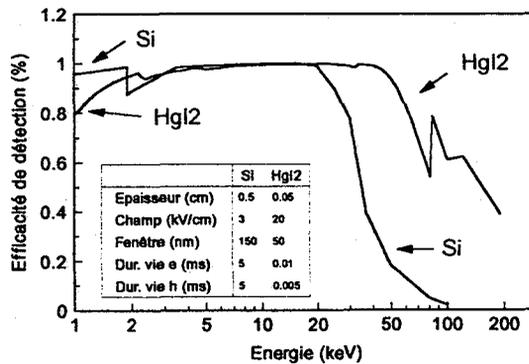


Figure 4: Comparaison de l'efficacité de détection de détecteurs Si et HgI₂ à basse énergie
Comparison of the detection efficiency of Si and HgI₂ detectors

$$\eta(x) = \frac{\mu_e \tau_e \xi}{d} \left(1 - e^{-\frac{d-x}{\mu_e \tau_e \xi}} \right) + \frac{\mu_h \tau_h \xi}{d} \left(1 - e^{-\frac{x}{\mu_h \tau_h \xi}} \right) \quad (5)$$

Elle est directement liée aux propriétés du matériau, mobilité μ et durée de vie avant piégeage τ , dont les valeurs généralement admises sont reportées dans le Tableau II. On peut remarquer que le produit $\lambda = \mu \tau \xi$, caractéristique de chaque type de porteurs, représente la distance moyenne parcourue avant piégeage. La convolution de la loi d'absorption (éq. 1) et de l'efficacité de collecte (éq. 5) permet de calculer l'efficacité de détection d'un compteur pour une épaisseur et une énergie données. Un exemple des résultats obtenus, prenant de plus en compte la présence d'une zone morte à la surface, est proposé sur la figure 4 pour deux détecteurs à base respectivement de silicium et d'iodure mercurique.

L'élargissement R d'une raie monoénergétique enregistrée par un détecteur à semi-conducteur peut être représenté par la somme quadratique de trois termes principaux, correspondant respectivement au bruit électronique R_e , aux fluctuations statistiques du nombre de paires créées R_s et à la contribution des phénomènes de piégeage R_t :

$$R^2 = R_e^2 + R_s^2 + R_t^2 \quad (6)$$

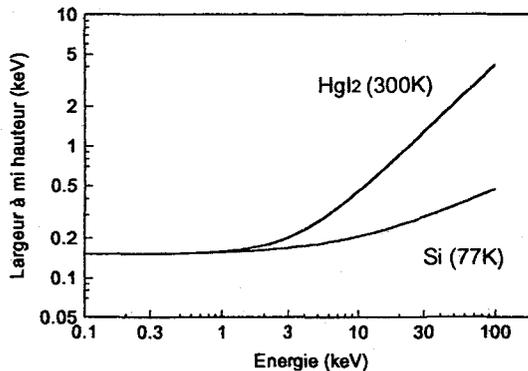


Figure 5: Evolution de la largeur de raie à mi hauteur pour Si (77K) et HgI₂ (300K) en fonction de l'énergie
Evolution of FWHM in Si (77K) and HgI₂ (300K) detectors vs energy

Le bruit électronique est essentiellement lié au courant d'obscurité du détecteur, à la capacité d'entrée du préamplificateur, aux capacités parasites et au bruit propre du premier étage d'amplification (en général un FET). L'utilisation d'une contre réaction optoélectronique et le refroidissement du FET (jusqu'à 77K) permettent à l'heure actuelle de réduire cette

contribution à 100-150 eV pour des détecteurs dont la capacité est de l'ordre du pF. La contribution des fluctuations statistiques pour une énergie E est donnée par la relation:

$$R_y = 2.36\sqrt{FwE} \quad (7)$$

dans laquelle F représente le facteur de Fano (Tableau II). La contribution du piégeage à l'élargissement des raies peut être calculée en tenant compte de l'énergie, du champ électrique et des paramètres du matériau; en première approximation, elle augmente linéairement avec l'énergie, mais demeure négligeable tant que λ est au moins équivalent à la distance que doivent parcourir les porteurs avant d'atteindre leur électrode de collecte. La résolution est alors essentiellement déterminée par le bruit électronique et les fluctuations statistiques. C'est ce que montre la figure 5 pour le silicium à 77K et l'iodure mercurique à 300K: à basse énergie, la résolution est dans les deux cas déterminée par le bruit électronique et des résultats très proches peuvent être attendus pour les deux matériaux. Lorsque l'énergie augmente, la dégradation beaucoup plus rapide observée pour HgI_2 provient de l'augmentation de la contribution due au piégeage.

2.2 Particularités liées à la détection des rayons X

Dans gamme d'énergie des rayons X pouvant être détectés par un semi-conducteur, de quelques centaines d'eV à quelques dizaines, voire quelques centaines, de keV, le coefficient d'atténuation linéaire atteint des valeurs très élevées (jusqu'à 10^5 cm^{-1} à 1 keV pour HgI_2) et l'absorption s'effectue par conséquent sur une très faible épaisseur. Il en résulte diverses conséquences sur le fonctionnement des détecteurs et leur utilisation. En premier lieu, les effets de surface, qui conduisent à des pertes d'énergie en introduisant une zone morte que traversent les photons avant d'atteindre la zone sensible, doivent être pris en compte. La construction du détecteur contribue à cette fenêtre d'entrée par l'intermédiaire de l'épaisseur des contacts et par la qualité de la couche interfaciale. La diffusion d'électrons chauds du plasma vers la surface constitue par ailleurs une source intrinsèque de pertes, liée au matériau et au champ électrique qui règne près de sa surface [1]. La contribution de cet effet à la fenêtre d'entrée est supérieure à 65 nm pour un détecteur en germanium à 77K, alors qu'elle peut ne pas dépasser 3 nm pour le silicium refroidi. Elle est même inférieure, à température ambiante, pour un matériau tel que l'iodure mercurique, ce qui compense en partie sa plus forte absorption. En pratique, compte tenu de la présence des jonctions éventuelles et des contacts métalliques, l'épaisseur de la fenêtre d'entrée équivaut à quelques dizaines ou quelques centaines de nanomètres du semi-conducteur.

Une seconde particularité de l'utilisation des semi-conducteurs pour la détection de rayonnements électromagnétiques de faible énergie est liée à la création des paires électron-trou sur une faible profondeur: un seul type de porteurs de charges contribue dans ce cas de manière effective à l'impulsion de courant. Cette caractéristique présente un intérêt évident pour les matériaux dans lesquels les propriétés de transport des deux types de porteurs sont notablement différentes. Un choix convenable de la polarisation de la face d'entrée permet alors de définir la configuration la plus favorable. Les bons résultats enregistrés à l'aide de

détecteurs à base de HgI_2 ou CdTe , dans lesquels la collecte des trous est mauvaise, sont en grande partie dus à ce comportement. La figure 4 montre que des résultats tout à fait comparables à ceux du silicium peuvent en principe être obtenus avec l'iodure mercurique, par exemple, malgré les très faibles durées de vie avant piégeage présentées par ce matériau.

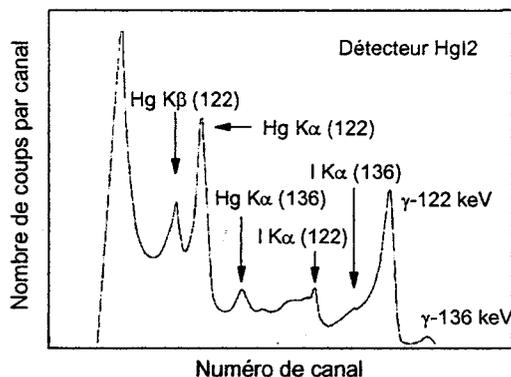


Figure 6: Spectre γ de ^{57}Co obtenu à l'aide d'un détecteur HgI_2 très mince
 ^{57}Co γ -ray spectrum as obtained with a very thin HgI_2 detector

Une spécificité supplémentaire réside dans la complication que peuvent présenter les spectres du fait de l'importance prise par les pics d'échappement. En effet, lorsque l'énergie des photons incidents est suffisamment élevée pour exciter la fluorescence des atomes constituant le détecteur, des rayons X caractéristiques sont émis. S'ils s'échappent sans être absorbés, l'énergie déposée dans le détecteur correspond à l'énergie du photon incident diminuée de l'énergie du rayon X. Une raie supplémentaire apparaît alors dans le spectre d'énergie. L'importance de ce phénomène est d'autant plus appréciable que les rendements de fluorescence sont élevés et que l'épaisseur des détecteurs est faible. La figure 6 illustre cet effet pour le spectre d'une source γ de ^{57}Co (122 et 136 keV) obtenu à l'aide d'un détecteur HgI_2 de 80 μm ; les pics d'échappement de l'iode et du mercure relatifs à chaque énergie incidente apparaissent distinctement.

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

3. 1 Détecteurs refroidis (Si, Ge)

Les détecteurs refroidis à la température de l'azote liquide, Ge et surtout Si(Li), sont depuis longtemps utilisés en spectrométrie de rayons X. Ils présentent toujours les meilleures

performances, tant en résolution qu'en surface sensible. Les détecteurs silicium sont compensés au lithium de manière à former une structure p-i-n, alors que le germanium ultra pur a progressivement remplacé les détecteurs Ge(Li). La qualité extrême de ces matériaux rend les phénomènes de piégeage négligeables, de sorte que leurs possibilités sont essentiellement déterminées par la qualité de l'électronique associée. Des largeurs de raie à mi hauteur allant de 150 à 300 eV sont ainsi couramment obtenues à 5.9 keV pour des détecteurs de quelques millimètres d'épaisseur dont la surface sensible atteint 300 mm² [2]. L'inconvénient majeur réside dans la nécessité d'utiliser un cryostat, généralement muni d'une fenêtre en béryllium de quelques dizaines à une centaine de micromètres d'épaisseur. La limite inférieure des énergies détectables se situe en dessous de 200 eV. En raison des précautions prises pour la réalisation des contacts afin de réduire l'importance de la fenêtre d'entrée et les effets de surface, les détecteurs à base de germanium ultra pur ont atteint ces dernières années des performances équivalentes, voire supérieures en résolution, à celles des détecteurs Si(Li) dans une gamme d'énergie s'étendant de 200 eV (raie K α de B) à 100 keV, avec l'avantage sur les détecteurs au silicium d'une plus forte efficacité photoélectrique aux énergies les plus élevées [3]. En effet, au-delà de 50 keV, l'absorption Compton dans Si devient prépondérante. La présence d'un fond Compton, dû à un rayonnement d'énergie supérieure à cette limite, peut alors masquer des raies correspondant à des énergies inférieures.

Il est intéressant de noter qu'au prix d'une dégradation modérée, les détecteurs Si(Li) peuvent être employés à plus haute température. Les systèmes commerciaux les plus récents, dans lesquels les détecteurs ne sont refroidis qu'aux environs de -35C par l'intermédiaire d'éléments Peltier, présentent des largeurs de raie à mi hauteur de 250 eV à 6 keV, pour une surface sensible d'environ 10 mm².

3. 2 Détecteurs à température ambiante

Les détecteurs fonctionnant à température ambiante sont naturellement fabriqués à partir des semi-conducteurs possédant une bande interdite suffisamment large pour que le courant d'obscurité demeure très faible et ne contribue pas de manière appréciable au bruit électronique. La principale limite au développement de tels détecteurs est en grande partie liée à la difficulté de préparer des cristaux de haute qualité et de grande taille. Malgré les efforts poursuivis depuis de nombreuses années sur la croissance (CdTe et HgI₂, en particulier), les défauts cristallins et les impuretés résiduelles confèrent à ces matériaux des propriétés qui sont loin d'atteindre celles de Si ou de Ge. La collecte des paires engendrées par un rayonnement est par conséquent plus difficile et les phénomènes de piégeage détériorent notablement les performances lorsque l'énergie des rayonnements incidents dépasse une centaine de keV. Malgré tout, comme nous l'avons déjà indiqué plus haut, d'excellents résultats peuvent être obtenus dans le cas particulier de la détection de rayonnements de faible énergie. La forte absorption photoélectrique permettant de diminuer l'épaisseur des détecteurs d'une part, le champ électrique élevé que supportent généralement ces matériaux d'autre part, compensent en grande partie la faible durée de vie des électrons et surtout des trous, de sorte que des résultats comparables à ceux de Si et Ge sont atteints à des températures d'utilisation comprises entre -30 et 30 C. Dans le meilleur des cas, la qualité de

ces détecteurs est telle que la résolution est, comme pour Si et Ge, essentiellement déterminée par le bruit électronique et non pas par les caractéristiques du semi-conducteur proprement dit. Pour l'iodure mercurique, les meilleurs résultats publiés font état de largeurs de raie à mi hauteur d'environ 200 eV entre 0.7 et 8 keV. En refroidissant le FET à 77K, ces valeurs sont

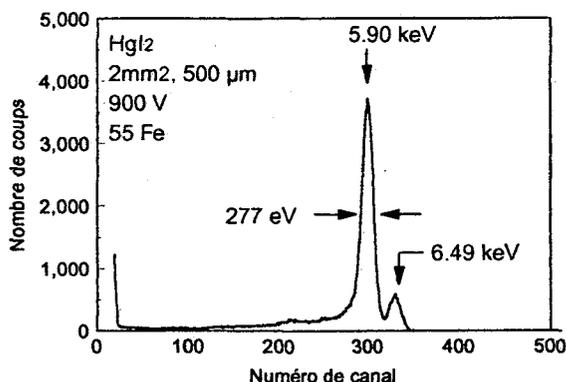


Figure 7: Spectre de ^{55}Fe enregistré à 0C à l'aide d'un détecteur HgI_2
Spectrum of ^{55}Fe as obtained at 0C with a HgI_2 detector

encore améliorées (175 eV à 5.9 keV) et atteignent celles des détecteurs Si [4]. La figure 7 fournit un exemple des résultats obtenus au Laboratoire à l'aide d'un détecteur HgI_2 de 2mm^2 , refroidi à 0C et associé à un préamplificateur maintenu à 25C. La limite de sensibilité se situe aux environs de 400 eV. L'efficacité de CdTe à très basse énergie est comparable à celle de HgI_2 , toutefois la largeur plus faible de sa bande interdite conduit à un courant d'obscurité nettement plus élevé, de sorte que la gamme d'énergie exploitable ne s'étend pas en dessous d'une dizaine de keV [5]. Le refroidissement aux environs de -30C ou -40C, en diminuant le courant, améliore notablement ces performances, la largeur de raie à mi hauteur ne dépassant alors pas 800 eV à 6 keV. Un exemple des résultats enregistrés au laboratoire pour une source de ^{241}Am à l'aide d'un détecteur CdTe refroidi à -35C est reporté sur la figure 8. A température ambiante, pour les énergies supérieures à une centaine de keV, les résultats sont meilleurs que ceux enregistrés à l'aide de détecteurs HgI_2 . L'introduction de zinc, conduisant à la formation du composé $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$, dont la largeur de bande interdite est plus élevée que celle de CdTe, laisse entrevoir des améliorations grâce à une diminution du courant d'obscurité. Des valeurs très proches de celles fournies par le tellurure de cadmium ont d'ores et déjà été obtenues aux énergies moyennes [6], et les résultats à basse énergie sont nettement meilleurs (largeur à mi hauteur de 240 eV à 6 keV [7]). Cependant, un refroidissement aux environs de -40C demeure indispensable. D'autres matériaux, tels que PbI_2 , dont le

développement n'est cependant pas aussi avancé, offrent également des perspectives encourageantes [8]. En revanche, les possibilités de l'arséniure de gallium massif semi isolant demeurent fortement handicapées par la présence de nombreux centres de piégeage, qui perturbent le champ électrique et entravent la collecte des porteurs. Seules les couches épitaxiées, malheureusement de trop faible épaisseur (100-200 μm), montrent des résultats de bonne qualité.

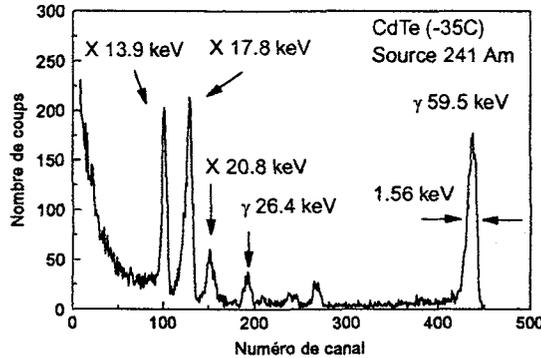


Figure 8: Spectre de ^{241}Am obtenu à l'aide d'un détecteur CdTe refroidi
 ^{241}Am spectrum as recorded with a cooled CdTe detector

Lorsque la spectrométrie ne constitue pas le but recherché, la plupart de ces matériaux sont bien adaptés à une utilisation en mode courant pour le comptage de flux de rayonnements élevés ($>10^5/\text{s}$). Une haute efficacité pour un faible volume sensible, une variation linéaire du courant avec le flux à basse tension de polarisation et une discrimination de l'énergie, constituent les principaux avantages de ce mode de fonctionnement [9].

On peut également noter que la radio résistance des détecteurs à base de CdTe et surtout de HgI_2 , est très élevée, puisque ces derniers peuvent supporter des doses de neutrons rapides ou de protons de haute énergie au moins 1000 fois supérieures à celles acceptables avec des détecteurs Ge ou Si. Une dégradation n'apparaît en effet qu'au delà de $10^{12}/\text{cm}^2$ protons de 10 MeV, $10^8/\text{cm}^2$ protons de 1.5 GeV et $10^{15}/\text{cm}^2$ neutrons rapides.

La mise en œuvre des techniques issues de la micro-électronique a conduit ces dernières années à la préparation de dispositifs à base de silicium présentant à température ambiante des courants d'obscurité très faibles, grâce, en particulier, à un meilleur contrôle des étapes de fabrication, et à une excellente passivation de la surface par des oxydes de haute qualité. Elle a par ailleurs permis la construction de dispositifs nouveaux, présentant pour certains des capacités très faibles (de l'ordre de 0.1 pF) malgré une surface sensible importante. De nouvelles perspectives s'ouvrent ainsi pour des détecteurs en silicium non compensé par le lithium, fonctionnant à température ambiante ou proche de l'ambiante (-35C) avec une haute

résolution. L'assemblage de matrices constituées par vingt détecteurs plans individuels de petite surface (mm^2), a par exemple produit une largeur de raie à mi hauteur de 380 eV pour 6 keV à 25C [10]. Une largeur de raie à mi hauteur de 260 eV à 20C a d'autre part été enregistrée à l'aide d'un détecteur plus complexe, fonctionnant selon le principe de la chambre à dérive solide (figure 9), constitué de pistes concentriques de 100 μm éloignées de 20 μm [11]. Dans ce détecteur, deux séries de pistes parallèles déposées sur les faces opposées constituent des jonctions $\text{p}^+\text{-n}$. La désertion totale du volume est obtenue par l'intermédiaire

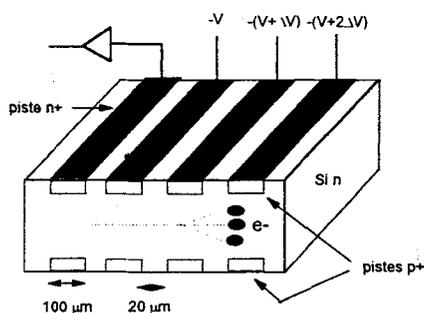


Figure 9: Schéma de principe d'une chambre à dérive en silicium
Cross section of a silicon drift chamber (SDC)

d'une seule électrode n^+ , ce qui permet d'atteindre une très faible capacité. Une tension négative progressive est appliquée sur les pistes p^+ . Lors d'une irradiation, les trous sont rapidement collectés par ces électrodes, alors que les électrons sont entraînés par le champ électrique vers l'électrode n^+ , reliée à un préamplificateur. Une approche un peu différente, destinée à diminuer les sources de bruit, consiste à intégrer, sur le substrat même faisant office de détecteur, le premier étage d'amplification (MOSFET ou JFET); d'excellents résultats (largeur de raie inférieure à 300 eV à 5.9 keV) ont déjà été obtenus pour des détecteurs élémentaires dont la surface n'excède pas 0.1mm^2 [12].

Tableau III: Résumé des performances actuelles des détecteurs à semi-conducteurs pour les rayons X.
Summary of the present performance of semiconductor detectors for X-ray.

	Ge 77K	Si 77K	Si 300K	Cd(Zn)Te 260K	CdTe 300K	HgI ₂ (300K) FET 77K	HgI ₂ (300K) FET 300K	PbI ₂ 300K
E_{min}	200 eV	100 eV		<1 keV	10 keV	<500 eV	500 eV	
5.9 keV	115 eV	130 eV	260 eV	240 eV		175 eV	360 eV	<500 eV
122 keV	0.5 keV		<2 keV	<2 keV	<4 keV		2 keV	

Nous avons, pour résumer, indiqué dans le Tableau III l'ordre de grandeur des meilleurs résultats de spectrométrie que peuvent fournir les principaux détecteurs à semi-conducteurs pour les raies X de 5.9 keV et γ 122 keV, ainsi que l'énergie minimum détectable.

3.3 Détecteurs à semi-conducteurs et imagerie des rayons X

L'imagerie des rayons X par absorption directe dans un semi-conducteur présente, par rapport aux systèmes plus conventionnels faisant appel aux plaques photographiques, aux scintillateurs associés à des photomultiplicateurs ou éventuellement à des photodiodes, aux chambres à ionisation à gaz, ou encore aux amplificateurs d'images, de nombreux avantages: forte efficacité, bonne résolution en énergie, bonne résolution spatiale, rapidité. La nécessité de refroidir un tel système constituant un handicap considérable, seuls des dispositifs faisant appel au silicium ou aux matériaux à large bande interdite peuvent être pris en compte. Des détecteurs en silicium du type CCD, dispositif à couplage de charge largement développé par

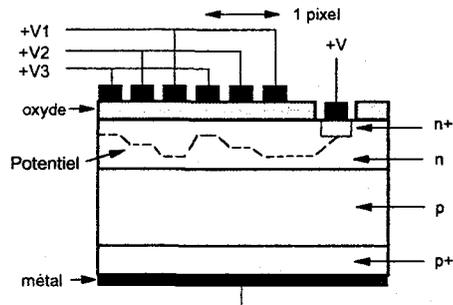


Figure 10: Coupe simplifiée d'une ligne de CCD.
Cross section of a single line of a CCD.

ailleurs pour des applications optiques, sont susceptibles de remplir ces conditions lorsqu'ils sont réalisés sur un matériau de haute résistivité. Le schéma de principe simplifié d'une rangée de pixels d'un CCD est représenté sur la figure 10. L'application de tensions progressives sur les électrodes des capacités MOS induit à l'intérieur de la zone sensible des puits de potentiel aptes à retenir les charges créées par une interaction. Ces charges demeurent ainsi figées jusqu'à ce qu'une variation des tensions, en modifiant la répartition du potentiel, les draine vers l'électrode n^+ . La lecture est par conséquent effectuée séquentiellement, à intervalles réguliers. Plusieurs détecteurs de ce type, possédant jusqu'à 176 000 pixels de $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ ont été produits pour effectuer l'imagerie de rayons X de 0.4 à 12 keV à bord d'un satellite [13]. Une gamme d'énergie restreinte ($E < 30-50 \text{ keV}$), une rapidité modérée liée au mode de lecture et une dégradation importante sous rayonnement, constituent leurs principales limitations. Ces inconvénients conduisent naturellement à envisager l'emploi

d'autres semi-conducteurs (CdTe, CdZnTe, HgI₂). Des structures à base de CdTe comportant un nombre plus ou moins important de pixels de dimensions comprises entre quelques centaines de μm^2 et quelques dizaines de mm^2 , sont couramment réalisées, soit par assemblage de détecteurs élémentaires de petites dimensions, soit par utilisation de méthodes faisant appel à la lithographie et à la gravure. Les prototypes les plus élaborés, constitués de matrices atteignant 400x600 pixels au pas de 50 μm , associés à un circuit électronique intégré sur silicium, pour former une structure hybride compacte (figure 11), peuvent rivaliser avec les CCD pour la radiographie digitale [14]. Malgré les avantages évidents de HgI₂ pour la détection des rayons X à température ambiante et la relative simplicité des structures à fabriquer (figure 11), l'imagerie à l'aide de ce matériau n'a encore été que peu développée, en

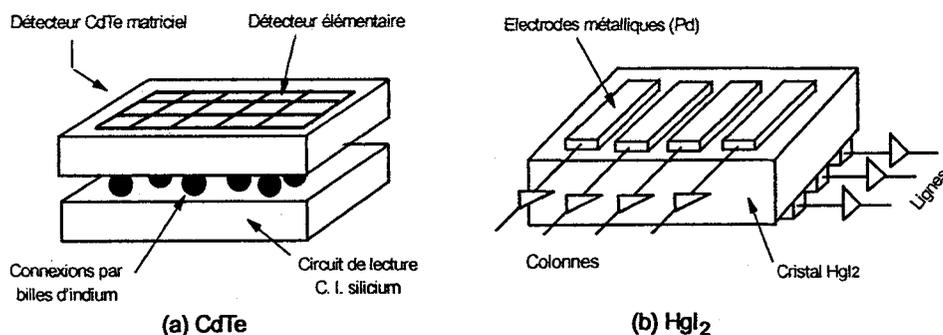


Figure 11: Schéma de principe de détecteurs pour imagerie à base de CdTe (a) et HgI₂ (b).
Basic structure of CdTe and HgI₂-based imaging detectors.

raison principalement de la difficulté à faire croître des échantillons présentant des propriétés homogènes sur une grande surface (plusieurs cm^2). Cependant, quelques dispositifs ont montré la possibilité d'atteindre des résolutions spatiales meilleures que 300 μm et un détecteur comptant 32x32 pixels de 0.8 mm^2 (définis par le dépôt de deux séries de pistes orthogonales sur deux faces opposées) destiné à une caméra X possédant une bonne résolution en énergie a fourni des résultats encourageants [15].

4. CONCLUSION

La détection des rayons X à l'aide de semi-conducteurs a connu au cours des dernières années des évolutions notables dans plusieurs directions. En premier lieu, grâce à une meilleure maîtrise des propriétés de la fenêtre d'entrée des détecteurs et à une amélioration constante de l'électronique associée, la spectrométrie à haute résolution à l'aide de détecteurs Ge(HP) et Si(Li) refroidis a atteint un niveau très élevé, avec des limites de détection se situant aux

environs de 100-200 eV. Ces détecteurs trouvent essentiellement des applications dans l'analyse pour l'identification et le dosage des éléments (micro analyse dans les microscopes SEM et TEM, par exemple). Le second domaine concerne les détecteurs à température ambiante. L'amélioration des propriétés de matériaux tels que HgI₂ et CdTe, la mise à profit des techniques micro-électroniques sur Si, ont conduit au développement de détecteurs qui, au prix d'une détérioration modérée, permettent de s'affranchir de la contrainte liée à l'emploi de cryostats maintenus à la température de l'azote liquide. L'utilisation de moyens de refroidissement moins lourds tels que les éléments Peltier, constitue par ailleurs une voie moyenne permettant de maintenir des performances élevées pour une complication faible. Les applications de ces détecteurs sont nombreuses: analyse chimique (fluorescence X), analyse par diffraction (Energy Dispersive X-Ray Diffraction, EDXRD [16]), contrôle de l'environnement et des déchets nucléaires (vérification *in situ* des installations et du combustible nucléaire [17]), astrophysique (détecteurs embarqués sur satellites [13]), applications du rayonnement synchrotron (X-ray Absorption Spectroscopy, XAS, ou Extended X-Ray Absorption Fine Structure, EXAFS, [18]), radiographie médicale et industrielle, médecine [19]. Encore au stade expérimental, l'assemblage d'un grand nombre (jusqu'à une centaine) de détecteurs HgI₂ constitue un outil puissant pour l'identification de substances par diffraction [16] ou pour la métrologie du rayonnement synchrotron pour lequel des flux atteignant 10⁵ à 10⁶ événements par seconde doivent être enregistrés avec une résolution convenable [18].

Le choix d'un détecteur est bien entendu dicté par les caractéristiques de l'application à laquelle il est destiné. Les divers critères à prendre en compte (mode de fonctionnement - spectrométrie ou comptage à haut flux-, résolution en énergie, efficacité dans la gamme d'énergie considérée, résistance aux radiations, encombrement, facilité de mise en œuvre, coût,...), rendent de plus en plus attractifs les systèmes ne nécessitant pas un refroidissement à 77K. Les travaux effectués depuis de nombreuses années, tant sur les procédés de fabrication des dispositifs à base de silicium que sur les matériaux dits exotiques, ont ainsi permis des avancées remarquables. Il suffit, à titre de preuve, de constater que la commercialisation de détecteurs ou de compteurs faisant appel au tellurure de cadmium est aujourd'hui devenue courante et que de nombreux dispositifs, destinés en grande partie à une instrumentation portative, existent sur le marché. Il en est de même, dans une moindre mesure, pour les détecteurs à base d'iodure mercurique.

Références

- [1] Dabrowski A. et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS22** (1981) 536-540.
- [2] Henck R., *Nucl. Instr. Meth.* **A288**, (1990) 278-281.
- [3] Cox C. E., Lowe B. G., Sareen R. A. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS35** (1988) 28-32.
- [4] Iwanczyk J. et al., *Nucl. Instr. Meth.* **A283** (1989) 208-214.
- [5] Hage-Ali M., Siffert P. *Semiconductors for Room Temperature Nuclear Detector Applications* (T. E. Schlesinger, R. B. James, Academic Press 1995) pp. 291-334.
- [6] Lavietes A. J. et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS42** (1995) 634-638.
- [7] Niemelä A. et Sipilä H. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS41** (1994) 1054-1057.

- [8] Shah K. S. et al. "Lead iodide X-ray detection systems" 9th Int. Workshop on Room Temperature X and γ -Ray Detectors Associated Electronics and Applications, Grenoble 18-22 sept. 1995.
- [9] Caine S. et al, *Nucl. Instr. Meth.* **150** (1978) 83-89.
- [10] Pullia A. et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS 42** (1995) 585-589.
- [11] Pinotti E. et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS 42** (1995) 12-16.
- [12] Sampietro M. et al. *IEEE Electron Dev. Lett.* **16** (1995) 208-210.
- [13] Burke B. E. et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS41** (1994) 375-385.
- [14] Glasser F. et al. "X-ray imaging performances of a 2D hybrid cadmium telluride structure" 9th Int. Workshop on Room Temperature X and γ -Ray Detectors Associated Electronics and Applications, Grenoble 18-22 sept. 1995.
- [15] Patt B. E. Semiconductors for Room Temperature Radiation Detector Applications (R. B. James, T. E. Schlesinger, P. Siffert, L. Franks eds., MRS 1993) pp. 43-54.
- [16] Iwanczyk J. et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS42** (1995) 606-610.
- [17] Artl R., Czock K. H. et Rundquist D. E. *Nucl. Instr. Meth.* **A322** (1992) 575-582.
- [18] Patt B. E. et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS42** (1995) 558-564.
- [19] Scheiber C. and Chambron J. *Nucl. Instr. Meth.* **A322** (1992) 604-614.