



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Faculté de génie
Département de génie électrique et de génie informatique

RÉALISATION D'UN DÉTECTEUR DE RADIOACTIVITÉ POUR UN SYSTÈME MICROFLUIDIQUE

Mémoire de maîtrise
Spécialité: génie électrique

Frédérique GIRARD BARIL

Jury : Vincent AIMEZ (directeur)
Paul CHARRETTE (directeur)
Serge CHARLEBOIS
Jean-François PRATTE



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-96261-9

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-96261-9

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

RÉSUMÉ

Pour établir le comportement pharmacocinétique de nouveaux radiotraceurs en imagerie moléculaire, il est nécessaire d'approfondir l'analyse réalisée à partir d'une image par l'ajout d'une mesure dynamique de la radioactivité dans le sang. L'Université de Sherbrooke développe présentement une plateforme microfluidique d'échantillonnage et d'analyse permettant la mesure de la radioactivité du plasma en temps réel. L'objectif du présent projet de maîtrise était de réaliser le composant optoélectronique responsable de la détection des positrons et de l'intégrer à la puce microfluidique. L'option retenue a été l'utilisation de photodiodes PIN en silicium.

Un procédé de fabrication, ainsi qu'une série de photomasques ont été développés afin de produire une première itération de prototypes. Les détecteurs ont été conçus de manière à optimiser leur sensibilité en fonction du type de rayonnement à détecter. En effet, la région de détection doit être suffisamment épaisse et sensible pour absorber le maximum de particules énergétiques. Également, il est essentiel de minimiser le courant de fuite en noirceur afin d'obtenir un photocourant directement proportionnel à l'énergie des radiations incidentes. Les caractéristiques électriques obtenues avec les premiers détecteurs ont été démontrées proches des performances de détecteurs commerciaux similaires. De plus, il a été possible d'intégrer un canal microfluidique au substrat contenant les photodiodes et d'en réaliser l'encapsulation sans altérer les performances électriques initiales des détecteurs. Une courbe de l'activité radioactive du ^{18}F a été mesurée, celle-ci se comparant à l'activité théorique associée à ce radioisotope communément utilisé en TEP. Enfin, un spectre en énergie des émissions radiatives du ^{18}F a été mesuré et comparé aux performances de systèmes utilisant des photodiodes commerciales. Il a été démontré que le prototype offrait un rapport signal sur bruit similaire aux systèmes basés sur des photodiodes commerciales. Des problèmes durant la fabrication ont cependant compromis les performances de la deuxième itération de détecteurs. Une série de recommandations finales afin d'éviter ces problèmes a été émise suite à la deuxième itération réalisée lors de ce projet de maîtrise.

Mots-clés: TEP, étude pharmacocinétique, détection positron, photodiode PIN silicium.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier les professeurs Vincent Aimez et Paul Charette pour m'avoir proposé un projet très intéressant, enrichissant et pratique, qui correspondait bien à mon profil d'étudiante en génie électrique. Ma maîtrise a été pour moi une expérience extrêmement formatrice, riche d'enseignements dans le domaine du semiconducteur, autant en milieu pratique, que dans la conception de dispositif, devenant ainsi le tremplin vers une carrière dans ce domaine. Ce fût une occasion pour moi de découvrir le monde de la recherche universitaire, exceptionnel milieu empreint de rigueur scientifique, autant que d'être généreux et passionnés.

Il est impératif de remercier celle qui, tout au long de ma maîtrise, a pris avec moi le rôle de mentor, Laurence Convert. Son aide monumentale, son soutien constant, ses conseils pertinents, sa bonne humeur et son enthousiasme n'ont pas seulement contribué, mais ont plutôt fait en sorte que ma maîtrise soit une expérience exceptionnelle des plus enrichissantes, tout en étant toujours agréable. Merci grandement à toi Laurence pour ton énorme générosité, ce fût un très grand plaisir de travailler avec toi.

Merci également au personnel et aux étudiants du CRN² (Centre de Recherche en Nanofabrication et en Nanocaractérisation), du Laboratoire de Biophotonique et d'Optoélectronique et du GRAMS (Groupe de Recherche en Appareillage Médical de Sherbrooke) qui ont partagé avec moi leur savoir et expériences, sources d'information, de soutien et d'encouragement tout au long de ma maîtrise.

Finalement, un gros merci aux membres de mon jury, Serge Charlebois et Jean-François Pratte, pour avoir relu avec attention mon mémoire, malgré les délais de remise, et apporté des remarques pertinentes afin d'en améliorer la qualité.

TABLE DES MATIÈRES

1 – Introduction	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Définition et objectifs du projet de recherche	12
1.3 Structure du mémoire	13
2 – État de l’art et cadre de référence	15
2.1 Choix de la méthode de détection	15
2.2 Circuit de traitement de signal	26
2.3 Bruit électronique	32
2.4 Conclusion	36
3 – Conception et fabrication des photodiodes	37
3.1 Éléments de conception	37
3.2 Exemples de structures et de procédés de fabrication existants dans la littérature pour des applications semblables	56
3.3 Procédé développé et réalisé au CRN ²	62
3.4 Choix des paramètres de conception	67
3.5 Conclusion	73
4 – Performances des photodiodes	74
4.1 Méthode de caractérisation des prototypes	74
4.2 Résultats et discussion (première itération)	75
4.3 Modifications à la conception	109
4.4 Résultats et discussion (deuxième itération)	116
4.5 Conclusion	121
5 – Intégration à la puce microfluidique et encapsulation	123
5.1 Fabrication de canaux microfluidiques	123
5.2 Procédure d’encapsulation	124
5.3 Réalisation et caractérisation d’un prototype de puce microfluidique	125
5.4 Conclusion	130
6 – Conclusion	132
6.1 Cadre et objectifs du projet	132
6.2 Sommaire du projet	133
6.3 Contributions et travaux futurs	135
Annexe A : Procédé de fabrication des photodiodes 1 ^{ère} itération	137

Annexe B :	Photomasque 1^{ère} itération	154
Annexe C :	Procédé de fabrication des photodiodes 2^e itération	162
Annexe D :	Photomasque 2^e itération	179
Annexe E :	Procédé de fabrication des canaux microfluidiques.....	191
Annexe F :	Procédé d'encapsulation de la puce microfluidique	193
	Liste des références.....	194

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Caractéristiques électriques des photodiodes commerciales utilisées pour la détection des positrons.	6
Tableau 1.2 : Efficacité optimale K_{opt} et activité minimale A_{min} et maximale A_{max} détectées pour quatre isotopes communs TEP avec le PE50.	8
Tableau 3.1 : Nettoyage RCA utilisé au CRN ²	55
Tableau 3.2 : Exemples de procédés de fabrication de photodiode PIN pour détection de radiations.	59
Tableau 3.3 : Exemples de procédés de fabrication de photodiode PIN pour détection de radiations.	60
Tableau 3.4 : Premier procédé conçu et réalisé au CRN ²	64
Tableau 3.5 : Performances obtenues lors du premier procédé de fabrication réalisé au CRN ²	65
Tableau 3.6 : Types de passivation testés sur la région active des diodes PIN.	69
Tableau 3.7 : Tests réalisés durant la première itération.	71
Tableau 3.8 : Procédé de fabrication de la première itération.	72
Tableau 4.1 : Description des modèles physiques utilisés.	90
Tableau 4.2 : Paramètres par défaut des simulations Taurus Medici.	90
Tableau 4.3 : Rappel des dimensions de différentes structures d'anneau de garde utilisées dans la littérature.	102
Tableau 4.4 : Comparaison entre procédé initial et nouvelle itération avec structures rondes (Rayon : 0,5 mm).	104
Tableau 4.5 : Comparaison numérique entre nouvelle itération et photodiode de la compagnie Perkin Elmer.	106
Tableau 4.6 : Comparaison numérique entre nouvelle itération et photodiode de la compagnie Hamamatsu.	108
Tableau 4.7 : Types de passivation testés sur la région active des diodes PIN.	111
Tableau 4.8 : Tests réalisés durant la deuxième itération.	113
Tableau 4.9 : Procédé de fabrication de la deuxième itération.	114
Tableau 4.10 : Paramètres de simulations Microtech.	118

Tableau B.1 : Structures adaptées à l'intégration aux microcanaux.....	154
Tableau B.2 : Structures pour la passivation.	157
Tableau B.3 : Structures pour les contacts électriques.	158
Tableau B.4 : Autres structures de test.	159
Tableau B.5 : Structures répétées sur tous les quarts de gaufre.	160
Tableau D.1 : Structures adaptées à l'intégration aux microcanaux.	179
Tableau D.2 : Structures pour la passivation.	186
Tableau D.3 : Autres structures de test.	187
Tableau D.4 : Séries de structures présentes sur les photomasques.	189

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Système d'imagerie moléculaire TEP.	3
Figure 1.2 : Flux entre 2 régions, A et B, décrits par les constantes k_1 et k_2	4
Figure 1.3 : Architecture globale du CS μ	5
Figure 1.4 : Vue de dessus et de coupe d'un détecteur et disposition des détecteurs dans le CS μ	6
Figure 1.5 : Schéma global des objectifs du projet.....	9
Figure 1.6 : Géométrie de détection avec canal microfluidique.....	11
Figure 2.1 : Spectres théoriques normalisés de l'énergie cinétique des positrons provenant des émissions radioactives du ^{18}F , ^{11}C , ^{13}N et ^{15}O	16
Figure 2.2 : Principe de fonctionnement de la détection directe par ionisation dans un détecteur à gaz.....	18
Figure 2.3 : Structures énergétiques dans le cas d'un gaz (a) et d'un semiconducteur (b).	19
Figure 2.4 : Jonction PN.....	21
Figure 2.5 : Diffusion des porteurs et création d'un champ électrique à l'interface.	22
Figure 2.6 : Courbe idéale du courant en fonction de la tension de polarisation dans une jonction PN.....	23
Figure 2.7 : Courant en fonction de la polarisation dans une diode, avec différents taux de génération optique (g_{op}).....	24
Figure 2.8 : Photodiode à jonction PIN.....	25
Figure 2.9 : Modes de détection de radiations nucléaires.....	26
Figure 2.10 : Composants de base dans une chaîne de détection de radiation nucléaire.	28
Figure 2.11 : Mode de couplage du détecteur au préamplificateur.	29
Figure 2.12 : Circuit électronique simplifié d'un amplificateur de tension (A) et d'un amplificateur transimpédance (B). Forme typique des signaux d'entrée et de sortie d'un amplificateur (C).....	30
Figure 2.13 : Exemple de mise en forme du signal par un réseau CR-RC.....	32
Figure 2.14 : Circuit équivalent à l'analyse du bruit dans une photodiode. Il est à noter que le bruit de scintillation n'est pas représenté dans le schéma précédent.....	35
Figure 3.1 : Photodiode à structure planaire.....	38

Figure 3.2 : Pouvoir absorbant du silicium en fonction de l'énergie d'un électron qui le traverse.....	39
Figure 3.3 : Sources de courant de fuite dans une structure PIN.....	48
Figure 3.4 : Localisation des charges dans une interface SiO ₂ -Si avec oxyde cru thermiquement.	49
Figure 3.5 : Réduction du courant de fuite par l'utilisation d'un anneau de garde. A : Vue de coupe du dispositif,.....	51
Figure 3.6 : Introduction d'une couche dopée n en surface dans un substrat n- afin de limiter la zone de déplétion et la contribution du courant de fuite à l'interface avec la passivation (SiO ₂).	51
Figure 3.7 : Procédé de fabrication pour photodiode PIN.....	57
Figure 3.8 : Premières structures de type PIN conçues et réalisées au CRN ²	62
Figure 3.9 : Détails des masques utilisés pour la structure ronde.....	63
Figure 4.1 : Schéma illustrant la procédure de caractérisation en noirceur.....	75
Figure 4.2 : Courant en fonction de la polarisation en direct sur la gaufre E.....	76
Figure 4.3 : Courant en fonction de la polarisation en direct sur les gaufres F, G et H.	77
Figure 4.4 : Courant en fonction de la polarisation inverse sur la gaufre E.	78
Figure 4.5 : Courant en fonction de la polarisation inverse sur les gaufres F, G et H.	78
Figure 4.6 : Capacité en fonction de la polarisation inverse sur la gaufre E.	79
Figure 4.7 : Exemple de court-circuit possible dans une jonction PN.	82
Figure 4.8 : Formation de pointes d'aluminium dans le silicium, à travers une épaisseur d'oxyde de 20Å (a) et à travers une épaisseur d'oxyde de 10Å (b).	83
Figure 4.9 : Concentration de dopants (cm ⁻³) en fonction de l'épaisseur (µm).....	84
Figure 4.10 : Courbes IV en obscurité obtenues pour diverses polarisations de l'anneau de garde sur une structure de la gaufre E.	86
Figure 4.11 : Modèle électrique sur vue 2D en coupe d'une photodiode PIN avec anneau de garde et champ électrique simulé sur Taurus Medici.	87
Figure 4.12 : Modèle cylindrique pour diode PIN ronde (0.79 mm ²) avec anneau de garde....	88
Figure 4.13 : Modèle cartésien pour diode PIN rectangulaire (90 mm ²) avec anneau de garde.	89
Figure 4.14 : Courbes IV en obscurité avec anneau de garde polarisé à 0 V.....	92

Figure 4.15 : Courbes IV en obscurité avec anneau de garde polarisé à 0 V obtenue en simulation Taurus Medici.....	92
Figure 4.16 : Vue de coupe de la photodiode et de l'anneau de garde à trois différentes polarisations de la diode, alors que l'anneau de garde est maintenu à 0 V.	93
Figure 4.17 : Courbes IV en obscurité avec anneau de garde polarisé à -15 V.....	95
Figure 4.18 : Vue de coupe de la photodiode et de l'anneau de garde à trois différentes polarisations de la diode, alors que l'anneau de garde est maintenu à -15 V.....	95
Figure 4.19 : Courbes IV en obscurité avec anneau de garde polarisé à la même tension que la diode sur l'échantillon ED.....	96
Figure 4.20 : Courant d'obscurité mesuré à -35V en fonction du type de passivation.	98
Figure 4.21 : Courant d'obscurité mesuré à -35V en fonction de la géométrie de contact.....	99
Figure 4.22 : Courbes IV en obscurité pour divers espacements entre l'anneau de garde et la région active sur l'échantillon ED.....	100
Figure 4.23 : Courbes IV en obscurité pour diverses largeurs d'anneau de garde sur l'échantillon ED.	101
Figure 4.24 : Courbes IV en obscurité pour procédé initial et nouvelle itération avec structures rondes (Rayon : 0,5 mm).	105
Figure 4.25 : Courbes IV en obscurité pour première itération et procédé commercial avec structures carrées.	107
Figure 4.26 : Courbes IV en obscurité pour nouvelle itération et procédé commercial avec structures rectangulaires.	108
Figure 4.27 : Géométrie.....	116
Figure 1.28 : Simulations Microtech du profil de dopage du substrat suite à la seconde croissance d'oxyde et à l'étape de recuit d'activation.	119
Figure 5.1 : Puce microfluidique intégrant les microcanaux à un substrat avec photodiodes PIN (vue de coupe).	124
Figure 5.2 : Exemple de prototype de puce microfluidique encapsulée sur plaquette de cuivre pour circuit imprimé.	125
Figure 5.3 : Prototype de puce microfluidique intégrée avec photodiodes fabriquées au CRN ² (Échantillon EC de la première itération).....	126

Figure 5.4 : Courbes IV en obscurité obtenues à chaque étape du processus d'encapsulation et de test de la puce microfluidique.....	127
Figure 5.5 : Schéma du montage d'acquisition de données pour la détection de radiations nucléaires.....	128
Figure 5.6 : Spectre d'énergie du ^{18}F mesuré sur trois différents systèmes de détection.	129
Figure 5.7 : Mesure de l'activité radioactive du ^{18}F à partir du système de détection avec diode CRN ²	130
Figure B.1 : Structure d'un microcanal.	154
Figure B.2 : Structures adaptées à l'intégration aux microcanaux.	155
Figure B.3 : Structures pour largeur et espacement d'anneau de garde.	156
Figure B.4 : Structures pour la passivation.....	157
Figure B.5 : Structures pour les contacts électriques.....	158
Figure B.6 : Autres structures de test.	159
Figure B.7 : Photomasques de la première itération.....	161
Figure D.1 : Masque de microcanal développé pour les diodes Perkin Elmer.....	179
Figure D.2 : Structures adaptées à l'intégration aux microcanaux.....	184
Figure D.3 : Structures pour largeur et espacement d'anneau de garde.....	185
Figure D.4 : Structures pour passivation.	187
Figure D.5 : Autres structures de test.	188
Figure D.6 : Photomasques pour la deuxième itération.	190

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION

Ce chapitre contient une mise en contexte générale, la définition du projet de recherche et ses objectifs principaux, ainsi que la structure du mémoire.

1.1 Mise en contexte

Cette section comprend plus spécifiquement une introduction au domaine technique de l'imagerie moléculaire, la description des projets de compteur sanguin μ volumétrique (CS μ) et de système microfluidique d'analyse sanguine, ainsi qu'un exposé de la problématique dans laquelle la présente recherche sera effectuée.

1.1.1 Imagerie moléculaire

Au cours des dernières années, l'imagerie moléculaire est devenue un outil incontournable pour le diagnostic, le suivi thérapeutique et la recherche en médecine, plus particulièrement dans le domaine de l'oncologie. L'intérêt pour ce type d'imagerie provient de la possibilité de réaliser des études quantitatives non invasives extrêmement sensibles sur une variété de processus biologiques. L'information ainsi obtenue est complémentaire à celles fournies par les méthodes traditionnelles telles que l'imagerie par résonance magnétique ou la tomодensitométrie. En effet, l'imagerie moléculaire permet de visualiser des processus métaboliques et physiologiques, alors que les autres méthodes produisent une image anatomique du sujet [Cherry et al., 2003].

Médecine nucléaire

La médecine nucléaire comporte deux grandes classes de techniques d'imagerie moléculaire, soit la tomographie d'émission monophotonique (TEM ou *SPECT*) et la tomographie d'émission par positrons (TEP ou *PET*). Les deux techniques consistent en l'injection d'une molécule, appelée radiotraceur, dans le corps d'un sujet (humain ou animal), suivi de la prise d'une image permettant de cibler les molécules dans le corps. Les traceurs sont des molécules dont le comportement physiologique ou biochimique est connu. On utilise par exemple des traceurs diffusibles pour suivre le flux sanguin, des traceurs suivant des voies métaboliques

afin d'évaluer l'activité métabolique du corps ou des traceurs se liant à des récepteurs spécifiques à la surface des cellules afin de repérer des cellules d'intérêt à l'intérieur du corps. En médecine nucléaire, les traceurs sont marqués par un atome radioactif et sont appelés radiotraceurs. Un atome radioactif est un isotope instable d'un élément. En se désintégrant, afin de reprendre un état stable, ces atomes émettent un rayonnement propre à chacun (particules chargées ou photons). C'est en détectant le rayonnement émis par les radioisotopes qu'il est possible de créer une représentation 2D ou 3D de la concentration des molécules d'intérêt (les traceurs) dans le corps et d'extraire ainsi une image métabolique du sujet.

La TEM utilise des radioisotopes émettant des rayons gamma simples ou multiples, qui ne sont pas corrélés en angle. Afin d'obtenir l'information spatiale nécessaire à la formation d'une image tomographique, la TEM utilise un collimateur qui réduit la sensibilité et limite la résolution spatiale du système de détection. Dans le cas de la TEP, les radioisotopes choisis émettent spécifiquement des particules chargées positivement, les positrons. Ces particules s'annihilent rapidement avec des électrons environnants et émettent deux rayons gamma corrélés à 180°. De ce fait, la TEP ne nécessite pas de collimateur puisqu'il est possible d'utiliser la coïncidence des rayons pour obtenir l'information spatiale nécessaire à la construction d'une image. La TEP est schématisée à la Figure 1.1. La sensibilité obtenue est ainsi généralement plus élevée en TEP qu'en TEM. Cependant, l'avantage de la TEM est qu'elle n'a pas à se limiter à des radioisotopes émetteurs de positron et qu'elle peut fonctionner avec des radiotraceurs plus faciles à obtenir, donc moins coûteux [Cherry et al., 2003].

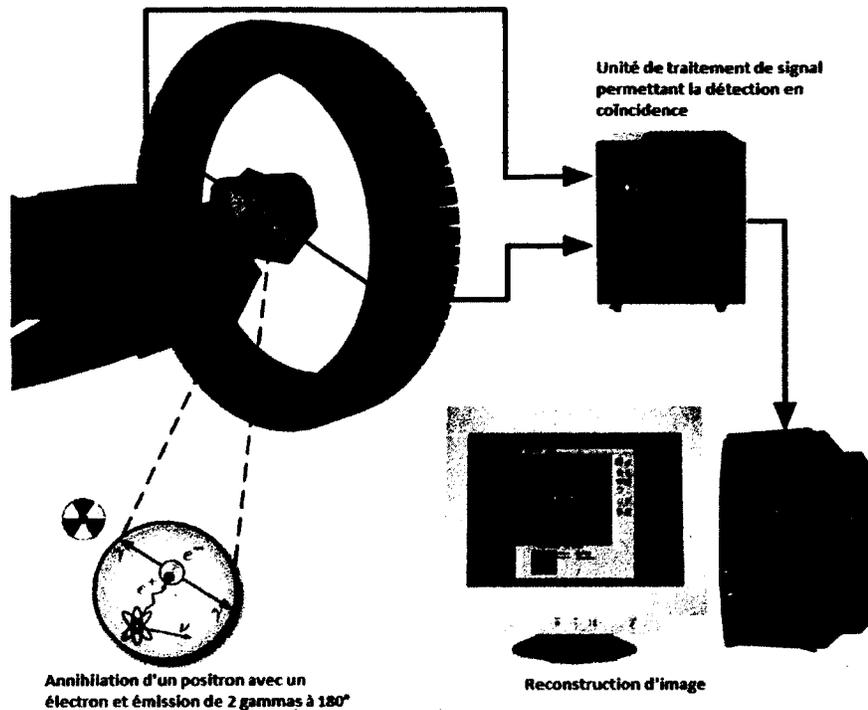


Figure 1.1 : Système d'imagerie moléculaire TEP.
(Adapté de [Langner, 2003].)

Modélisation pharmacocinétique des traceurs

En recherche, l'imagerie moléculaire est utilisée pour établir le comportement pharmacocinétique des molécules. Ce type d'étude, réalisée d'abord chez l'animal, puis chez le patient, permet de construire un modèle mathématique décrivant les différentes étapes de l'évolution d'une molécule dans un organisme en fonction du temps écoulé et de paramètres physiologiques. Ces modèles permettent ensuite de prédire le déplacement des traceurs, le temps nécessaire avant l'élimination des éléments radioactifs, etc.

La plupart des modèles communément utilisés en médecine nucléaire décrivent le flux d'un radiotracer entre deux régions suite à une injection dans le sang d'un sujet. Un exemple de modèle apparaît à la **Erreur ! Référence non valide pour un signet.**

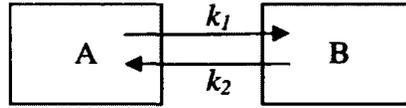


Figure 1.2 : Flux entre 2 régions, A et B, décrits par les constantes k_1 et k_2 .
(Tiré de [Cherry et al., 2003])

Typiquement, la région A du modèle constitue un compartiment vasculaire et la région B du modèle est un tissu quelconque. Les concentrations en radiotracer dans les régions A et B en fonction du temps sont respectivement décrites par $C_A(t)$ et $C_B(t)$, alors que les constantes k_1 et k_2 sont des paramètres du modèle. Les concentrations sont considérées uniformes dans chaque région. Le taux de variation de la concentration de la région B, soit $dC_B(t)/dt$ est représenté par l'Équation 1.1.

$$dC_B(t)/dt = k_1 C_A(t) - k_2 C_B(t) \quad (1.1)$$

Contrairement à la concentration tissulaire $C_B(t)$, qui peut être déterminée par une séquence d'images tomographiques, la concentration plasmatique $C_A(t)$ doit généralement être mesurée directement à partir du sang. Il faut savoir que, suite à son injection dans le sang d'un organisme, un radiotracer est généralement métabolisé, ce qui le fait apparaître sous plusieurs formes et à plusieurs endroits (dans le plasma, mais également dans les cellules sanguines). Lorsqu'un modèle cinétique est déjà établi, il est possible d'estimer la concentration plasmatique d'un radiotracer sous sa forme initiale à partir de la mesure de la radioactivité dans le sang total, car la proportion est connue. Cependant, dans le cas du développement de nouveaux radiotraceurs, il est nécessaire de mesurer la radioactivité sous sa forme initiale et dans le plasma seulement. Pour se faire, on doit traiter chaque échantillon sanguin afin de séparer le plasma du sang total et isoler le radiotracer de ses métabolites avant de mesurer la concentration en radioactivité. La concentration plasmatique d'un radiotracer en fonction du temps est appelée fonction d'entrée [Cherry et al., 2003].

1.1.2 Projet de compteur sanguin μ volumétrique (CS μ)

La mesure dynamique de la radioactivité dans le sang est ainsi complémentaire à l'analyse réalisée à partir d'une image tomographique en fournissant une donnée essentielle à la quantification d'un phénomène physiologique ou biochimique. Plusieurs systèmes ont été

développés dans ce but, dont le compteur sanguin μ volumétrique [Convert et al., 2007], développé au Centre d'imagerie moléculaire de Sherbrooke (CIMS). Ce compteur automatisé, dédié aux rats et aux souris, permet de réaliser la mesure dans le sang total de la fonction d'entrée des isotopes utilisés couramment en TEP (il a été caractérisé plus particulièrement pour le ^{18}F , ^{11}C , ^{13}N , ^{64}Cu). Il comprend trois modules principaux, soit un module de détection et de mise en forme du signal, un module d'acquisition et de contrôle et finalement une interface logicielle sur ordinateur. L'architecture globale du CS μ est décrite à la Figure 1.3.

Le fonctionnement global du système est simple : une pompe pousse-seringue prélève continuellement du sang d'une canule artérielle ou veineuse de l'animal étudié pour le faire passer dans un cathéter placé devant deux détecteurs. Les radiotraceurs présents dans le sang émettent des positrons dont l'énergie est captée par les détecteurs. Ceux-ci génèrent un signal électrique qui est amplifié et mis en forme dans une carte électronique analogique. Le signal est ensuite dirigé vers l'interface logicielle via une carte électronique numérique. Le logiciel de contrôle, en plus de collecter les données, permet de sélectionner les divers paramètres de l'expérience : protocole de prélèvement de sang, affichage de la courbe de radioactivité sanguine en temps réel et traitement des données.

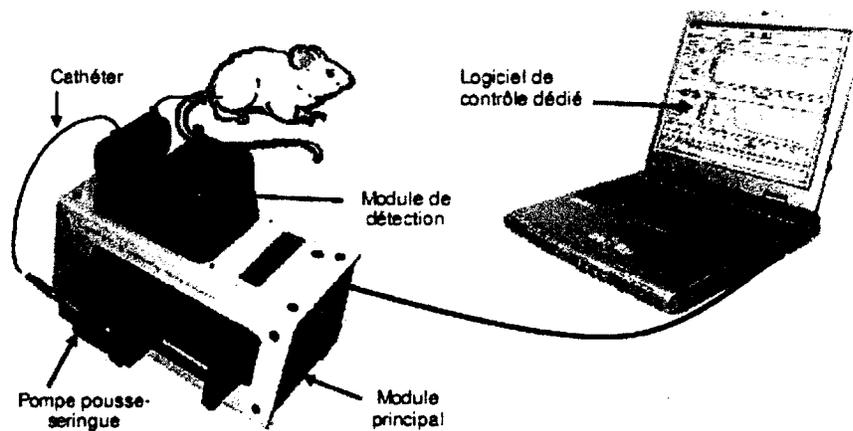


Figure 1.3 : Architecture globale du CS μ .
(Tiré de [Convert, 2006])

Système de détection du CS μ

Comme le compteur μ volumétrique a été développé pour être utilisé en complémentarité à l'imagerie TEP, il détecte des positrons. Dans le compteur, la distance minimale entre la source

de radioactivité et le détecteur offre la possibilité de détecter les positrons directement, plutôt que les rayons gamma (utilisés en TEP), afin de mesurer la radioactivité dans le sang. La détection des positrons peut être réalisée à l'aide d'une simple photodiode en silicium, c'est pourquoi cette option a été retenue. Dans le cas des rayons gamma, le rayonnement est plus énergétique et nécessite un matériau additionnel tel qu'un scintillateur afin de pouvoir être absorbé. Le détecteur utilisé dans le CS μ est, plus précisément, une photodiode PIN S3588-08 de la compagnie Hamamatsu. Sa surface active est de forme rectangulaire et mesure 3 x 30 mm². Son épaisseur est de 0,45 mm. Elle est déposée sur un emballage en céramique de 1 mm d'épaisseur et protégée par une mince couche d'époxy d'épaisseur maximale de 0,1 mm. Comme les positrons sont émis dans toutes les directions, deux photodiodes ont été placées face à face, de part et d'autre du cathéter où circule le sang. Cette configuration permet de doubler la sensibilité du système. Une vue du dessus et de coupe d'un détecteur, ainsi que la disposition des détecteurs autour du cathéter apparaissent à la Figure 1.4. Les principales caractéristiques électriques du détecteur sont résumées au Tableau 1.1.

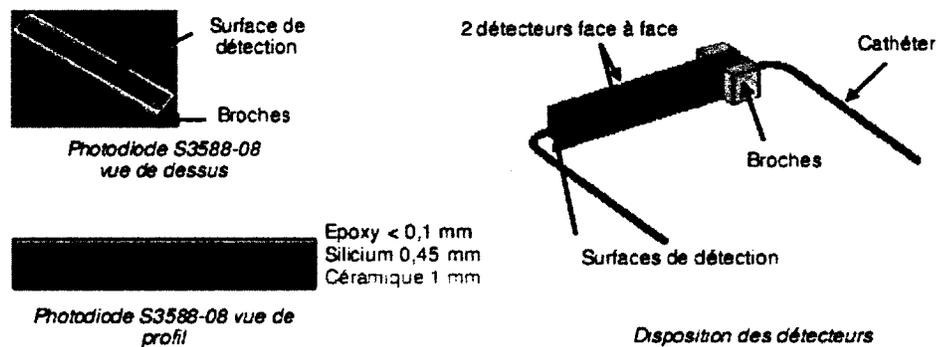


Figure 1.4 : Vue de dessus et de coupe d'un détecteur et disposition des détecteurs dans le CS μ .
(Tiré de [Convert, 2006])

Tableau 1.1 : Caractéristiques électriques des photodiodes commerciales utilisées pour la détection des positrons.
(Tiré de [Hamamatsu, 2011a])

Composante	Courant d'obscurité (nA)	Densité de courant d'obscurité (nA/cm ²)	Fréquence de coupure (MHz)	Capacité (pF)	Puissance de bruit équivalent (W/Hz ²)
Hamamatsu S3588-08	(V = -70 V) Typ. 3 Max. 10	(V = -70 V) Typ. 4 Max. 12	(V = -70 V) 40	(V = -70 V) 40	4,7 x 10 ⁻¹⁴

Résultats

Le compteur μ volumétrique a été caractérisé sur plusieurs points : efficacité absolue du système de détection, temps mort, dispersion dans le cathéter, délai de propagation, décroissance [Convert, 2006]. Ici, nous nous intéresserons principalement à l'**efficacité de détection K** , qui constitue un paramètre essentiel d'un système de détection et qui permet d'évaluer la sensibilité. En effet, il s'agit du pourcentage de comptes que l'appareil mesure par rapport à l'activité radioactive réelle présente dans l'échantillon étudié, représenté à l'Équation 1.2.

$$K = \frac{N_m}{N_r} \quad (1.2)$$

où N_m est le nombre d'impulsions mesurées dans un détecteur (comptes par seconde) et N_r est le nombre théorique de particules émises par la source (désintégrations par seconde). La désintégration radioactive est un processus spontané qui est impossible à prédire avec certitude. Ce processus est donc mathématiquement décrit en termes de probabilité et de taux de désintégration moyen. Si un échantillon contient N atomes radioactifs d'un certain radioisotope, le taux de désintégration moyen, soit le nombre de désintégrations par unité de temps ($\Delta N/\Delta t$), est ce qu'on appelle l'activité radioactive de l'échantillon. L'unité permettant de mesurer l'activité radioactive est le becquerel (Bq). Un becquerel correspond à une désintégration par seconde. Dans le cas de radioisotopes dont la désintégration produit uniquement des positrons, le compte du nombre de positrons émis par unité de temps correspond à la mesure de l'activité radioactive de l'isotope.

L'efficacité absolue du système de détection dépend théoriquement de plusieurs facteurs : efficacité géométrique, atténuation du faisceau avant l'arrivée au détecteur, capacité du détecteur à absorber le faisceau et capacité du circuit de traitement électronique à convertir le pulse généré en signal utile.

Les résultats obtenus avec le CS μ pour les quatre isotopes TEP les plus utilisés sont illustrés au Tableau 1.2. Les activités détectables minimales et maximales sont des valeurs déduites à partir de l'efficacité de détection. L'efficacité obtenue est relativement faible, car la majorité du spectre d'émission des isotopes est complètement absorbée avant d'atteindre les détecteurs (principalement dans le sang et dans la paroi du cathéter) ou le signal électrique produit est

noyé dans le bruit électronique. Il demeure que ces taux d'efficacité sont amplement suffisants pour obtenir des courbes temps-activité précises résultantes d'injections typiques chez les rats et les souris.

Tableau 1.2 : Efficacité optimale K_{opt} et activité minimale A_{min} et maximale A_{max} détectées pour quatre isotopes communs TEP avec le PE50. K_{opt} correspond à l'efficacité pour un seuil de détection fixé juste au-dessus du bruit électronique. A_{min} est l'activité correspondant au bruit de fond typique (5 cps) et A_{max} est l'activité correspondant au taux de comptage maximal du CSμ (65535 cps). (Tiré de [Convert, 2006])

	E_{γ} (MeV)	Probabilité d'émission	Efficacité optimale, K	Activité minimale détectée, A	Activité maximale détectée, A
^{64}Cu	0,578; 0,653	55,1 %	3,5 %	46,8 Bq/ μl	240,1 kBq/ μl
^{18}F	0,634	96,7 %	7,1 %	23,1 Bq/ μl	118,3 kBq/ μl
^{11}C	0,96	99,7 %	16 %	10,2 Bq/ μl	52,5 kBq/ μl
^{13}N	1,199	99,8 %	23 %	7,1 Bq/ μl	36,5 kBq/ μl

1.1.3 Projet de système microfluidique d'analyse sanguine

Le compteur sanguin décrit à la section précédente est commercialement en vente et présentement la solution adoptée par le laboratoire TEP animale de l'Université de Sherbrooke. Cependant, celui-ci se trouve limité par une mesure de l'activité du sang total. Comme il a été vu précédemment, la mesure de la fonction d'entrée, soit la concentration radioactive plasmatique, peut être très utile à la modélisation pharmacocinétique de nouveaux radiotraceurs. Également, l'efficacité de détection avec ce type de système aurait avantage à être augmentée afin d'obtenir une mesure plus précise de l'activité radioactive. D'autant plus qu'une meilleure sensibilité offrirait la possibilité d'ajouter des fonctions additionnelles au système, telles que la mesure des rejets de CO_2 radioactifs après injection, la mesure chez l'humain ou la détection d'émissions radioactive de basse énergie. Le Centre de Recherche en Nanofabrication et en Nanocaractérisation (CRN²) et le département de Médecine nucléaire et de radiobiologie de l'Université de Sherbrooke travaillent en collaboration dans ce domaine. Ils développent présentement un système microfluidique programmable d'échantillonnage ayant pour but de séparer et de mesurer la radioactivité du plasma en ligne [Convert, 2007]. Ce système est destiné à caractériser de nouveaux radiotraceurs conçus au CIMS.

Dans ce nouveau système, la mesure de la radioactivité dans le plasma est réalisée sur une plateforme d'analyse biologique miniature de type « laboratoire sur puce », basée sur les principes de fabrication microélectronique. Ces nouvelles technologies bénéficient des avantages de l'industrie électronique, soient des techniques déjà éprouvées et bien établies, un coût faible pour la production de masse et une facilité d'intégration à des circuits électroniques. La plateforme utilise des circuits microfluidiques, des canaux à l'échelle du micromètre, offrant les avantages de minimiser le volume prélevé (essentiel en recherche animale), de réduire le temps de réaction et d'effectuer automatiquement plusieurs opérations en cascade ou en parallèle. Ce type de plateforme permet donc d'augmenter significativement les performances de l'appareil tout en réduisant le coût et l'encombrement.

Les différentes fonctions intégrées à la puce sont illustrées dans le schéma global de la puce à la Figure 1.5: la séparation du plasma et du sang total (F1), la mesure en temps réel de la radioactivité plasmatique (F2), ainsi que l'échantillonnage à des temps programmables (F3). Une quatrième fonction, soit la mesure de la radioactivité de fractions d'intérêt du sang (F4), est également envisagée.

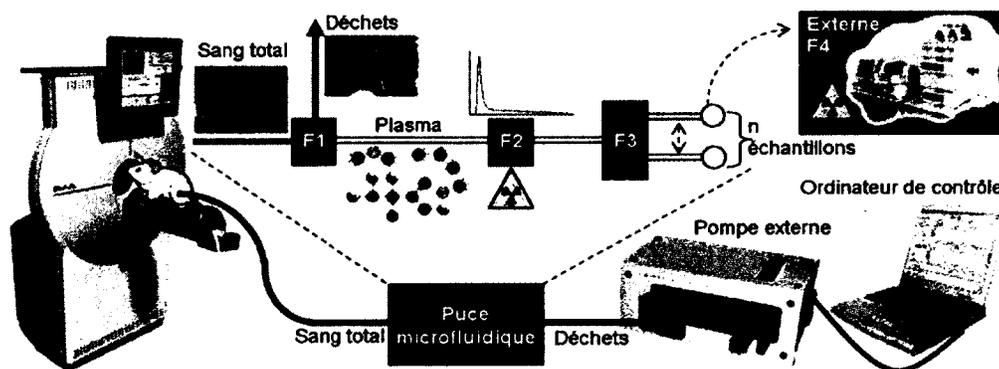


Figure 1.5 : Schéma global des objectifs du projet.
(Tiré de [Convert, 2007])

Comme dans le cas du CS μ , une pompe est utilisée pour prélever le sang et le diriger dans la puce microfluidique. La puce sera aussi reliée à une carte électronique analogique et numérique afin de réaliser le traitement du signal électrique provenant du détecteur et, finalement, de communiquer à l'ordinateur les données recueillies. Le logiciel d'interface

permettra de configurer l'acquisition, d'afficher les données en temps réel et d'effectuer les corrections nécessaires sur les données acquises.

Les grandes divisions de ce projet se définissent comme suit:

- Technique de prototypage rapide de canaux microfluidiques
- Séparation plasma / sang total en temps réel
- Détection intégrée de positrons
- Séparation d'échantillons
- Intégration des fonctions sur une même puce

1.1.4 Problématique

La nouvelle plateforme d'analyse biologique développée à l'Université de Sherbrooke nécessite le développement d'un dispositif de détection de radioactivité. Le détecteur en question doit être adapté et optimisé pour la mesure spécifique de la radioactivité présente sous forme de positrons provenant de radiotraceurs communément utilisés en TEP. De plus, la sensibilité du système doit permettre de détecter les électrons de conversion émis par le ^{99m}Tc , communément utilisé en TEM. Le détecteur doit également pouvoir s'intégrer de manière optimale à la puce microfluidique. Pour ce faire, les détecteurs doivent être incorporés directement dans le substrat contenant les canaux microfluidiques comme à la Figure 1.6. Cette configuration a pour avantages de réduire considérablement la distance fluide/détecteur, d'augmenter la région active de détection grâce à « l'intégration dans le substrat » des canaux microfluidiques et améliore ainsi significativement l'efficacité de détection. Finalement, la multitude de fonctions fluidiques présentes sur la puce nécessite un contrôle total sur les paramètres de conception des détecteurs, aussi bien en termes de nombre, de position et de géométrie, qu'en termes de fabrication.

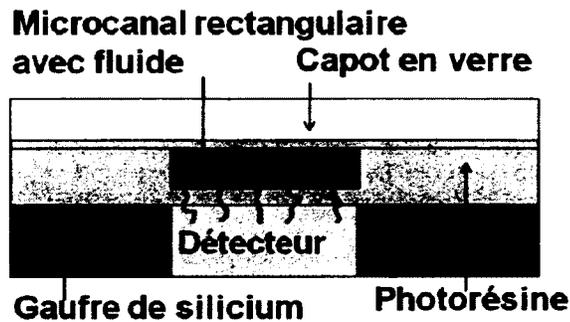


Figure 1.6 : Géométrie de détection avec canal microfluidique.

On retrouve sur le marché des dispositifs microélectroniques qui peuvent être utilisées pour la détection de particules chargées, telles que les photodiodes de la compagnie Hamamatsu utilisées dans le CSμ. Néanmoins, ceux-ci sont normalement encapsulés dans une couche protectrice isolante, par exemple de l'époxy transparente, ou scellé sous une fenêtre de plastique. L'intégration de microcanaux est ainsi difficilement envisageable sur ce type de dispositif et, de plus, une interface non négligeable serait présente entre le détecteur et un éventuel microcanal, diminuant ainsi l'efficacité de détection. Il existe aussi des procédés de microfabrication commerciaux accessibles dans le cadre de projets de recherche comme celui-ci. Ces ententes permettent de concevoir des dispositifs microélectroniques selon un procédé établi et de les faire fabriquer dans des fonderies commerciales, permettant de hauts standards de qualité. Cependant, les procédés sont prédéterminés, les coûts sont élevés et le délai entre chaque livraison est non négligeable. Une autre option intéressante est d'avoir accès aux produits semi-finis commerciaux, c'est-à-dire un substrat où les photodiodes ont été fabriquées, mais non découpées ou encapsulées. Il serait alors possible de fabriquer les microcanaux directement au-dessus des détecteurs. Par contre, dans ce cas, il est impossible d'optimiser la géométrie ou le procédé selon nos besoins. En conséquence, avec des produits commerciaux, nous ne disposons pas de la flexibilité nécessaire à ce projet.

C'est pourquoi il a été convenu, lors de la définition du projet du système microfluidique, que les détecteurs, tout comme les canaux microfluidiques, seraient fabriqués dans les infrastructures disponibles au CRN². Malgré le fait qu'il est pratiquement impossible d'atteindre les standards industriels d'entreprises expérimentées dans le domaine depuis de

nombreuses années au laboratoire universitaire du CRN², cette option demeure la plus intéressante dans l'optique d'une intégration à une puce microfluidique. Ce choix devrait ainsi mener à une performance globale améliorée du système grâce à la géométrie totalement optimisée du détecteur en fonction du dispositif global.

1.2 Définition et objectifs du projet de recherche

Cette section énonce d'abord la définition précise du projet de recherche et décrit ensuite plus en détail les contraintes liées aux deux objectifs du projet de recherche, ainsi que les performances visées pour chacun d'eux.

1.2.1 Définition du projet de recherche

Le but principal de mon projet de maîtrise est de réaliser une section du projet de l'échantillonneur microfluidique, soit la détection des émissions de positrons intégrée à la puce microfluidique. Plus spécifiquement, mon premier objectif est de faire la conception et la fabrication d'un dispositif de détection selon les principes de fabrication en salle blanche et la disponibilité des ressources au CRN². Mon deuxième objectif est d'intégrer le dispositif à la plateforme microfluidique et d'en réaliser l'encapsulation. Ces deux objectifs doivent nécessairement être réalisés en parallèle afin d'optimiser le processus de conception.

1.2.2 Conception et fabrication du détecteur

L'aspect principal à tenir en compte dans ce projet est que les divers prototypes seront fabriqués dans l'environnement du CRN². La reproductibilité et la contamination seront ainsi des aspects essentiels à tenir compte lors de l'élaboration du procédé de fabrication, car ce laboratoire universitaire est utilisé pour une multitude de projets et est en constante évolution.

Ensuite, le système microfluidique complet se veut un système portable, donc réduit en dimensions et en complexité. La tension d'alimentation des détecteurs est ainsi une contrainte importante. L'utilisation d'une haute tension nécessite un module d'alimentation plus imposant et des mesures de sécurité supplémentaires. Il serait ainsi préférable de s'en tenir à des tensions de moins de 40 V.

Il faut en outre tenir compte tout au long de la conception des contraintes de fabrication imposées par les étapes subséquentes à la fabrication du détecteur, c'est-à-dire les étapes de fabrication des circuits microfluidiques.

Les performances visées sont de l'ordre des performances offertes par les dispositifs commerciaux utilisés dans le compteur sanguin μ volumétrique:

- Densité de courant d'obscurité en polarisation inverse (-70 V) : 10 nA/cm² ou moins pour une région active de 90 mm²
- Capacité maximale de 40 pF
- Bande passante minimale de 40 MHz

1.2.3 Intégration du détecteur à la puce microfluidique

Lors de l'encapsulation de la puce, il est essentiel de maintenir les performances des dispositifs individuels (soit les détecteurs et les microcanaux) à court et à long terme. Dans l'optique du développement d'un appareil portable, la résistance mécanique, l'ergonomie ainsi que la simplicité sont également des critères généraux à respecter.

Les performances visées au niveau du prototype complet sont également de l'ordre des performances offertes par les dispositifs commerciaux utilisés dans le compteur sanguin μ volumétrique, c'est-à-dire une détection fonctionnelle de l'activité radioactive et un spectre d'absorption similaire pour le radioisotope le plus couramment utilisé (¹⁸F).

1.3 Structure du mémoire

Le deuxième chapitre du mémoire établit le cadre de référence technique relié au choix du type de détecteur, ainsi qu'au circuit de traitement électronique nécessaire pour en faire l'utilisation. Il aborde également brièvement les notions de base reliées au bruit électronique.

Le troisième chapitre est consacré à la conception et à la fabrication du dispositif de détection. Les divers éléments théoriques, l'état de la l'art, ainsi que le choix des paramètres structuraux, du procédé de fabrication et des géométries pour la réalisation de la première itération, y sont présentés.

Le quatrième chapitre est dédié à l'analyse des performances électriques des détecteurs fabriqués. Il aborde notamment les résultats de la première itération, l'analyse des problèmes rencontrés, les modifications à la conception et, finalement, les résultats obtenus lors de la deuxième itération.

Le cinquième chapitre rapporte les efforts effectués au niveau de l'intégration des détecteurs à la puce microfluidique. Il énonce notamment le procédé d'encapsulation développé, les résultats de la caractérisation électrique et les performances finales du prototype en détection de radiations nucléaires.

CHAPITRE 2 - ÉTAT DE L'ART ET CADRE DE RÉFÉRENCE

Ce chapitre a pour objectif de décrire la technologie retenue pour réaliser le détecteur et de situer le projet de recherche dans un contexte technique global. Il débute avec le choix de la méthode de détection, ce qui comprend le cadre de référence et le processus de décision menant à la technologie retenue pour réaliser le détecteur. Il enchaîne ensuite avec une description du circuit de traitement de signal nécessaire à la détection de radiation nucléaire. Il se termine par une introduction à la notion de bruit électronique dans les dispositifs électroniques en général et plus particulièrement dans un détecteur.

2.1 Choix de la méthode de détection

Cette section décrit les caractéristiques principales du rayonnement à détecter, les diverses méthodes de détection existantes dans la littérature, ainsi que la technologie retenue.

2.1.1 Caractéristiques du rayonnement à détecter

Le système microfluidique est destiné à être utilisé avec des radiotraceurs émetteurs de positrons, mais également d'électrons. Ces deux types de particules chargées sont émis de manière différente, mais peuvent être détectés de la même façon.

Positron

L'émission de positrons provient de la désintégration nucléaire de radioisotopes qui présentent un excès de protons [Cherry et al., 2003]. Ces nucléides instables, en se désintégrant, transforment un proton en neutron dans leur noyau. Ce phénomène s'accompagne de l'émission d'un positron (β^+) et d'un neutrino (ν), tel qu'exprimé par l'Équation 2.1.



Le neutrino est une particule sans charge électrique, dont la masse est très faible, donc difficile à détecter. Le positron est l'antiparticule de l'électron : il a la même masse et la même charge (mais de signe opposé). L'énergie produite en surplus par la réaction nucléaire est répartie

aléatoirement entre le positron et le neutrino sous forme d'énergie cinétique. L'énergie transportée par les positrons n'est donc pas fixe et se retrouve sous la forme d'un spectre continu entre 0 et une valeur maximale E_{β}^{max} . Cette valeur maximale varie en fonction du radioisotope d'origine. Le spectre d'émission théorique de plusieurs isotopes apparaît à la Figure 2.1.

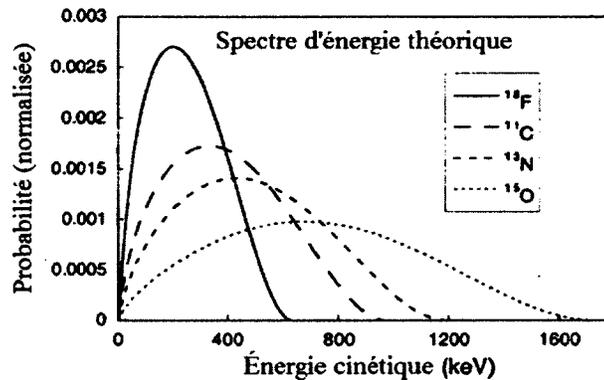


Figure 2.1 : Spectres théoriques normalisés de l'énergie cinétique des positrons provenant des émissions radioactives du ^{18}F , ^{11}C , ^{13}N et ^{15}O .
(Adapté de [Levin et al., 1999])

Le positron, une fois éjecté du noyau, diffuse à travers la matière environnante et interagit de trois manières différentes avec elle. En effet, une particule chargée qui passe près d'un atome exerce des forces électrostatiques qu'on nomme forces de Coulomb sur les électrons en orbite. Ces forces peuvent être suffisantes pour séparer un électron de l'atome et donc l'ioniser. Une paire ionique est alors produite, composée d'un électron et d'un atome ou d'une molécule chargée positivement. La particule chargée a perdu une partie de son énergie à surmonter l'énergie de liaison de l'électron et à fournir de l'énergie cinétique à l'électron. Dans le cas où la particule ne passe pas suffisamment près de l'atome, les forces ne sont alors pas suffisantes à ioniser l'atome et elles peuvent simplement exciter l'électron sans provoquer d'ionisation. L'énergie perdue par la particule est moindre dans ce cas. Finalement, il est possible qu'une particule chargée traverse le nuage électronique et interagisse plutôt avec le noyau, mais ce type d'interaction, appelée Bremsstrahlung, survient généralement avec des particules chargées de masse plus importante que les positrons.

D'une manière ou d'une autre, un positron perd peu à peu son énergie cinétique en traversant la matière environnante. Il décélère jusqu'à s'immobiliser. Le positron s'annihile alors avec un

électron environnant et émet deux photons de 511 keV dans des directions opposées (180 °). Le parcours moyen réalisé par le positron dépend de plusieurs facteurs, tels que l'énergie de départ et la capacité d'absorption du matériau à travers lequel il se déplace.

Électron

En plus de la désintégration par β^+ , il existe d'autres modes de désintégration radioactive. Certains radioisotopes émettent des rayons gamma suite à la désexcitation du noyau. Aussi, dans une proportion définie pour chacun de ces radioisotopes, il arrive que l'émission de gamma soit remplacée par une conversion interne. Ceci consiste au transfert de l'énergie en surplus du noyau à un électron orbital, en quantité suffisante pour l'expulser de l'atome. L'électron éjecté est appelé électron de conversion. Contrairement au positron, l'électron de conversion transporte une quantité d'énergie fixe correspondant à la différence entre l'énergie du rayon gamma qui est normalement émise par le radioisotope et l'énergie de liaison qui le retenait à une orbitale. Par exemple, le Technétium 99m (^{99m}Tc), utilisé en TEM, émet un rayonnement gamma caractéristique à 141 keV dans 88 % des cas et des électrons de conversion de 120 keV dans 12 % des cas.

2.1.2 Méthodes de détection de particules chargées

Il existe plusieurs méthodes pour détecter des particules chargées comme les positrons et les électrons [Cherry et al., 2003]. Dans cette section seront brièvement rapportés les catégories globales de détecteurs et leurs avantages/inconvénients respectifs.

Détecteurs à gaz

Une première méthode de détection consiste à utiliser des détecteurs à gaz. Leur principe global est simple. Deux électrodes sont placées dans un volume de gaz normalement non conducteur. Les particules chargées passant à travers le gaz ionisent les atomes. En appliquant une différence de potentiel entre les deux électrodes, les électrons libérés sont attirés vers l'anode et les ions vers la cathode, causant momentanément une faible impulsion de courant électrique. Ce principe est exposé à la Figure 2.2. Plusieurs types de détecteurs ont été développés autour de ce principe (chambres ionisantes, compteurs proportionnels, compteurs Geiger-Müller, etc.). L'efficacité de ces détecteurs est cependant limitée par leur faible

pouvoir absorbant, en particulier pour des rayonnements X et γ . Ils sont donc généralement utilisés pour des applications où la résolution n'est pas critique telle que la protection contre les radiations.

L'intégration avec des microcanaux fluidiques fabriqués en salle blanche avec ce type de détecteur comporte des complications. De plus, la résolution en énergie n'est pas optimale.

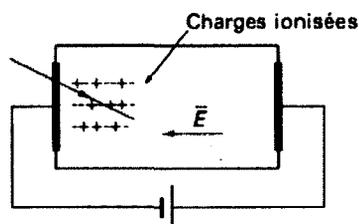


Figure 2.2 : Principe de fonctionnement de la détection directe par ionisation dans un détecteur à gaz. (Tiré de [Pochet, 2005])

Détecteurs à semiconducteur

Il est possible de remplacer le gaz par un matériau semiconducteur afin de capter l'énergie des particules. Ces matériaux sont beaucoup plus denses que les gaz et ont donc un meilleur pouvoir stoppant. Ils produisent également un signal électrique dix fois plus important que celui produit par les détecteurs à gaz. Dès les premières démonstrations, l'intérêt s'est rapidement multiplié pour ce type de capteurs, car leur fabrication et leur intégration à un circuit de traitement électronique sont facilitées par les méthodes de microfabrication développées sur semiconducteur. On les retrouve maintenant dans plusieurs domaines tels que la dosimétrie, les analyses non invasives et la radiologie numérique [Nam et al., 2006]. Leurs désavantages se situent au niveau du bruit électronique. En effet, ils fonctionnent un peu différemment des gaz, car leur structure énergétique est différente [Pochet, 2005]. La Figure 2.3 compare la structure énergétique d'un gaz (a) et d'un semiconducteur (b).

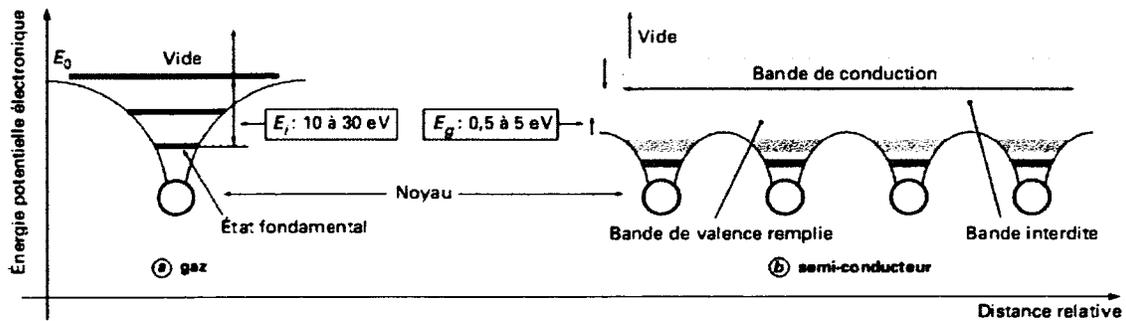


Figure 2.3 : Structures énergétiques dans le cas d'un gaz (a) et d'un semiconducteur (b).
(Tiré de [Pochet, 2005])

Dans le cas d'un gaz, à la température ambiante, aucun électron ne peut accéder au vide (c'est-à-dire l'état permettant la migration de charges libres), étant séparé par le niveau d'énergie E_i . L'énergie fournie par la radiation incidente seule permet de surmonter cette barrière. Dans le cas d'un semiconducteur, la faible distance interatomique provoque l'apparition de bandes d'énergie. À température nulle, les électrons sont entièrement confinés à la bande de valence, rendant impossible la conduction de charge. Cependant, à température non nulle, l'excitation thermique permet à une quantité N d'électrons de se rendre dans la bande de conduction selon la loi suivante :

$$N \propto e^{-E_g/2kT} \quad (2.2)$$

où E_g représente le niveau d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction (eV), soit la bande interdite, et kT est égal à 25 meV (à 300 K). Les électrons qui surmontent cette barrière pour atteindre la bande de conduction peuvent ensuite se déplacer librement. Ils laissent derrière eux une vacance dans la bande de valence, correspondant à une charge positive. Puisque celle-ci peut être comblée par un électron de valence voisin, laissant à nouveau une vacance derrière, elle correspond à une charge libre positive qu'on appelle trou. La quantité intrinsèque de charges libres dans un semiconducteur est ainsi dépendante de la température et de l'énergie E_g de la bande interdite (celle-ci varie selon le matériau).

Le problème avec les porteurs libres présents dans un semiconducteur est qu'ils engendrent un courant non négligeable lorsque le semiconducteur est polarisé. Ce niveau de bruit intrinsèque est indésirable et doit demeurer faible pour être en mesure de détecter le signal provenant du rayonnement nucléaire. Ceci limite le choix du matériau, de l'épaisseur et de la température à

laquelle sont opérés les détecteurs en semiconducteur. En résumé, les détecteurs en semiconducteur sont utiles lorsque la résolution en énergie est critique, car le niveau de signal généré est grand, comparativement à celui généré par les détecteurs à gaz et lorsque les dimensions du détecteur peuvent être petites, car le niveau de bruit intrinsèque est élevé.

Le silicium et le germanium sont les semiconducteurs les plus souvent utilisés, mais plusieurs travaux ont porté récemment sur d'autres matériaux tels que le CdTe et le CdZnTe qui permettent d'éviter le problème de bruit à température ambiante. Seulement, ces derniers matériaux demeurent pour le moment très coûteux et beaucoup moins connus que le silicium.

Les matériaux de type semiconducteur sont utilisés majoritairement dans le domaine de la microfabrication et sont donc facilement compatibles avec la fabrication des microcanaux fluidiques.

Scintillateurs

Une autre méthode de détection possible est d'utiliser des matériaux, appelés scintillateurs, qui émettent de la lumière lorsqu'ils sont traversés par un rayonnement à haute énergie [Pochet, 2005]. Un photodétecteur sensible à la lumière (tube photomultiplicateur ou PMT, photodiode, dispositif à transfert de charge, etc.) transforme ensuite la lumière captée en signal électrique. Ce type de détection est indirect, contrairement aux catégories énoncées précédemment. Les PMT ont l'avantage de fournir un très haut gain (10^6 à 10^7), mais sont relativement encombrants. Les photodiodes peuvent être fabriquées en plus petit format, mais sont pourvues d'un gain plus faible que les PMT (10^2 à 10^3 pour les photodiodes avalanche) et nécessitent un traitement électronique faible bruit plus critique, car elles sont fabriquées en semiconducteur. En somme, l'utilisation d'un scintillateur requiert un système complexe de détection où il est nécessaire de coupler le scintillateur à un second détecteur.

2.1.3 Technologie retenue

Dans notre cas, comme il a été mentionné dans la problématique, il est beaucoup plus avantageux d'employer directement un matériau semiconducteur afin de capter les émissions radioactives, puisqu'il est ainsi possible d'utiliser le substrat des canaux microfluidiques pour

réaliser le détecteur. Cette contrainte élimine la possibilité d'utiliser détecteur à gaz ou un scintillateur. Au niveau des semiconducteurs, il existe des structures qui n'ont pas été présentées jusqu'à maintenant et qui permettent de pallier au problème de densité de charges libres intrinsèques trop élevée à température ambiante. Il s'agit des jonctions PN ou diodes. Ces dernières comportent une barrière de potentiel intrinsèque, ajustable avec la polarisation qu'on applique à la jonction. Ceci permet de diminuer le niveau de bruit intrinsèque dans le semiconducteur et donc d'augmenter le rapport signal sur bruit obtenu du détecteur.

Jonction PN

Le fonctionnement physique d'une diode se décrit comme suit [Streetman, 2005]. Une jonction PN est une zone de matériau semiconducteur dopée p en contact avec une zone dopée n. Le dopage consiste à introduire des atomes d'un autre élément dans un semiconducteur afin qu'il contienne une majorité de porteurs d'un type en particulier, soit des électrons (zone n), soit des trous (zone p). Un contact électrique est fait à chaque zone, appelé anode pour la zone p et cathode pour la zone n. Une jonction PN est schématisée à la Figure 2.4.



Figure 2.4 : Jonction PN.
(Tiré de [Wikipedia contributors, 2011])

Lorsqu'un matériau de type n est en contact avec un matériau de type p, les électrons, majoritaires dans la zone n, vont diffuser vers une zone de moindre concentration, la zone p (inversement pour les trous). Ce processus crée un flux net de charges, nommé courant de diffusion. Les porteurs se recombinent rapidement de l'autre côté et laissent des ions fixes de chaque côté de la jonction. Ainsi, des zones chargées, dépourvues de porteurs libres, apparaissent de chaque côté de la jonction et, rassemblées, se nomment la zone de déplétion. La différence de potentiel créée à la jonction va progressivement limiter la diffusion des charges. Ce processus apparaît à la Figure 2.5.

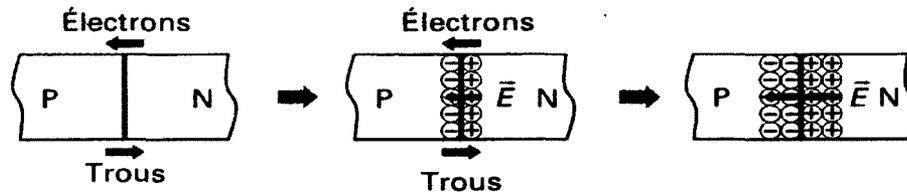


Figure 2.5 : Diffusion des porteurs et création d'un champ électrique à l'interface.
(Tiré de [Pochet, 2005])

Les porteurs minoritaires (générés thermiquement) qui sont créés assez près de la jonction sont attirés par le champ électrique et sont ensuite balayés de chaque côté. Le courant généré, appelé courant de dérive, est estimé indépendant du potentiel présent à la jonction, car il est limité par un très faible nombre de porteurs. En équilibre (soit sans polarisation extérieure), le courant de dérive est égal au courant de diffusion et de sens inverse, il n'y a donc pas de courant net qui circule dans la jonction.

Polarisation de la jonction PN

Lorsqu'on polarise en direct (soit un potentiel positif appliqué à l'anode par rapport à la cathode), la barrière de potentiel est abaissée et les porteurs peuvent librement traverser la zone chargée. La quantité de courant traversant la diode est alors dirigée par le circuit externe, et ce, tant que la puissance maximale supportée par le dispositif est respectée.

En polarisant la diode en inverse (tension positive à la cathode par rapport à l'anode), le potentiel électrique du côté p est diminué par rapport au côté n, augmentant ainsi la barrière de potentiel et, du coup, la largeur de la zone de déplétion. La diffusion des porteurs majoritaires est limitée par ce potentiel de contact, jusqu'à devenir négligeable. Le courant de dérive devient peu à peu le seul courant circulant dans la diode. Puisque celui-ci est considéré indépendant de la polarisation, le courant traversant la diode en inverse devient constant. Ce courant de porteurs minoritaires inverse est une caractéristique intrinsèque d'une jonction PN et souvent appelé courant de fuite.

La courbe idéale du courant en fonction de la polarisation dans une jonction PN apparaît à la Figure 2.6.

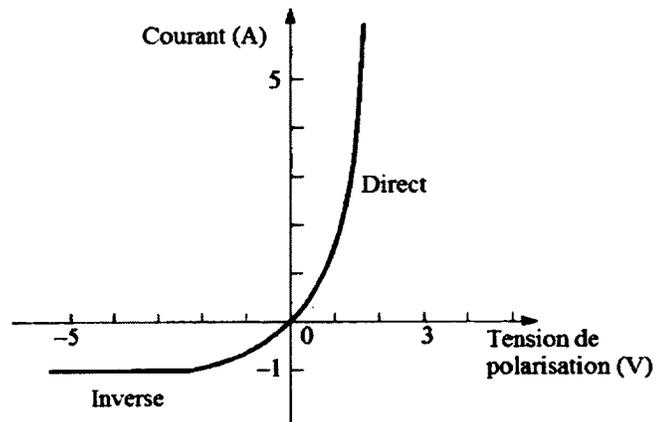


Figure 2.6 : Courbe idéale du courant en fonction de la tension de polarisation dans une jonction PN.
(Adapté de [Sze, 2006])

Photodiode

Une photodiode est une jonction PN qu'on polarise en inverse dans le but d'obtenir un courant proportionnel à l'intensité de la radiation incidente. En effet, lorsque des particules énergétiques traversent un semiconducteur, elles transfèrent leur énergie aux atomes environnants et créent des paires électron-trou. Dans une jonction PN, lorsque des nouveaux porteurs sont créés à l'intérieur ou suffisamment près de la zone de déplétion, ils sont balayés par le champ électrique de chaque côté de la jonction et collectés par les électrodes. Ce nouveau courant est indépendant du voltage de polarisation inverse, mais proportionnel à la radiation incidente. Cet effet est visible sur la courbe idéale du courant en fonction de la polarisation et de la quantité de radiation incidente à la Figure 2.7. En mesurant le courant généré, on obtient une mesure de la quantité de rayonnement sur le détecteur, pourvu que le courant de fuite en inverse demeure négligeable. Le courant de fuite est appelé courant d'obscurité, car c'est le niveau de courant circulant dans la diode lorsque la jonction est complètement isolée de la lumière ou de tout autre type de radiations. Les photodiodes peuvent être sensibles à plusieurs types de radiations, électromagnétique (photon), particulaire (positrons, électrons, etc.).

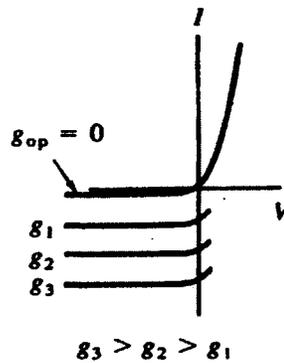


Figure 2.7 : Courant en fonction de la polarisation dans une diode, avec différents taux de génération optique (g_{op}). (Tiré de [Streetman, 2005])

Photodiode avalanche

Il est possible de concevoir la photodiode de manière à provoquer un processus physique nommé avalanche. En présence d'un champ électrique particulièrement élevé dans la zone de déplétion, les paires électron-trou créées au passage des particules énergétiques gagnent beaucoup d'énergie cinétique. Les nouveaux porteurs libérés peuvent ainsi, à leur tour, avoir encore suffisamment d'énergie pour ioniser un second atome et ainsi de suite. Ce processus se déroule à la manière d'une avalanche. Ainsi, lorsqu'une photodiode est opérée dans ce mode, il est possible d'obtenir un gain beaucoup plus grand, quant au ratio de porteurs générés par rapport à l'intensité de la radiation incidente. Cette caractéristique est très intéressante afin d'obtenir un meilleur ratio signal sur bruit. Cependant, pour obtenir un gain important et constant, les photodiodes avalanche doivent être fortement polarisées et la tension de polarisation de la diode doit être très stable (puisque en avalanche, le gain varie très fortement en fonction de la tension). Également, le design de ce type de structure est plus complexe que le design d'une photodiode opérée dans la zone stable du courant en inverse.

Photodiode PIN

Dans le cas de positrons ou d'électrons de conversion, les particules sont très énergétiques et parcourent une distance beaucoup plus grande dans un semiconducteur que des photons visibles. Par exemple, une partie du spectre émis par le ^{18}F est suffisamment énergétique pour traverser la totalité d'une tranche de silicium de $300\ \mu\text{m}$ sans s'annihiler avec un électron. L'épaisseur de la zone de détection devient ici importante. Les jonctions PIN utilisent une zone intrinsèque (en pratique, de haute résistivité), la zone I, insérée entre des zones fortement

dopées N et P, afin d'augmenter l'épaisseur de la zone de déplétion. Ceci permet de collecter les charges générées sur une plus grande épaisseur du détecteur. Ce type de structure est schématisé à la Figure 2.8. Par exemple, une zone P+ et une zone N de haute résistivité sont utilisées pour former la jonction PN. Une zone N+ est alors utilisée à l'arrière de la gaufre, pour permettre de faire un meilleur contact électrique avec la zone I. Cette zone fortement dopée permet également de créer une zone de blocage de contact afin de diminuer le courant de fuite généré par les porteurs minoritaires [Knoll, 1999].

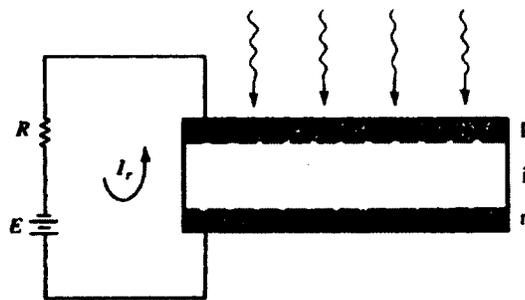


Figure 2.8 : Photodiode à jonction PIN.
(Tiré de [Streetman, 2005])

La photodiode PIN a comme avantage de nécessiter une tension de polarisation relativement faible en inverse (pouvant être entre 0 V et 100 V). Cependant, ce type de photodiode n'a pas de mécanisme de gain interne comme les photodiodes avalanche ou les tubes photomultiplicateurs.

Comme il a été mentionné dans l'introduction, le CS μ utilise des photodiodes PIN commerciales. Cette technologie a ainsi été éprouvée pour le type d'applications que vise la nouvelle puce microfluidique.

En conclusion, la structure PIN est adaptée à la détection de particules énergétiques, telles que les positrons ou les électrons de conversion, sur un système portable. De plus, ce type de détecteur est fabriqué à partir d'un matériau semiconducteur, rendant l'intégration au système microfluidique possible. Également, la photodiode PIN permet théoriquement de répondre à toutes les contraintes de conception détaillées à la section **1.2.1 Conception et fabrication**

d'un détecteur. Pour ces raisons, la structure PIN a été choisie pour répondre à la présente problématique.

2.2 Circuit de traitement de signal

Afin de réaliser la caractérisation des prototypes intégrés à la puce microfluidique, un circuit électronique de traitement de signal adapté à la détection de radiations nucléaires est nécessaire. Cette section décrit brièvement les modes de détection possibles, ainsi que l'instrumentation utilisée afin de réaliser ce type de traitement de signal.

2.2.1 Modes de détection de radiation nucléaire

Comme il fût expliqué précédemment, une particule chargée, en traversant un matériau comme un gaz ou un semiconducteur polarisé (semiconducteur simple ou jonction PN), génère une courte impulsion de courant aux électrodes. Avec ce type de radiation, il existe deux grands modes de détection : mode impulsionnel et mode courant [Pochet, 2005]. Ces deux modes sont schématisés à la Figure 2.9.

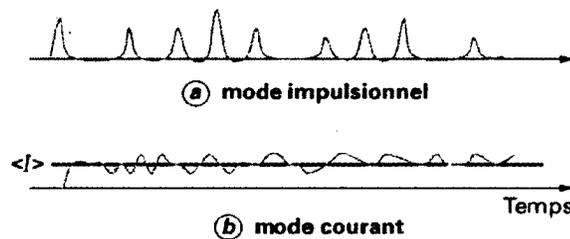


Figure 2.9 : Modes de détection de radiations nucléaires.
(Tiré de [Pochet, 2005])

Mode impulsionnel : un détecteur assez rapide sera en mesure de générer des impulsions brèves (typiquement quelques nanosecondes) qu'il sera possible de traiter individuellement.

Mode courant : dans le cas d'un détecteur plus lent ou soumis à une activité importante, les impulsions se chevauchent, engendrant un courant lentement variable.

Le mode courant est intéressant lorsqu'on désire une mesure moyenne du flux d'émissions radioactives dans le temps. Dans l'optique d'une mesure réalisée sur une courte période, telle

que la mesure de la fonction d'entrée d'un radiotraceur, il faut pouvoir opérer en mode impulsionnel. Ceci implique d'avoir un détecteur et une électronique suffisamment rapides pour empêcher le chevauchement des pulses. Dans le cas du CS μ , les taux de comptage typiques sont de l'ordre de 100 à 10 000 CPS [Convert, 2006]. Avec la nouvelle puce microfluidique, l'efficacité de détection devrait augmenter et les taux de comptage pourraient atteindre 20 000 CPS [Convert, 2007].

Il est également possible de faire une analyse en énergie des émissions radioactives à partir de l'amplitude des pulses mesurés, lorsque le pulse de courant généré par le détecteur choisi est proportionnel à l'énergie incidente recueillie, ce qui n'est pas nécessairement le cas. Pour une application de comptage, comme dans le cas du compteur μ volumétrique et de la puce microfluidique, cette analyse n'est pas nécessaire. Dans ce cas, l'amplitude des pulses doit seulement être supérieure au niveau de bruit de fond engendré par le détecteur et l'électronique subséquente afin d'être mesurable.

2.2.2 Instrumentation pour système de détection de radiation nucléaire

La plupart des systèmes de détection de radiation nucléaire incluent les mêmes composants électroniques de base, représentés à la Figure 2.10. Les radiations sont absorbées par un détecteur et converties en signal électrique. Pour être utilisable, ce signal doit être amplifié, mis en forme et numérisé afin d'être finalement stocké et analysé. En particulier, les détecteurs en semiconducteur produisent un très faible niveau de signal (encore plus critique avec les photodiodes PIN qui n'ont pas de mécanisme de gain interne) et nécessitent un circuit d'amplification d'un gain de l'ordre de 1000 à 10000. Avec un gain aussi élevé, il est essentiel de minimiser l'introduction de bruit électronique avant l'étage d'amplification et d'utiliser des composants de type faible bruit. Ceci n'étant pas suffisant, une attention particulière doit aussi être apportée au circuit complet de traitement électronique afin d'optimiser le rapport signal sur bruit [Spieler, 2005].

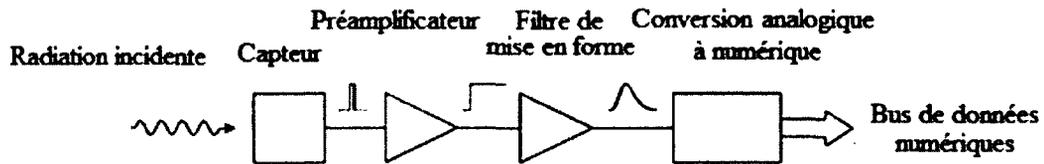


Figure 2.10 : Composants de base dans une chaîne de détection de radiation nucléaire.
(Adapté de [Spieler, 2005])

Capteur

Le signal provenant d'un détecteur est typiquement une impulsion de courant électrique de relativement faible durée. Le voltage présent aux bornes d'un détecteur $V_{entrée}$ (V) est donné par le ratio de la charge générée Q (C) et de la capacité équivalente à l'entrée du circuit (incluant la capacité intrinsèque au détecteur) $C_{entrée}$ (F). Ce ratio est représenté à l'Équation (2.3).

$$V_{entrée} = \frac{Q}{C_{entrée}} \quad (2.3)$$

Il existe deux manières de coupler le capteur au préamplificateur. Ces modes de couplage apparaissent à la Figure 2.11. Le couplage DC correspond à brancher un contact du détecteur à l'entrée du préamplificateur et l'autre à la polarisation. Le préamplificateur doit alors fournir le courant total nécessité par le détecteur (signal utile + courant de fuite). Le courant de fuite du détecteur génère ainsi une tension DC non négligeable à la sortie du préamplificateur. Le couplage AC permet d'éliminer ce problème. Dans ce cas, le détecteur est relié au préamplificateur par une capacité de couplage. Un circuit de polarisation parallèle fournit au détecteur le courant nécessaire à travers une résistance de polarisation choisie.

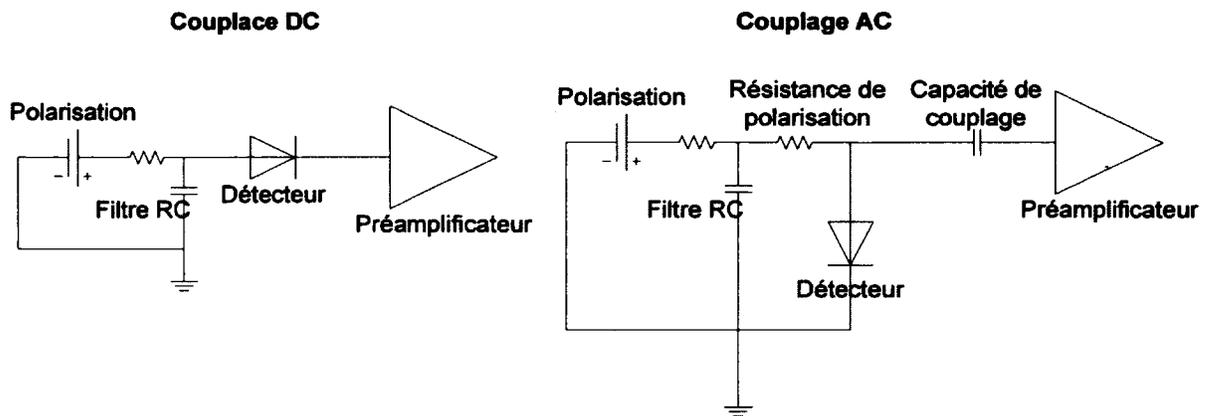


Figure 2.11 : Mode de couplage du détecteur au préamplificateur.
(Adapté de [Spieler, 2005])

Préamplificateur

Le préamplificateur est responsable d'amplifier le signal très faible provenant du détecteur et de réaliser une première mise en forme du signal. Il existe deux configurations de préamplificateurs utilisés avec les détecteurs de radiation : les transimpédances et les amplificateurs de charge [Cherry et al., 2003]. Les circuits électroniques simplifiés correspondant à ces deux types d'amplificateur apparaissent à la Figure 2.12.

L'amplificateur transimpédance amplifie la différence de potentiel présente à l'entrée du circuit, soit aux bornes du détecteur. Le désavantage de cette configuration réside dans le fait que cette tension est proportionnelle à la capacité à l'entrée, incluant la capacité du détecteur. La capacité du détecteur varie généralement en fonction de sa tension de polarisation. Le gain du système est ainsi lié à la stabilité de la tension de polarisation et peut faire varier la relation de proportionnalité entre l'intensité du rayonnement et l'amplitude du signal mesuré. L'amplificateur de charge utilise, pour sa part, une rétroaction avec une capacité C_f (F) afin d'intégrer la charge provenant du détecteur Q (C). Ce dernier est préféré, car le voltage en sortie V_o (V) est alors indépendant de la capacité d'entrée du détecteur.

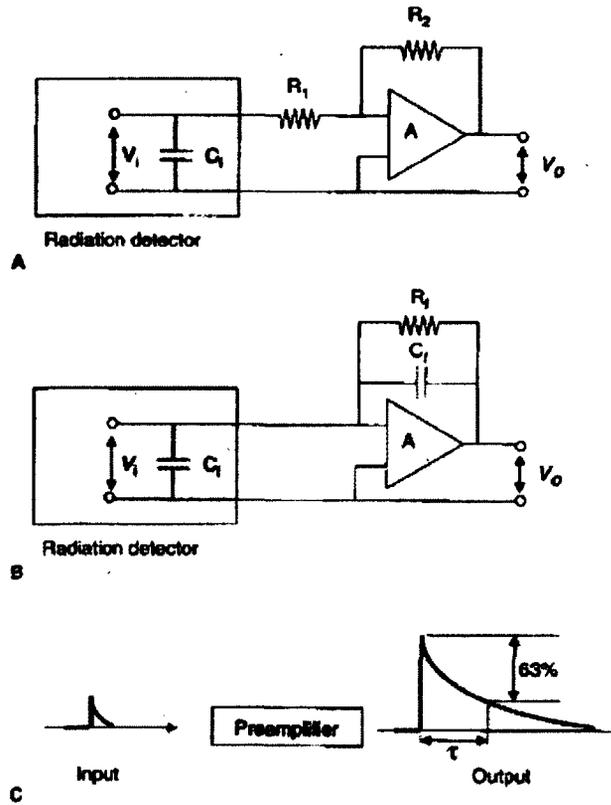


Figure 2.12 : Circuit électronique simplifié d'un amplificateur de tension (A) et d'un amplificateur transimpédance (B). Forme typique des signaux d'entrée et de sortie d'un amplificateur (C).
(Tiré de [Cherry et al., 2003])

L'Équation 2.4 décrit la conversion charge-tension réalisée par un amplificateur de charge.

$$V_o = -\frac{q}{C_f} \quad (2.4)$$

La charge accumulée par C_f sera déchargée à travers une résistance R_f (Ω), provoquant la diminution exponentielle de la tension à la sortie $V(V)$ en fonction du temps $t(s)$, exprimée mathématiquement par l'Équation 2.5.

$$V(t) = V_o e^{-t/\tau}, \text{ où } \tau = R_f C_f \quad (2.5)$$

La résistance R_f permet ainsi de limiter la durée d'intégration du système et d'éviter la création d'un décalage dans le signal de sortie menant à la saturation de l'amplificateur (*pile up*).

Également, afin d'obtenir les meilleurs résultats en ce qui a trait au rapport signal sur bruit, le préamplificateur doit être physiquement situé le plus près possible du détecteur. Ceci permet de minimiser les capacités parasites qui génèrent du bruit électronique additionnel.

Filtre de mise en forme

Le filtre qui suit le préamplificateur a pour objectif d'amplifier le signal (qui est généralement encore trop faible, typiquement de l'ordre du millivolt) et d'effectuer une seconde mise en forme du pulse [Cherry et al., 2003]. Une fonction additionnelle de ce filtre est qu'il élimine une partie du bruit électronique et permet ainsi d'augmenter le rapport signal sur bruit. Quand le préamplificateur constitue un intégrateur (comme dans le cas d'un amplificateur de charge), le pulse en sortie a une longue descente qui peut mener au chevauchement des pulses (perte de l'information sur l'amplitude ou perte de pulses complets). La mise en forme a ainsi pour première fonction de réduire la durée des pulses afin qu'ils ne s'empilent pas. Ceci doit être réalisé sans perdre l'information du signal, qui réside dans son amplitude (proportionnel à l'énergie radiative relative à chaque événement) et son temps de montée (indiquant le moment où l'événement s'est produit).

Plusieurs méthodes existent afin de réaliser cette mise en forme, telles que les réseaux CR-RC ou les filtres gaussiens. Afin d'illustrer une méthode de mise en forme du signal, un réseau CR-RC de base est schématisé à la Figure 2.13. Un dérivateur (filtre passe-haut CR déterminant le temps de descente du pulse), suivi d'un intégrateur (filtre passe-bas RC déterminant le temps de montée du pulse) permettent effectivement de réduire la durée du pulse initial et de filtrer le bruit électronique au-delà des fréquences de coupure déterminées par les filtres. Le choix de la constante de temps est déterminant. En effet, une constante de temps plus longue permet de conserver plus d'information sur l'amplitude du pulse et est préférée pour des applications nécessitant une résolution en énergie optimale. Une constante de temps plus courte permet de fonctionner avec de plus hauts taux de comptage et, également, d'améliorer la résolution en temps, au détriment de la résolution en énergie. De plus, la constante de temps choisie influence le rapport signal sur bruit.

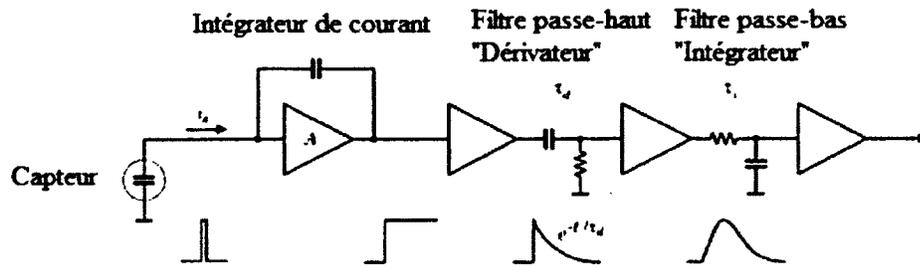


Figure 2.13 : Exemple de mise en forme du signal par un réseau CR-RC.
 (Adapté de [Spieler, 2005])

Convertisseur analogique à numérique

Suite à cette amplification et mise en forme du signal, il est possible de numériser le signal obtenu pour pouvoir le traiter numériquement.

2.3 Bruit électronique

Dans tous les dispositifs et circuits électroniques, il existe un niveau de signal parasite qu'on appelle bruit électronique. Ce niveau de bruit établit une limite inférieure au signal nécessaire pour réaliser une détection avec un système électronique. Ce type de bruit est inhérent à la majorité des composants électroniques et il est essentiel de le considérer durant la conception d'un nouveau dispositif.

Cette section comprend, d'abord, une description des phénomènes physiques créant le bruit électronique et, ensuite, un modèle permettant de localiser les sources de bruit dans un système de détection avec jonction PN.

2.3.1 Phénomènes physiques à l'origine du bruit électronique

Il existe deux mécanismes menant au bruit électronique, les fluctuations statistiques en vitesse et les fluctuations statistiques en nombre des porteurs dans un dispositif électronique [Spieler, 2005]. Plusieurs phénomènes physiques sont à l'origine de ces deux types de fluctuations.

Bruit thermique (Johnson-Nyquist)

Ce type de bruit est causé par l'agitation thermique aléatoire des électrons dans une résistance électrique à l'équilibre, c'est-à-dire indépendamment de toute tension appliquée au composant [Boër, 2002]. La fluctuation du potentiel généré aux bornes de la résistance est définie par la relation de Nyquist. Le bruit thermique peut ainsi être modélisé sous forme de courant, comme démontré à l'Équation 2.6.

$$\overline{I_T^2} = \frac{4k_b T \Delta f}{R} \quad (2.6)$$

où $\overline{I_T^2}$ (A^2) correspond à la variance du courant généré à travers le conducteur de résistance R (Ω), k_b est la constante de Boltzmann ($J/^\circ K$), T est la température ($^\circ K$) et Δf est la bande passante sur laquelle le bruit est intégré (Hz). Ce bruit est considéré blanc (énergie égale à toute fréquence étudiée). Afin de réduire son amplitude, on ne peut que diminuer la température ou la bande passante du circuit d'amplification utilisé. Ce type de bruit est modélisé par une source de courant en parallèle avec une résistance idéale [Sze et al., 2006].

Dans le cas d'une photodiode, le bruit thermique provient de la résistance caractéristique en parallèle de la jonction PN (*shunt resistance*), ainsi que de la résistance série associée à la résistance de contact entre la jonction et le circuit électronique subséquent. [VACTEC, 1997].

Bruit de grenaille (*Shot Noise*)

Ce type de bruit se distingue du bruit thermique par le fait qu'il apparaît lorsqu'une tension est appliquée et qu'un courant circule [Sze et al., 2006]. Le bruit de grenaille est causé par les fluctuations statistiques aléatoires du nombre de porteurs en fonction du temps dans un courant donné. Ces fluctuations proviennent de la caractéristique même des porteurs d'apparaître sous forme d'éléments discrets.

Le bruit de grenaille est représenté à l'Équation 2.7.

$$\overline{(\Delta I_s)^2} = 2qI\Delta f \quad (2.7)$$

où $\overline{(\Delta I_s)^2}$ correspond à la variance du courant (A^2), q est la charge élémentaire de l'électron ($1,6.10^{19}$ C), I est le courant moyen traversant le conducteur (A) et Δf à la bande passante sur laquelle le bruit est étudié (Hz). Ce bruit est aussi considéré blanc (amplitude égale à toute fréquence étudiée). Ce type de bruit est modélisé par une source de courant en parallèle du composant étudié.

Dans le cas d'une photodiode, le bruit de grenaille provient des fluctuations du courant DC total qui la traverse. Il est ainsi proportionnel au courant d'obscurité et n'est significatif que lorsque le signal à détecter est faible ou lorsque le courant d'obscurité du détecteur est élevé [VACTEC, 1997].

Bruit de scintillation $1/f$ (Flicker Noise)

Contrairement aux types de bruit cités précédemment, qui apparaissent approximativement sur toutes les fréquences, le spectre en puissance du bruit de scintillation est inversement proportionnel à la fréquence et constitue ainsi un bruit nuisible en basse fréquence. Dans les dispositifs en semiconducteur, il est parfois attribuable aux effets de surface [Sze et al., 2006], mais également aux effets à l'interface de deux matériaux et à l'inhomogénéité des matériaux (présences d'impuretés ou autres défauts) [Drakos, 1997].

Dans le cas d'une photodiode, des résultats expérimentaux ont permis d'extraire une relation entre le bruit de scintillation et le courant DC qui la traverse, exprimée par l'Équation 2.8 [VACTEC, 1997].

$$\overline{(\Delta I_F)^2} = \frac{K \cdot I_{DC}}{\Delta f} \quad (2.8)$$

où $\overline{(\Delta I_F)^2}$ correspond à la variance du courant (A^2), K est une constante dépendante du type de matériel et de la géométrie du détecteur, I_{DC} est le courant DC moyen traversant le conducteur (A) et Δf est la bande passante sur laquelle le bruit est étudié (Hz). La constante K ne peut qu'être déterminée empiriquement et peut varier grandement en fonction du dispositif. Ce type

de bruit peut ainsi dominer lorsque la bande de fréquence d'intérêt se trouve dans les basses fréquences (typiquement en bas de 1 KHz).

Conclusion

Afin de réduire le bruit électronique provenant d'une photodiode, il est ainsi nécessaire de minimiser la résistance de la jonction PN, la résistance de contact et le courant d'obscurité provenant de celle-ci. Également, il est essentiel de minimiser la quantité d'impuretés et de défauts à la surface et aux interfaces du dispositif.

2.3.2 Modélisation des sources de bruit dans un système de détection avec diode

Il est possible de représenter un système de détection et les sources de bruit présentes sous forme de circuit électronique. La Figure 2.14 représente le circuit équivalent d'un système de détection avec photodiode.

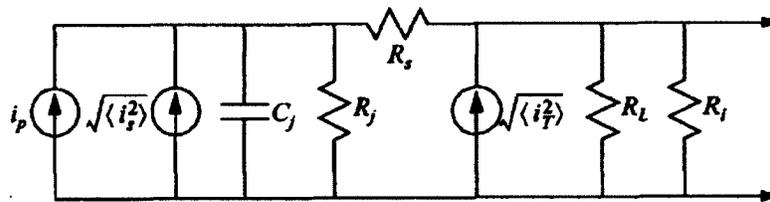


Figure 2.14 : Circuit équivalent à l'analyse du bruit dans une photodiode. Il est à noter que le bruit de scintillation n'est pas représenté dans le schéma précédent. (Tiré de [Sze et al., 2006])

i_p représente le photocourant généré par la photodiode. C_j et R_j correspondent respectivement à la capacité et à la résistance de la jonction PN (ou *shunt resistance*). R_s est la résistance en série associée à la résistance de contact entre la jonction et le circuit électronique subséquent. R_L et R_i sont les résistances associées respectivement à la charge et à la résistance d'entrée de l'amplificateur du circuit électronique subséquent. Les sources de bruit thermique et de grenaille sont respectivement représentées par $\sqrt{\langle i_T^2 \rangle}$ et $\sqrt{\langle i_S^2 \rangle}$. Toutes les résistances présentes dans le circuit contribuent au bruit thermique.

2.4 Conclusion

Ce chapitre a décrit la méthode de détection retenue, ainsi que les notions techniques de base reliées au présent projet de recherche.

La première section de ce chapitre était consacrée à la méthode de détection. Afin de situer ce choix dans un contexte technique global, les caractéristiques principales du rayonnement à détecter ont d'abord été énoncées. Il s'agit d'un rayonnement produit par désintégration nucléaire, soit l'émission de particules chargées, telles que les positrons et les électrons. Ensuite, différentes méthodes de détection de particules chargées ont été brièvement présentées, telles que les détecteurs à gaz, les détecteurs à semiconducteur, les scintillateurs, les photodiodes avalanche. Finalement, les photodiodes à jonction PIN ont été retenues pour réaliser le présent projet, pour des raisons de simplicité, de coût et de fonctionnalité.

La seconde section du chapitre était dédiée au circuit de traitement de signal utilisé en détection de radiations nucléaires. Les différents modes de détection, soient le mode courant et le mode impulsionnel, ont d'abord été énoncés. Les divers éléments du circuit de traitement de signal typique, tels que le capteur, le préamplificateur, le filtre de mise en forme et le convertisseur analogique à numérique, ont ensuite été brièvement décrits.

La troisième et dernière section du chapitre était réservée à l'introduction à la notion de bruit électronique. Les trois principales catégories de bruit électronique, soient le bruit thermique, le bruit de grenaille, ainsi que le bruit $1/f$, ont été détaillées. Finalement, la modélisation des sources de bruit électronique dans un système de détection avec diode a été abordée.

CHAPITRE 3 - CONCEPTION ET FABRICATION DES PHOTODIODES

Ce chapitre se concentre sur le premier objectif du projet, c'est-à-dire la réalisation du dispositif de détection et, plus particulièrement, sur les paramètres de conception et de fabrication du détecteur. La première section détaille les caractéristiques de base ainsi que les éléments théoriques clés se rapportant à la conception et à la fabrication de photodiodes. La deuxième section présente des exemples de structures et de procédés de fabrication existants dans la littérature pour des applications semblables. La troisième section décrit un procédé de fabrication de détecteur conçu et réalisé antérieurement au CRN², ainsi que les résultats alors obtenus. Finalement, la quatrième section résume les paramètres de conception choisis pour le présent projet de recherche.

3.1 Éléments de conception

Afin de déterminer les paramètres de conception des détecteurs, il est important de comprendre le fonctionnement d'une structure PIN et d'être en mesure d'en évaluer les caractéristiques voulues (sensibilité, capacité, bande passante, bruit). Également, il est essentiel de connaître les techniques de fabrication adéquates pour ce type de détecteur. Ces différents éléments sont abordés dans cette section du chapitre.

3.1.1 Structure planaire typique d'une photodiode PIN

Les méthodes de fabrication utilisées pour l'industrie de la microélectronique sont dites planaires, car elles consistent en une suite d'étapes d'addition de couches minces, de photolithographie, de gravure et de dopage réalisées sur un substrat initial. La structure planaire typique d'une photodiode apparaît en vue de coupe à la Figure 3.1. Le matériau de départ correspond à un substrat de silicium de type n. Une zone dopée p+, délimitée par une couche de passivation d'oxyde de silicium, est formée en surface afin de réaliser la jonction PN. Une zone dopée n+ est utilisée sur le dos de la tranche afin d'obtenir un bon contact électrique au substrat et de limiter les courants de fuite provenant de l'extérieur. Le substrat de silicium est plus résistif que les zones en surface et correspond alors à la zone I de la structure

PIN. Les contacts électriques aux zones p+ et n+ sont réalisés avec une couche métallique (ici en aluminium). La polarisation est appliquée à l'anode et la cathode est mise à la masse. L'anode est connectée en parallèle au circuit de traitement électronique permettant de collecter les charges générées par la photodiode.

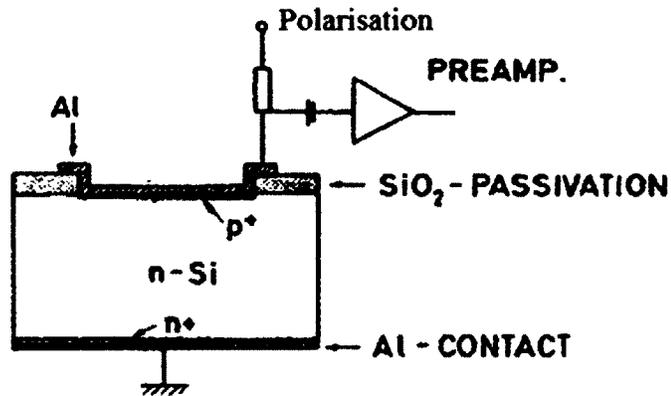


Figure 3.1 : Photodiode à structure planaire.
(Adapté de [Kemmer, 1984])

3.1.2 Sensibilité

Un détecteur doit être en mesure d'absorber le minimum du rayonnement incident requis pour fournir un pulse détectable. En détection de radiations nucléaires, l'arrêt complet des particules chargées est nécessaire dans le cas où on désire faire une analyse en énergie du pulse mesuré. Pour une application de comptage, ce n'est pas essentiel. Cependant, plus d'énergie on récupère, meilleur sera le rapport signal sur bruit. Dans le cas d'une photodiode PIN, les deux principaux aspects influençant la sensibilité sont le choix du matériau et l'épaisseur de la zone de déplétion.

Matériau du substrat

Il a déjà été mentionné que le silicium représente le matériau idéal en microfabrication, car il est très bien connu et de faible coût. Toutefois, il est nécessaire d'estimer la capacité de ce matériau à absorber l'énergie provenant des émissions des radioisotopes concernés par l'application, avant de valider le choix du matériau de base du substrat. Il est également

essentiel d'estimer sa capacité à réémettre l'énergie sous forme d'un pulse détectable par une électronique appropriée.

Absorption de l'énergie

Le pouvoir absorbant d'un matériau correspond à la perte d'énergie par unité de distance parcourue lorsqu'une particule le traverse. Ce pouvoir varie en fonction des propriétés du matériau, du type de particule et de l'énergie cinétique de la particule. On retrouve à la Figure 3.2 le pouvoir absorbant du silicium lorsqu'un électron d'une énergie donnée le traverse.

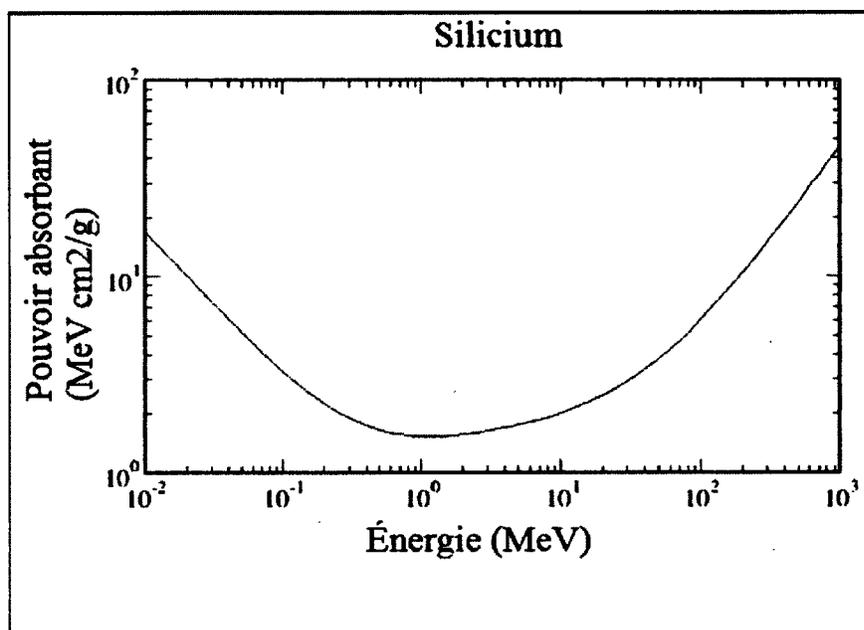


Figure 3.2 : Pouvoir absorbant du silicium en fonction de l'énergie d'un électron qui le traverse. (Adapté de [NIST, 2011])

Étant donné qu'un positron constitue une particule chargée de même masse et de même charge (mais de signe opposé) que l'électron, le pouvoir absorbant donné à la figure précédente peut également s'appliquer au positron. Selon ce graphique, pour un positron d'une énergie de 200 keV (approximativement l'énergie d'émission la plus probable associée au spectre du ¹⁸F), le pouvoir absorbant du silicium est estimé à 2,245 MeV cm²/g. En considérant la densité atomique du silicium, c'est-à-dire 2,33 g/cm³, ceci correspond à une distance parcourue d'environ 380 μm. Il est important de noter que ceci est une approximation, car la variation du pouvoir absorbant à mesure que l'électron décélère n'est pas prise en compte dans ce calcul.

Génération des charges

Comme il a été énoncé dans la section **2.1.1 Caractéristiques du rayonnement à détecter**, l'énergie dissipée par une particule traversant un substrat n'est pas entièrement utilisée pour générer des porteurs libres, car une fraction est perdue à travers des processus non ionisants (excitation simple ou interaction avec le noyau). On considère ainsi une quantité d'énergie moyenne E_m nécessaire pour créer une paire électron-trou dans le silicium (estimée à 3,62 eV), qui tient compte de l'ensemble de ces phénomènes [Pochet, 2005]. En négligeant les pertes de signal utile en recombinaison ou en piégeage, la charge maximale induite Q (C) par le passage d'une particule se calcule à partir de l'Équation 3.1 [Knoll, 1999].

$$Q = n * q = \frac{E}{E_m} * q \quad (3.1)$$

où n est le nombre de paires électron-trou générés, q est la charge élémentaire de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C) et E est l'énergie déposée par la particule (eV). Par exemple, pour un positron de 200 keV, qui perd environ 160 keV à travers 300 μm de silicium (calculé à partir des valeurs fournies par le graphique de la Figure 3.2), la charge induite sera de l'ordre de $8,8 \cdot 10^{-15}$ C (55000 électrons). En comparaison, un préamplificateur de charge pour détection de radiations nucléaire de marque Cremat (modèle CR-110) génère un bruit RMS de l'ordre de $3 \cdot 10^{-17}$ C (200 électrons). Le niveau de signal généré serait ici approximativement deux ordres de grandeur plus élevés que le niveau de bruit électronique du composant immédiat et donc détectable.

Temps de vie des porteurs

Dans le calcul précédent, les phénomènes de recombinaison ou de piégeage ont été négligés. Cependant, lorsqu'on évalue la capacité d'un matériau à réémettre l'énergie générée, le temps de vie des porteurs est une caractéristique à considérer. Le temps de vie correspond au temps moyen entre la génération d'un porteur et sa recombinaison avec une charge opposée dans un milieu donné. Le temps de vie est ainsi inversement proportionnel à la densité d'impuretés et de défauts présents dans le substrat. La pureté du matériel de départ ainsi que le procédé de fabrication influencent le temps de vie des porteurs.

Dans un détecteur, un temps de vie long peut être avantageux, car il permet de collecter le maximum de charges générées par les émissions radioactives avant que celles-ci ne se recombinent et disparaissent. Il est ainsi généralement préférable de diminuer la densité de

défauts au minimum dans le substrat, car le temps de vie constitue l'une des principales limitations des détecteurs [Pochet, 2005].

Zone de déplétion

La sensibilité d'une jonction PN est également proportionnelle aux dimensions de la zone de déplétion. En effet, la zone de déplétion correspond majoritairement à la région où l'énergie radiative absorbée sera collectée par les électrodes, autrement dit, la zone « sensible » du détecteur. Toute autre région du détecteur est considérée « morte ».

La différence de potentiel appliquée à une photodiode apparaît principalement aux bornes de la zone de déplétion, car celle-ci est la région la plus résistive de la structure (zone chargée, mais vide de porteurs). La zone de déplétion W (m) s'élargit proportionnellement au potentiel de la jonction, suivant l'Équation 3.2 [Streetman, 2005].

$$W = \left[\frac{2\epsilon(V_0 - V_p)}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{1/2} \quad \text{où } V_0 = \frac{kT}{q} \left(\ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (3.2)$$

où ϵ est la permittivité absolue du silicium (1.10^{-10} F.m⁻¹), V_p la tension de polarisation du dispositif (V), V_0 est la tension intrinsèque à la jonction PN (V), q la charge élémentaire de l'électron ($1,6.10^{-19}$ C), k la constante de Boltzmann, T la température (K), N_a la concentration en trous (cm⁻³), N_d la concentration en électrons (cm⁻³) et n_i la concentration intrinsèque de porteurs dans le substrat (cm⁻³). Cette caractéristique permet d'agrandir la zone correspondant à la région sensible du détecteur à l'épaisseur voulue, jusqu'aux limites physiques de la structure. Lorsque la région de déplétion s'étend sur toute l'épaisseur d'un substrat, on considère le détecteur comme entièrement déserté (*fully-depleted*). Dans le cas où la zone sensible n'atteint pas l'extrémité du substrat, on considère alors le détecteur comme partiellement déserté (*partially-depleted*).

Comme la zone de déplétion se retrouve en proportion plus grande du côté le plus résistif de la jonction PN, elle s'étend principalement dans la zone I d'une structure PIN. Pour une tension de polarisation donnée, minimiser la concentration de dopant dans la zone I correspond à maximiser la largeur de la zone de déplétion. Utiliser comme matériel de départ un substrat de haute résistivité permet ainsi d'obtenir une tension de polarisation raisonnable (en dessous de

100 V) pour obtenir une zone de déplétion *fully-depleted* [Krizaj et al., 1998]. Dans notre cas, l'option *fully-depleted* semble la plus appropriée afin d'absorber la majeure portion de l'énergie des particules chargées qui traversent jusqu'à plusieurs millimètres dans le silicium.

En simplifiant l'Équation 3.2, il est possible d'estimer la polarisation inverse nécessaire V_p (V) à appliquer à une structure PIN afin d'obtenir une largeur de zone de déplétion égale à une épaisseur T (m). L'Équation 3.3 est ainsi obtenue [Knoll, 1999].

$$V_p = \frac{qNT^2}{2\epsilon} \quad (3.3)$$

où q la charge élémentaire de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C), N est le dopage de la zone I (m^{-3}) et ϵ est la permittivité absolue du silicium ($1 \cdot 10^{-10}$ F.m⁻¹).

En surface et à l'endos de la gaufre, les zones fortement dopées sont généralement voulues étroites, car elles constituent des zones mortes. En effet, il est préférable de minimiser les pertes d'énergie radioactive dans ces zones et de laisser plutôt la majorité du rayonnement incident atteindre la zone de déplétion.

En conclusion, le silicium apparaît comme un matériau adapté à la détection de particules chargées. Ceci dit, il est nécessaire de porter attention au temps de vie des porteurs dans le substrat, et par cela, on entend la qualité du matériel de départ, ainsi que le procédé de fabrication. Ensuite, il faut privilégier des couches fines et fortement dopées en surface et à l'endos de la gaufre et un substrat de haute résistivité afin d'obtenir une sensibilité maximum dans une structure planaire PIN.

3.1.3 Capacité de jonction

En polarisation inverse, la capacité d'une photodiode correspond à la capacité formée par la jonction PN.

Cette capacité C_j (F) est inversement proportionnelle à la largeur de la zone de déplétion selon l'Équation 3.4 [Sze et al., 2006].

$$C_j = \frac{\epsilon S}{W} \quad (3.4)$$

où W est la largeur de la zone de déplétion (m), ϵ est la permittivité absolue du matériau (1.10^{-10} F.m⁻¹) et S est l'aire de la région active de la diode (m²).

Dans une structure PIN, il est intéressant d'observer la relation entre la capacité de jonction et la résistivité du substrat, tel que décrit à l'Équation 3.5.

$$C_j = \frac{\epsilon S}{\sqrt{\frac{2\epsilon(V_0 - V_p)}{qN}}} = \sqrt{\frac{q\epsilon N}{2(V_0 - V_p)}} * S \quad (3.5)$$

où ϵ est la permittivité absolue du matériau (F.m⁻¹), S est l'aire de la région active de la diode (m²), V_p la tension de polarisation du dispositif (V), V_0 est la tension intrinsèque à la jonction PN (V), q la charge élémentaire de l'électron ($1,6.10^{-19}$ C) et N est le dopage de la zone I (m⁻³).

Il a été vu à la section **2.2.2 Instrumentation pour système de détection de radiation nucléaire** que l'utilisation d'un amplificateur de charge permet d'obtenir une tension en sortie indépendante de la capacité d'entrée du détecteur. Il est important de noter que la capacité d'un détecteur influence cependant le rapport signal sur bruit d'un système de détection, quelque soit le type d'amplificateur utilisé. En effet, le bruit électronique augmente en fonction de la capacité totale à l'entrée du signal. Il est ainsi nécessaire de minimiser la capacité de la jonction PN afin de maximiser le rapport signal sur bruit [Spieler, 2005].

La capacité associée à une jonction PIN varie en fonction de l'aire de la région active, de la résistivité du substrat et de la polarisation de la diode. Il est nécessaire de minimiser cette capacité afin d'augmenter le rapport signal sur bruit du système de détection.

3.1.4 Bande passante

En électronique, la bande passante d'un dispositif est caractérisée par la fréquence de coupure f_c (Hz), c'est-à-dire, la fréquence à laquelle l'amplitude d'un signal est atténuée de 3 dB

(70,7 % du signal). La bande passante d'un dispositif électronique doit être suffisante pour supporter l'application pour laquelle il est conçu. Dans notre cas, les taux de comptage peuvent augmenter jusqu'à 20 000 CPS (voir section 2.2 **Circuits de traitement de signal pour détection de radiation**), donc au maximum 20 kHz. Ainsi, la bande passante exigée pour ce type de détecteur est beaucoup plus faible que celles des photodiodes conçues pour le domaine de la télécommunication (fréquences d'opération dans les MHz ou GHz). Cependant, il est important de valider que le dispositif conçu respecte les contraintes.

Le temps de réponse d'une photodiode est une mesure du délai entre la création des charges dans le semiconducteur et leur collection par les électrodes [Hamamatsu, 2011b]. Il est généralement exprimé par le temps de montée τ_m , c'est-à-dire la durée requise au signal de sortie pour passer d'une amplitude de 10 % à 90 % du maximum. Le temps de montée de la diode est limité par une combinaison de plusieurs facteurs : le temps de transit des porteurs dans la zone de déplétion (τ_t), le temps de diffusion des porteurs créés en dehors de la jonction (τ_d) et, finalement, la constante RC du dispositif (τ_{RC}). Ces temps s'additionnent quadratiquement, comme l'exprime l'Équation 3.6 :

$$\tau_m = \sqrt{\tau_t^2 + \tau_d^2 + \tau_{RC}^2} \quad (3.6)$$

Le temps de transit des porteurs dans la zone de déplétion est proportionnel à la distance qu'ils ont à traverser et à la vitesse des porteurs. Ce temps peut être estimé par l'Équation 3.7 [Hamamatsu, 2011b].

$$\tau_t = W^2 / (\mu V_r) \quad (3.7)$$

où W est l'épaisseur de la zone de déplétion (m), μ est la mobilité des charges (m/s) et V_r est la tension de polarisation inverse de la diode (V).

Le temps requis par les porteurs pour diffuser sur une distance X (m) est exprimé par l'Équation 3.8 [Sze et al., 2006].

$$\tau_d = 4X^2 / (\pi^2 D) \quad (3.8)$$

où D est le coefficient de diffusion des porteurs dans le matériau semiconducteur (m^2/s). Ainsi, minimiser la distance que les porteurs ont à parcourir, c'est-à-dire l'épaisseur des zones mortes, permet de minimiser le temps de diffusion.

Le temps de réponse défini par la constante de temps RC du dispositif est exprimé par l'Équation 3.9 [Hamamatsu, 2011b].

$$\tau_{RC} = 2.2 C_i R_L \quad (3.9)$$

où R_L est la résistance de la charge (Ω) et C_i représente la somme des capacités présentes dans le circuit (F), composée de la capacité de la jonction PN et de la capacité relative à l'encapsulation de la photodiode. Afin de ne pas limiter la bande passante, la charge et la capacité doivent être minimisées.

Dans le cas où la constante RC est minimisée, dans une jonction en mode *partially-depleted*, c'est le temps de diffusion qui généralement limite la bande passante. Dans le cas d'une structure en mode *fully-depleted*, toute l'épaisseur du substrat est désertée et peu de porteurs sont générés en dehors de la zone de déplétion. Dans ce cas, c'est plutôt le temps de transit des porteurs dans la zone de déplétion ou la constante RC qui limite la bande passante. Étant donné le champ électrique présent dans la zone de déplétion, le temps de transit est généralement beaucoup plus faible que le temps de diffusion des porteurs. Les structures en mode *fully-depleted* peuvent ainsi atteindre des fréquences de coupure beaucoup plus élevée que les jonctions en mode *partially-depleted*.

Il est possible d'approximer la fréquence de coupure f_c à partir du temps de montée par l'Équation $\tau_{RC} \cong \frac{0,35}{f_c}$ (3. 1 [Hamamatsu, 2011b]).

$$\tau_{RC} \cong \frac{0,35}{f_c} \quad (3. 1)$$

En résumé, la bande passante d'une structure PIN en mode *fully-depleted* est généralement limité par le temps de transit des porteurs dans la zone de déplétion ou la constante RC associée au dispositif. Il est ainsi nécessaire durant la conception du détecteur d'évaluer le temps de réponse en fonction des paramètres du détecteur qui l'influence, soient l'épaisseur de la zone de déplétion, la polarisation utilisée et la capacité de jonction.

3.1.5 Courant d'obscurité

Il est primordial de minimiser autant que possible le bruit généré par une photodiode afin d'obtenir un ratio signal sur bruit suffisant pour détecter les radiations nucléaires. Il fût énoncé dans la section **2.3 Bruit électronique** qu'une source importante du bruit électronique généré par une diode provient du courant DC la traversant. Afin de réduire ce bruit, il est impératif de déterminer les sources de courant d'obscurité. Il sera alors possible d'évaluer des techniques permettant d'en diminuer l'amplitude.

Mécanismes de thermogénération

À la section **2.1.2 Méthodes de détection de particules chargées**, la thermogénération de porteurs dans les matériaux de type semiconducteur a été mentionné. Il a également été dit que ces porteurs libres créent un courant DC non-négligeable lorsque le matériau semiconducteur est polarisé. À la section **2.1.3 Technologie retenue**, il a été déterminé que la structure PN permettait de réduire ce courant DC en polarisation inverse au courant des porteurs minoritaires seulement. Cependant, ce courant est pratiquement toujours non-nul, augmente en fonction de la température et constitue ainsi une source de courant d'obscurité non-négligeable.

Mécanismes de génération-recombinaison

Les mécanismes de génération-recombinaison contribuent au courant d'obscurité dans une diode, car ils produisent des fluctuations supplémentaires dans la densité de porteurs. En effet, ces phénomènes provoquent la disparition temporaire ou définitive des porteurs [Pochet, 2005].

Un premier type de recombinaison est la recombinaison directe d'un électron avec un trou (bande à bande) menant à la disparition des charges initiales et à l'émission d'un photon ou d'un porteur (électron ou trou) appelé Auger. Ce type de recombinaison est peu probable dans le silicium, car celui-ci a un gap indirect. Un second type de recombinaison est le piégeage. Il correspond à la capture d'une charge durant un certain temps par un état d'énergie intermédiaire situé dans la bande interdite du semiconducteur. Si la charge est capturée par un

piège peu profond, elle peut être réémise dans la bande de conduction ou la bande de valence après un certain temps (se comptant en nanosecondes ou microsecondes). Dans ce cas, la charge ne disparaît pas, mais ne peut plus contribuer au signal durant la période où elle est piégée. Dans un piège considéré comme profond, la charge se recombinaera plutôt avec une charge opposée (après quelques millisecondes). Ces porteurs sont alors perdus. Ce processus correspond à une recombinaison indirecte et est de loin le type de recombinaison le plus fréquent dans le silicium.

Les pièges sont formés par des imperfections dans la structure cristalline ou la présence d'impuretés ionisées qui induisent des niveaux d'énergie intermédiaires dans la bande interdite du semiconducteur. Les niveaux d'énergie induits près des bandes de conduction et de valence correspondent à des pièges peu profonds d'où les porteurs peuvent se libérer après un certain temps. Seuls les niveaux intermédiaires situés près du centre de la bande interdite constituent des centres effectifs de génération et de recombinaison (pièges profonds). Les métaux, tels que l'or, le zinc et le cadmium, produisent généralement des pièges profonds dans le silicium [Knoll, 1999].

Localisation du courant d'obscurité dans une structure PIN

On retrouve à la Figure 3.3 une vue de coupe d'une structure PIN. Les sources de courant de fuite sont représentées par des flèches. Dans cet exemple, une passivation en oxyde de silicium est utilisée sur la surface de la région active, mais d'autres matériaux peuvent être utilisés. I_G représente le courant de fuite généré dans le substrat et capté par le champ électrique de la zone de déplétion. Ce courant est formé des porteurs minoritaires générés thermiquement ou des centres de génération-recombinaison situés dans le substrat. I_{INTER} correspond au courant généré plus spécifiquement à l'interface entre le silicium et le matériau de passivation. Il existe à cet endroit une densité d'états d'interface propre aux matériaux et aux procédés de fabrication des couches situées à l'interface. Un état d'interface correspond soit à un lien brisé ou faible, une impureté ou un défaut quelconque à l'interface [Kim et al., 2008]. Ces états peuvent piéger des porteurs de la même manière que les imperfections situés dans le substrat et contribuer au courant d'obscurité total. I_{SURF} est le courant généré en surface du dispositif.

Ce courant provient des défauts et impuretés générés par l'humidité ou la contamination de l'environnement extérieur.

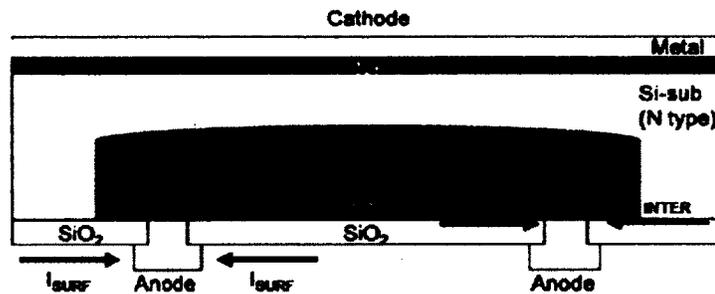


Figure 3.3 : Sources de courant de fuite dans une structure PIN.
(Adapté de [Kim et al., 2008])

Les sections suivantes décrivent des éléments de conception permettant de réduire une ou plusieurs sources de courant d'obscurité énoncées précédemment.

Zone de déplétion

Il est important de tenir compte du fait que, plus la zone de déplétion est profonde, plus le courant de fuite provenant du substrat sera important. En mode *fully-depleted*, le courant d'obscurité est à son maximum pour une structure donnée. Dépendamment des requis de conception, un compromis peut être réalisé entre la sensibilité et le niveau de bruit généré en modifiant la polarisation de la diode et, donc, l'épaisseur de la zone de déplétion.

Orientation du substrat

L'orientation cristalline à la surface du substrat aura un impact sur la densité d'états d'interface. En effet, les substrats avec orientation $\langle 100 \rangle$ ont de plus faibles densités de surface que l'orientation $\langle 111 \rangle$ et donc de plus faibles courants de fuite en surface [Holland, 1989b] [Zhou et al., 1996].

Passivation

La qualité de la couche de passivation et la qualité de l'interface entre la passivation et le substrat sont les aspects principaux influençant l'amplitude du courant de fuite en surface et à l'interface de la région active. Plus précisément, la qualité de la passivation est relative à la concentration de charges piégées à l'interface, de charges fixes près de l'interface, de charges

piégées dans le volume et de sa capacité à constituer une barrière de diffusion pour des charges mobiles (impuretés ioniques telles que Li^+ , Na^+ , K^+). Ces critères ont été étudiés en profondeur au niveau de l'interface $\text{SiO}_2\text{-Si}$ étant donné son utilisation massive dans l'industrie microélectronique. Ce type de passivation est schématisé à la Figure 3.4.

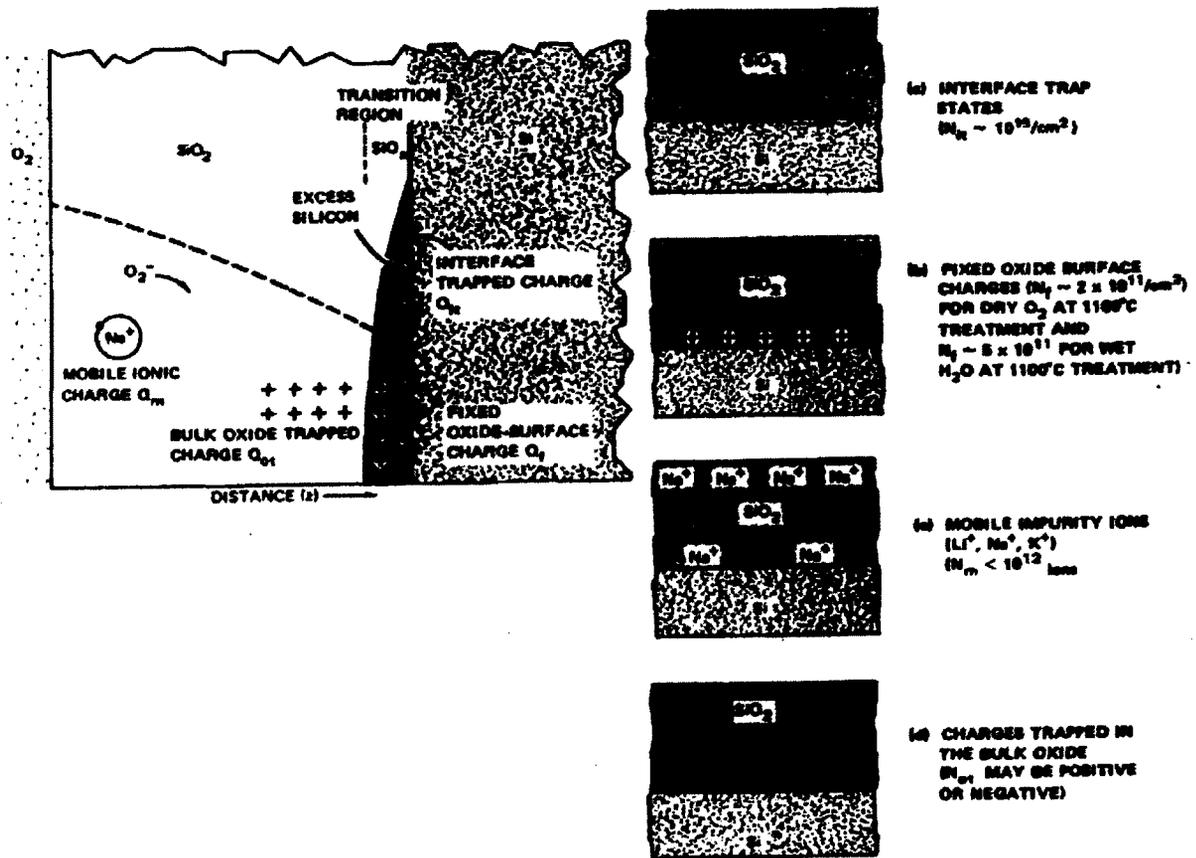


Figure 3.4 : Localisation des charges dans une interface $\text{SiO}_2\text{-Si}$ avec oxyde cru thermiquement.
(Tiré de [Madou, 2002])

La qualité d'un oxyde dépend beaucoup de sa méthode de croissance ou de déposition. L'oxyde cru thermiquement sur silicium est d'une très bonne qualité électronique, sauf en ce qui a trait à sa capacité de barrière de diffusion pour plusieurs impuretés. La croissance sèche à haute température (900 à 1150 °C) produit un oxyde de meilleure qualité qu'en croissance humide. La densité en croissance sèche est plus forte, l'oxyde résultant est donc très faiblement poreux et constitue ainsi une meilleure barrière contre les impuretés [Madou, 2002].

Une couche supplémentaire de nitrure de silicium est souvent déposée sur l'oxyde utilisé comme passivation. En effet, le nitrure de silicium constitue une protection mécanique contre les rayures et une barrière de diffusion efficace contre l'humidité et les ions mobiles, en particulier contre le sodium. De plus, le nitrure de silicium peut être déposé à la suite de la dernière métallisation grâce à sa faible température de dépôt (PECVD, entre 300 et 350 °C). Il est cependant important de tenir compte du fait qu'en fonction de la méthode de déposition, le nitrure de silicium peut imposer des stress mécaniques au substrat et causer la déformation ou même la fissuration de la gaufre [Madou, 2002].

Ainsi, avec un substrat de silicium, la combinaison oxyde thermique et nitrure de silicium constitue une option de passivation optimale.

Géométrie

Les coins à angle droit favorisent la génération de courant de fuite dû à un champ électrique très élevé et très localisé [Sze et al., 2006]. C'est pourquoi les structures rondes sont préférables. Dans le cas de formes carrées ou rectangulaires, l'utilisation de coins arrondis permettra de réduire cet effet indésirable.

Anneau de garde

Un anneau de garde correspond à une jonction additionnelle qui permet d'isoler électriquement les dispositifs sur un même substrat [Palviainen et al., 2007]. Un exemple apparaît à la Figure 3.5. En polarisant l'anneau à la même tension que la diode, à partir d'un circuit électrique en parallèle, l'anneau agira comme une seconde diode. Les courants de fuite de surface, d'interface et du substrat qui proviennent de l'extérieur de l'anneau seront collectés par celui-ci, plutôt que par la diode elle-même. L'anneau de garde permet ainsi de réduire le courant de fuite total circulant dans la région d'intérêt. Ce type de structure est très simple à ajouter, puisqu'il ne requiert aucune étape supplémentaire au procédé. En effet, il suffit d'utiliser la même étape de dopage que pour la zone active. Cependant, l'ajout d'un anneau de garde nécessite d'augmenter le volume d'un dispositif donné pour une même surface active.

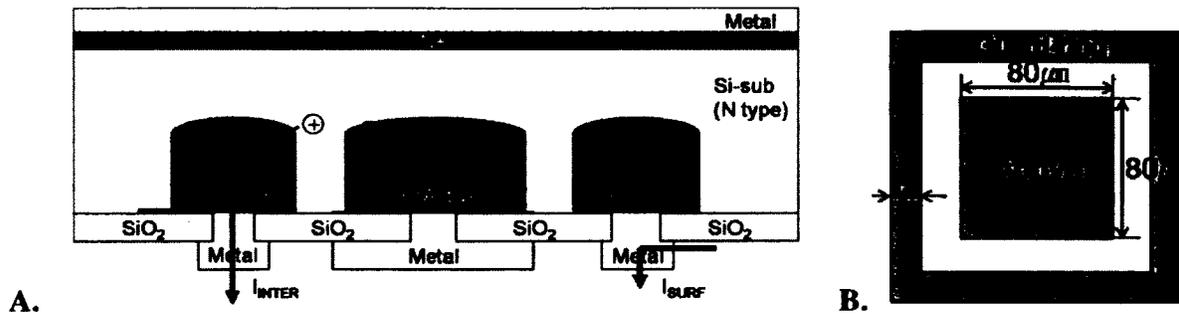


Figure 3.5 : Réduction du courant de fuite par l'utilisation d'un anneau de garde. A : Vue de coupe du dispositif, B : Vue du dessus du dispositif. (Tiré de [Kim et al., 2008])

Un anneau de garde constitue également une barrière efficace contre la grande quantité de défauts générés au bord de la gaufre, lors de la découpe du substrat.

Limitation horizontale de la zone de déplétion

Une autre stratégie intéressante afin de diminuer le courant de fuite, à utiliser avec ou sans l'anneau de garde, est de limiter la zone de déplétion en surface du substrat (à l'interface avec la passivation). En effet, la zone de déplétion s'étant autant en largeur qu'en profondeur. Autrement dit, les impuretés peuvent être capturées à l'interface jusqu'à la distance de la zone de déplétion horizontalement. Afin de diminuer cette contribution au courant de fuite, il est possible de doper plus fortement en surface une couche du même type de dopant que le substrat. Ceci aura pour effet d'éloigner la zone de déplétion de l'interface avec la passivation. Cette méthode est schématisée à la Figure 3.6. Ce type de structure aura cependant un impact sur la tension de claquage du dispositif. Il est nécessaire de s'assurer que celle-ci demeure éloignée de la tension d'opération.

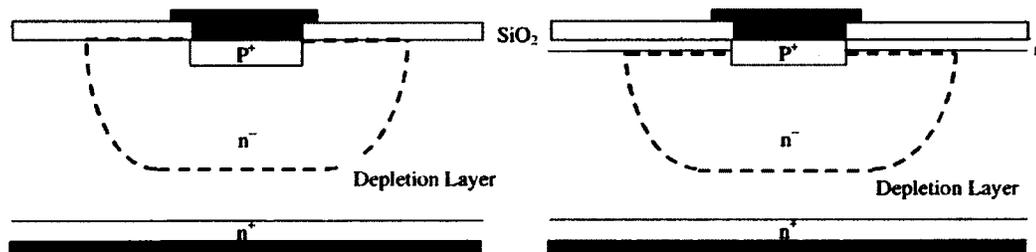


Figure 3.6 : Introduction d'une couche dopée n en surface dans un substrat n- afin de limiter la zone de déplétion et la contribution du courant de fuite à l'interface avec la passivation (SiO₂). (Adapté de [Han et al., 2002])

Mise en place de pièges à contaminants

Malgré toutes ces stratégies, il est impossible d'éliminer complètement les contaminants présents dans un matériau. Le courant de fuite d'une jonction PIN est sensible à des concentrations d'impuretés même minimales. Des techniques additionnelles existent pour rendre ces impuretés inactives dans les zones sensibles. Il s'agit de la mise en place de pièges à contaminants (*Defect Gettering*) [Kang et al., 1988]. Ces pièges ont pour objectif d'attirer les impuretés dans une couche particulière du substrat pour les rendre électriquement inactives dans les zones actives. Elles reposent principalement sur le fait que la majorité des impuretés ont des coefficients de diffusion élevés à de hautes températures. Il est important de mentionner qu'une multitude de techniques existent pour réaliser ce type de piège et qu'elles peuvent être plus ou moins efficaces en fonction du procédé de fabrication et de la structure utilisée. Il est ainsi important de tester plusieurs méthodes.

Dans le cas des circuits électroniques standards, l'absorption des impuretés peut être réalisée dans le volume du substrat (*Intrinsic Gettering*), car les dispositifs sont fabriqués en surface. Une des techniques utilisées est la formation de précipités d'oxygène dans le volume du substrat qui permet de retenir les défauts et de laisser une mince région dénuée d'impuretés à la surface du substrat.

Dans le cas d'une structure PIN qui utilise l'épaisseur du substrat comme zone active, il est nécessaire d'utiliser une autre stratégie. L'absorption des impuretés peut se faire par une couche supplémentaire au dos de la gaufre, isolée de la région active (*Extrinsic Gettering*). Plusieurs stratégies ont été développées pour optimiser cette couche, telles que le dopage au phosphore, l'implantation ionique ou l'utilisation d'une couche de polysilicium. Les atomes de phosphore constituent d'efficaces pièges à impuretés par mécanisme de création de paires d'ions. L'introduction de défauts par implantation ionique permet également de réaliser des pièges profonds à impuretés. Finalement, les interfaces entre les grains de silicium monocristallin présentes dans le polysilicium constituent un autre moyen de piéger les impuretés [Ogushi et al., 1997]. Il est important de noter que le polysilicium n'est plus efficace s'il est soumis à une étape haute température sans protection, car il s'oxyde et doit ainsi être recouvert d'une couche de protection (ex. SiO_2) [Nam et al., 2006].

En conclusion, afin de diminuer le bruit électronique généré par une photodiode PIN, il existe plusieurs stratégies telles qu'utiliser des substrats de silicium avec une orientation <100>, utiliser une couche d'oxyde superposée à une couche de nitrure comme passivation et mettre en place des structures additionnelles correspondant à des anneaux de garde ou des pièges à contaminants.

3.1.6 Éléments critiques reliés au procédé de fabrication

Dans la section 3.1.2 Sensibilité, il a été mentionné que les techniques de fabrication des substrats introduisent des défauts dans le semiconducteur. Les procédés de fabrication en salle blanche introduisent également et de manière importante des défauts dans les dispositifs microélectroniques. Ces défauts créent aussi des centres de génération-recombinaison augmentant le bruit électronique. Ainsi, une attention particulière doit être portée sur le procédé comme tel, en plus des matériaux de départ et de la structure choisie.

Contamination

Les diverses sources de contamination ont différents effets sur les dispositifs électroniques et comportent des méthodes de nettoyage propres. Les principales catégories de contamination sont les suivantes : particules, métaux, composés organiques, composés inorganiques volatils, oxyde natif et microrugosités [Franssila, 2004].

Particules : Les particules ont plusieurs sources (réactions chimiques, équipement, vaisselle, gaz, solutions chimiques, eau, etc.). Elles peuvent créer des défauts mécaniques en surface ou rester emprisonnées dans des couches, modifiant leurs propriétés chimiques d'origine. Les techniques de lithographie peuvent aussi être affectées par la présence de particules lorsque les dispositifs fabriqués sont de très petite taille.

Métaux : Les métaux sont un type de contamination difficile à éviter, puisque la majorité des procédés de fabrication ont recours à de l'équipement en métal. Les solutions chimiques (ex. BHF) et l'être humain (sueur, cosmétiques) sont également des sources de contamination métallique. Les atomes métalliques qui se retrouvent à la surface d'un substrat peuvent

diffuser vers l'intérieur et créer des centres de génération-recombinaison. Ils peuvent également affecter les profils de diffusion dans les régions critiques des dispositifs, modifier les taux d'oxydation ou même dégrader la qualité d'un oxyde cru.

Composés organiques : Les composés organiques peuvent augmenter les résistances de contact ou causer des croissances de couches minces anormales.

Oxyde natif : L'oxyde natif croît à température ambiante à un taux très faible, mais suffisamment pour être en mesure de dégrader un contact électrique ou diminuer la qualité d'un oxyde cru. En effet, la qualité de l'oxyde natif n'est uniforme, comme celle des oxydes crus à haute température.

Microrugosité : Les microrugosités correspondent à des défauts mécaniques en surface, créés par les procédés de gravure et de nettoyage ou par les manipulations que subissent les substrats lors de l'exécution du procédé de fabrication. Certains types d'impuretés peuvent catalyser des réactions chimiques en surface et également augmenter la rugosité. Même s'il s'agit de défauts mécaniques, ceux-ci sont aussi nuisibles que les autres sources de contamination, car ils forment des centres de génération-recombinaison.

Techniques pour éliminer la contamination

Dans un procédé de fabrication, les étapes à haute température constituent les étapes les plus critiques en ce qui a trait à la contamination. La majorité des contaminants nuisibles ont des coefficients de diffusion élevés et, donc, une grande mobilité à de hautes températures (au-dessus de 900 °C). Durant les étapes à haute température, les contaminants présents sur la gaufre diffusent à travers les couches de matériaux et peuvent rester piégés à l'intérieur. Également, les dépositions ou formation de couches peuvent emprisonner des impuretés aux interfaces ou dans le volume même de la couche. Il est impératif de porter une attention particulière aux méthodes de nettoyage et à l'équipement utilisé pour les étapes à haute température, comme les dépositions et les croissances.

Les nettoyages chimiques à base d'acide, de base ou de solvant sont couramment utilisés pour réduire la contamination. La méthode standard RCA (inventée dans les Laboratoires RCA) consiste en une séquence de nettoyages chimiques permettant un nettoyage relativement complet des substrats de silicium. Celui-ci est généralement réalisé en totalité au début d'un procédé sur silicium. On peut ensuite choisir d'utiliser certaines étapes du nettoyage RCA séparément durant le procédé lorsque l'étape précédente ou suivante nécessite un nettoyage en particulier.

Les méthodes sont normalement adaptées au procédé de fabrication en cours et à l'environnement de travail. La méthode de type RCA généralement utilisée au CRN² apparaît au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Nettoyage RCA utilisé au CRN².

Étape	Durée	Température	Utilité
1. Opticlear, Acétone, IPA Rinçage Eau DI	5 min 2 min		Dégraissage, nettoyage primaire des composés organiques
2. H ₂ O ₂ :H ₂ SO ₄ (1:1) Rinçage Cascade eau DI	15 min 2/3 min		Élimination des composés organiques et des métaux, oxydation
3. HF:H ₂ O 1:10 Rinçage Cascade eau DI	15 s 1/0 min		Gravure de la couche d'oxyde et élimination de métaux (Ni, Fe, Al)
4. H ₂ O:H ₂ O ₂ :NH ₄ OH (100:4:1) Rinçage Cascade eau DI	10 min 1/1 min	65 °C	Élimination des particules par oxydation de la surface et gravure subséquente de la couche d'oxyde, élimination des résidus formés suite à l'étape H ₂ O ₂ :H ₂ SO ₄
5. HF:H ₂ O / 1:50 Rinçage Cascade eau DI	15 s 30/0 s	65 °C	Gravure de la couche d'oxyde et élimination de métaux (Ni, Fe, Al)
6. H ₂ O:HCl:H ₂ O ₂ (6:1:1) Rinçage Cascade eau DI Rinçage/séchage	10 min 2/3 min 2/3 min		Élimination de métaux (Ni, Fe, Cu)

Idéalement, il faudrait également utiliser de l'équipement dédié au silicium afin de ne pas être en contact avec les matériaux indésirables utilisés pour d'autres types de procédés. L'équipement correspond aux ustensiles et vaisselle utilisés pour la manipulation, mais également aux fournaies utilisées pour les étapes réalisées à haute température. En industrie, les fournaies sont généralement dédiées à une étape particulière du procédé de fabrication (par exemple : première oxydation, deuxième oxydation, déposition du nitrure, diffusion des dopants, etc.) ce qui permet d'éviter d'ajouter les contaminants propres aux étapes suivantes à l'étape en cours.

Également, les tubes des fournaies peuvent être nettoyés par l'envoi de HCl avant chaque étape haute température. Le chlore permet d'éliminer les contaminants métalliques dans la fournaie [Holland, 1989b].

En conclusion, afin de réduire les probabilités de contamination des gaufres durant un procédé de fabrication, il faut s'assurer d'utiliser les méthodes de nettoyage adéquates avant chaque étape critique. Également, il est impératif d'utiliser de l'équipement dédié.

3.2 Exemples de structures et de procédés de fabrication existants dans la littérature pour des applications semblables

Plusieurs procédés de fabrication et exemples de structures de photodiodes PIN appliquées à la détection de radiation nucléaire ont été proposés dans la littérature scientifique. L'emphase est généralement portée sur la minimisation du courant d'obscurité. Plusieurs détecteurs sont réalisés sur silicium pour des raisons de simplicité et de coût. La diversité des applications requiert une technique de fabrication adaptée à chaque besoin. Cependant, les étapes de fabrication d'une photodiode PIN demeurent globalement les mêmes.

3.2.1 Étapes globales d'un procédé de fabrication de photodiode PIN

Un exemple de procédé de fabrication sur gaufre de silicium, compatible avec les procédés standards utilisés dans le domaine de l'électronique, apparaît à la Figure 3.7.

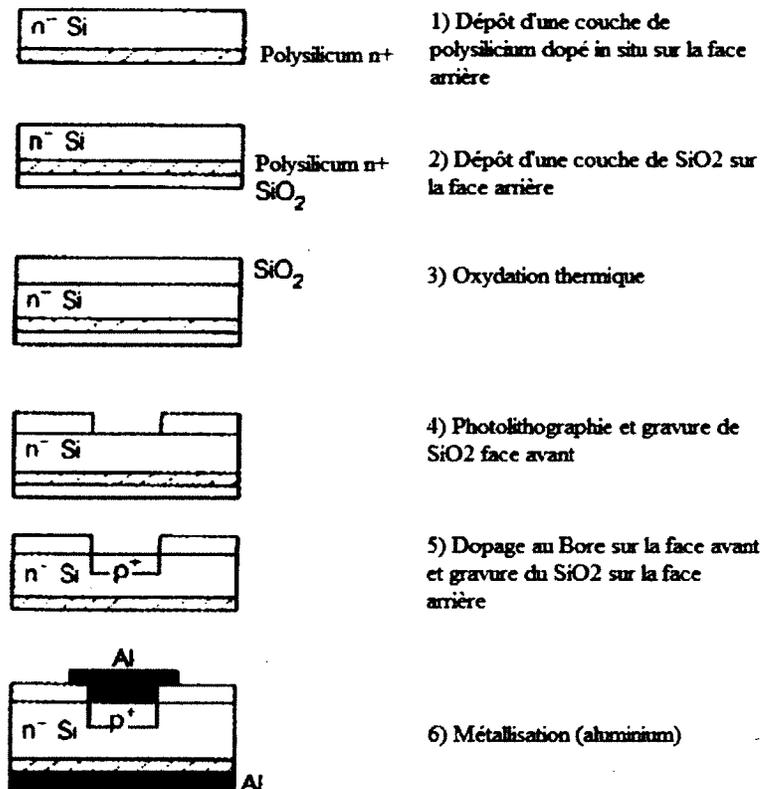


Figure 3.7 : Procédé de fabrication pour photodiode PIN.
(Adapté de [Holland, 1989b])

Dans cet exemple, une couche de polysilicium dopé in situ sert à la fois de zone n^+ pour la jonction PIN et de piège à défauts. Cette couche est protégée par une couche de SiO_2 déposée au dos du substrat. Une couche de SiO_2 est ensuite crue thermiquement sur la face avant. Elle servira à la fois de passivation et de masque pour l'implantation. Les zones actives sont dopées avec du bore pour créer la zone p^+ de la jonction PIN. Les couches de métal permettent de réaliser les contacts électriques avec les zones dopées. La région active est recouverte d'aluminium, car celui-ci filtre les rayons de lumière visible, mais non les radiations à plus haute énergie.

3.2.2 Procédés de fabrication et performances obtenues dans la littérature

Plusieurs procédés similaires sont détaillés aux Tableau 3.2 et Tableau 3.3, afin de comparer différentes méthodes de fabrication à partir des performances obtenues. Les procédés énoncés utilisent généralement des technologies disponibles au CRN². Il est donc possible de s'inspirer de ces divers procédés pour construire celui qui sera utilisé pour le présent projet.

Tableau 3.2 : Exemples de procédés de fabrication de photodiode PIN pour détection de radiations.

	[Holland, 1989b]	[Nam et al., 2006]	[Zhou et al., 1996]
Substrat	10 k Ω -cm, <100> et 1 k Ω -cm, <111>	10 k Ω -cm, <100> (2 faces polies)	3 k Ω -cm, type n, <111>
Étapes du procédé de fabrication	<ol style="list-style-type: none"> 1- Dépôt LPCVD (650 °C) PolySi dopé in situ sur face arrière 1μm 2- Dépôt LPCVD (450 °C) SiO₂ face arrière 3- Croissance thermique SiO₂ 4- Ouverture des zones actives face avant 5- Dopage au bore face avant (900 °C diffusion B₂O₃) 6- Recuit (900 °C, O₂) 15 min, (900 °C, N₂) 2 h 7- Dépôt Aluminium 8- Recuit (<100>: 400 °C, <111>: 450 °C, 80 % N₂ et 20 % O₂) 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Croissance thermique humide SiO₂ 2- Dépôt LPCVD (625 °C, 300 mTorr) PolySi face arrière 1 μm 3- Diffusion phosphore 4- Ouverture des zones actives face avant 5- Implantation au bore 6- Dépôt SiO₂ TEOS face arrière 7- Recuit (900 °C, O₂) 15 min, (900 °C, N₂) 3 h 8- Dépôt (LPCVD) <i>Anti-Reflective-Coating</i> Si_xO_{1-x} (où x ~ 0,7) 9- Dépôt (PECVD TEOS) SiO₂ sur face avant 10- Dépôt Aluminium 11- Recuit (450 °C, N₂) 30 min 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Dépôt PolySi dopé in situ sur face arrière 2- Ouverture des zones actives face avant 3- Implantation au bore (8.10¹² cm⁻², 35 keV) ou Diffusion thermique au bore 4- Recuit 900 °C 12 h 5- Métallisation
Structure	Rond Rayon : 1 mm Anneau de garde : 300 μ m Gap entre anneau et photodiode : 100 μ m	Carré Côté : 3 mm Anneau de garde : non mentionné Gap entre anneau et photodiode : non mentionné	Carré Côté : 1 mm Anneau de garde : 275 μ m Gap entre anneau et photodiode : 25 μ m
Passivation	Aluminium	Aluminium	Aluminium
Branchement de l'anneau de garde	Même tension que la photodiode	Flottant	Non mentionné
Performances obtenues	Avec anneau : 1-2 nA/cm ² (-100 V) Sans anneau : 100 nA à 10 μ A/cm ² (-100 V)	Avec ARC: 2,2 mA/cm ² (-5 V) Sans anneau: 278 μ A/cm ² (-5 V) Sans ARC, avec anneau: 1,7 nA/cm ² (-3,6 V)	Avec diffusion thermique: 1,2 nA/cm ² (-100 V) Avec implantation ionique: 2 nA/cm ² (-100 V)

Tableau 3.3 : Exemples de procédés de fabrication de photodiode PIN pour détection de radiations.

	[Kim et al., 2008]	[Han et al., 2002]	[Krizaj et al., 1998]
Substrat	1,6 k Ω -cm, <111> (2 faces polies)	4 k Ω -cm, type n, <100> (2 faces polies)	3,5 k Ω -cm, type n, <111>
Étapes du procédé de fabrication	<ol style="list-style-type: none"> 1- Croissance thermique humide (1000 °C) 2- Ouverture des zones actives face avant 3- Implantation au bore (6.10¹⁵ cm⁻², 80 keV) face avant 4- Implantation au phosphore (6.10¹⁶ cm⁻², 80 keV) face arrière 5- RTA (1100 °C) 1 min 6- Gravure de l'oxyde 7- Dépôt PECVD SiO₂ 300 nm face avant 8- Ouverture des contacts 9- Métallisation (50 nm Ti, 600 nm AlCu) 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Implantation au phosphore (5.10¹¹ cm⁻², 120 keV) sur face avant 2- Implantation au phosphore (5.10¹⁵ cm⁻², 120 keV) sur face arrière 3- Croissance thermique (1100 °C) 4- Ouverture des zones actives 5- Implantation au bore (5.10¹⁵ cm⁻², 60 keV) 6- Recuit (600 °C) 30 min 7- Recuit (950 °C) 20 secs 6- Métallisation Ti/W/Ti/Au 	<p><u>Procédé 1</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Croissance thermique sèche SiO₂ 2- Dépôt nitrure 3- Diffusion thermique au phosphore n+ face arrière <p><u>Procédé 2</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Diffusion thermique au phosphore n+ face arrière 2- Croissance thermique sèche SiO₂ <p><u>Procédé 3</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 3- Diffusion thermique au phosphore n+ face arrière 4- Croissance thermique humide SiO₂ 5- Dépôt nitrure <p><u>Procédé 4</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 6- Diffusion thermique au phosphore n+ face arrière 7- Croissance thermique sèche SiO₂ 4- Dépôt nitrure
Structure	Carré Côté : 80 μ m Anneau de garde : 3 μ m Gap entre anneau et photodiode : entre 6 et 10 μ m	Rectangulaire Côté : 80 x 5000 μ m et 200 x 2400 μ m Anneau de garde : 100 μ m Gap entre anneau et photodiode : 100 μ m	Plusieurs formes
Passivation	SiO ₂	Ti/W/Ti/Au	Plusieurs passivations
Branchement de l'anneau de garde	Même tension que la photodiode	Même tension que la photodiode	Pas d'anneau
Performances obtenues	0,2 nA /cm ² (-100 V)	Sans anneau: 2 μ A /cm ² (-100 V) Avec anneau: 0,83 μ A /cm ² (-100 V)	Procédé 1: 25 nA /cm ² (-30 V) Procédé 2: 65 nA /cm ² (-30 V) Procédé 3: 15 nA /cm ² (-30 V) Procédé 4: 20 nA /cm ² (-30 V)

3.2.3 Points d'intérêt

Substrat : L'utilisation de substrat de silicium haute résistivité est de mise pour ce type de détecteur. Tous les procédés présentés utilisent des substrats dont la résistivité est de l'ordre du $k\Omega\text{-cm}$. La majorité utilise également des substrats à double faces polies. Pour l'orientation, certaines références mentionnent que les substrats $\langle 100 \rangle$ sont préférables, mais des résultats satisfaisant les présentes contraintes du projet ont été obtenus avec du $\langle 111 \rangle$.

Procédé de fabrication : Plusieurs stratégies ont été évaluées avec l'objectif de diminuer le courant de fuite. La moitié des références utilisent une couche de polysilicium dopé in situ ou par diffusion sur la face arrière afin de réduire le courant de fuite et obtiennent ainsi des performances de l'ordre du nA/cm^2 . Après la déposition du polysilicium, un dépôt CVD de SiO_2 sur la face arrière permet de minimiser l'oxydation durant la deuxième croissance [Holland, 1989b] [Nam et al., 2006]. Cette protection a été évaluée nécessaire, car le courant de fuite était beaucoup plus élevé lorsque le polysilicium était laissé sans protection [Nam et al., 2006]. Le recuit de diffusion pour le piégeage des impuretés dans le polysilicium a été réalisé à diverses durées et températures : 900 °C 15 minutes avec O_2 + 2 heures avec N_2 [Holland, 1989b], 900 °C 15 minutes avec O_2 + 3 heures avec N_2 , 900 °C 12 heures. Également, un recuit d'activation des dopants RTA (*Rapid Thermal Annealing*, en français recuit thermique rapide) a produit de très bons résultats, en dessous du $1 nA/cm^2$. La stratégie d'implanter une pré-couche dopée n pour la limitation de la zone de déplétion semble moins efficace avec des résultats de l'ordre de la centaine de nA/cm^2 .

Structures : Certaines références ont comparé des structures avec ou sans anneaux de garde. Dans tous les cas, les meilleures performances ont été obtenues avec les anneaux de garde branchés à la même tension que la photodiode.

3.3 Procédé développé et réalisé au CRN²

Un premier procédé de fabrication a été développé et réalisé dans les infrastructures du CRN². Dans cette section seront rapportées les structures utilisées, les principales étapes du procédé, les performances obtenues ainsi que les recommandations faites à la suite de ce premier travail [Convert, 2006].

3.3.1 Structures

Les structures élaborées lors de ce premier procédé apparaissent à la Figure 3.8. Trois types de géométrie ont été réalisés : diodes rondes de 1 et 2 mm de diamètre (Figure 3.8A et B) et rectangulaires de 3 x 30 mm² (Figure 3.8C). Les anneaux de garde font 200 µm de large et sont espacés de 75 µm de la région active. Les différents masques constituant la structure ronde et une vue de coupe de la structure finale apparaissent à la Figure 3.9. Les structures sont isolées entre elles par une couche de SiO₂. On retrouve sur la face arrière du substrat une couche d'aluminium sur toute la surface N+, constituant la cathode de la photodiode. Les zones actives en surface ne sont pas passivées pour la plupart. Certaines ont reçu une couche de nitrure afin d'en évaluer l'impact sur le courant de fuite.

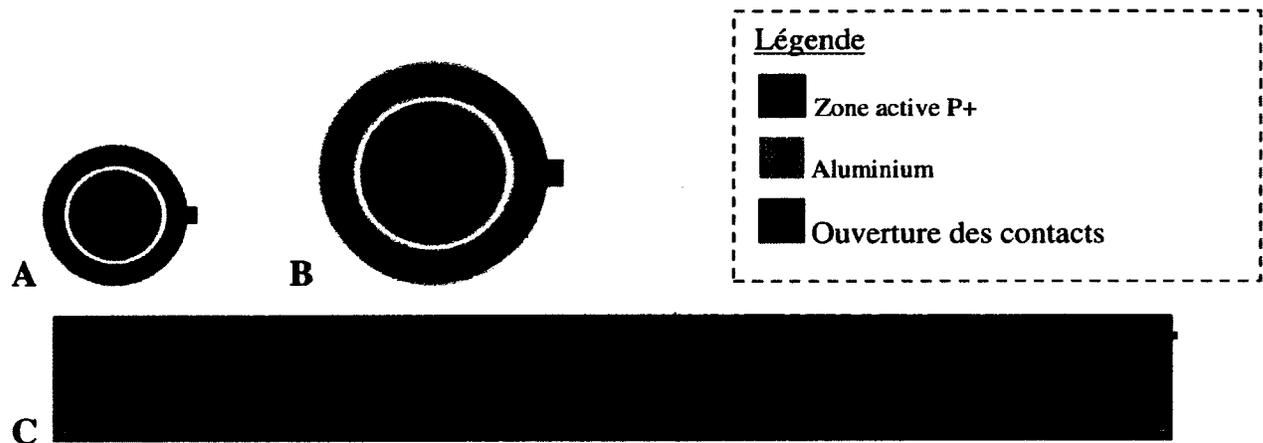


Figure 3.8 : Premières structures de type PIN conçues et réalisées au CRN². A : Région active ronde (diamètre 1 mm), B : Région active ronde (diamètre 2 mm), C : Région active rectangulaire (3 x 30 mm²). Les dimensions ne sont pas à l'échelle.

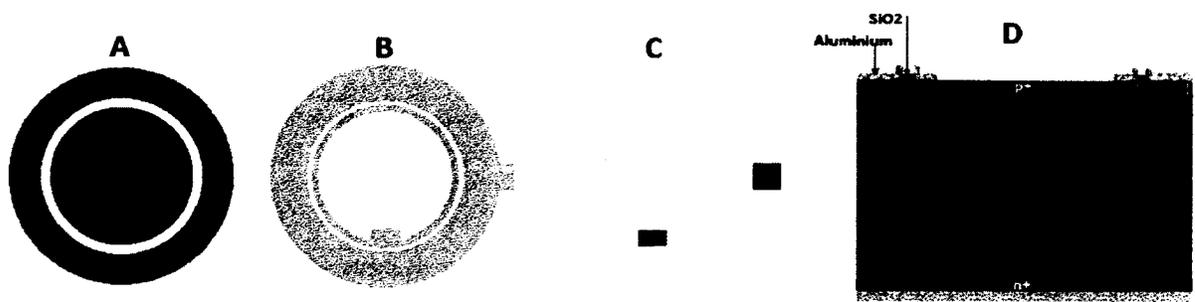


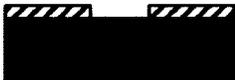
Figure 3.9 : Détails des masques utilisés pour la structure ronde. A : Masque pour zones p+, B : Masque pour aluminium, C : Masque pour ouverture des contacts après passivation et D : vue de coupe du procédé final.

3.3.2 Procédé de fabrication

Les substrats utilisés pour ce premier procédé de fabrication sont des gaufres de silicium 75 mm de la marque Topsil ($\langle 111 \rangle$, polie sur une face, type n, 6,7 à 25 k Ω -cm) et des gaufres de silicium 75 mm de la marque Atomergic ($\langle 111 \rangle$, polie sur 2 faces, haute résistivité). On retrouve au Tableau 3.4 les principales étapes du procédé de fabrication réalisé au CRN².

Une encapsulation très rudimentaire a été réalisée sur certains échantillons. Des diodes rondes ont été assemblées dans des boîtiers à montage de surface du commerce avec contact en or et des diodes rectangulaires sur un petit PCB avec pistes en cuivre. La face arrière des échantillons a été reliée au boîtier ou au PCB à l'aide de pâte d'argent à un contact électrique constituant la cathode. L'anneau de garde et la région active P+ ont été connectés par microsoudure à leur contact électrique respectif. L'anneau de garde était relié à la cathode et la région active à l'anode.

Tableau 3.4 : Premier procédé conçu et réalisé au CRN².

Type	Note	Illustration
1. Oxydation thermique humide et gravure humide face arrière	1050 °C (70 min) 700 nm	
2. Ouverture des régions actives		
3. Implantation bore (face avant)	$8.10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 10 keV puis $8.10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 35 keV	 p+
4. Implantation phosphore (face arrière)	$8.10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 30 keV puis $8.10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 90 keV	 p+ n+
5. Activation des dopants	900 °C, N ₂ (1h35)	
6. Dépôt aluminium, photolithographie et gravure chimique sur face avant	0,25 µm	 p+ n+
7. Dépôt aluminium face arrière	0,25 µm	 p+ n+
8. Recuit d'alliage aluminium-silicium	450 °C, 80 % N ₂ , 20 % H ₂	
9. Passivation nitrure et ouverture des contacts	Sur quelques structures seulement	 p+ n+

Légende:  Silicium,  SiO₂,  Nitrure,  Aluminium, ●●● Région dopée

3.3.3 Performances obtenues

Les principales caractéristiques électriques des dispositifs réalisés lors du premier procédé de fabrication au CRN² se retrouvent au Tableau 3.5. La capacité C et le courant d'obscurité $I_{obscurité}$ en polarisation inverse ont été mesurés à l'aide d'une station sous pointe reliée à un SMU Keithley 4200. Les contacts ont été faits directement sur les régions en aluminium de l'échantillon (anode face avant et cathode face arrière). L'anneau de garde a été laissé flottant. L'épaisseur de la zone de déplétion W (m) et la concentration en porteurs minoritaires de la gaufre N (cm⁻³) ont été calculées à partir des Équations 3.11 et 3.12.

$$W = \frac{\epsilon_{Si} \times S}{C} \quad (3.11)$$

$$N = \frac{2}{q \times \epsilon_{Si} \times \alpha} \quad (3.12)$$

où ϵ_{Si} est la permittivité absolue du silicium (1.10^{-10} Fm⁻¹), S est la surface active de la photodiode (m²), C est la capacité mesurée en polarisation inverse (F), q est la charge élémentaire de l'électron ($1,6.10^{-19}$ C) et α est la pente de la courbe S/C^2 (m²/F²) prise entre -5 et -15 V (zone la plus stable).

Tableau 3.5 : Performances obtenues lors du premier procédé de fabrication réalisé au CRN².

Échantillon	C à 30 V (F)	W à 30 V (m)	N (cm ⁻³)	S (cm ²)	$I_{obscurité}$ (nA) V (-40V)	$I_{obscurité}/S$ (nA/cm ²) V (-40V)
Non encapsulé						
Substrat Atomergic Ronde 1mm	$2,99.10^{-12}$	$1,04.10^{-04}$	$5,05 .10^{13}$	$7,85.10^{-03}$	5,46	695
Substrat Atomergic Ronde 1mm Avec nitrure	-	-	-	$7,85.10^{-03}$	18,3	$2,33.10^{03}$
Substrat Topsil Ronde 1mm	$2,55.10^{-12}$	$1,21.10^{-04}$	$2,01.10^{13}$	$7,85.10^{-03}$	167	$2,13.10^{04}$
Encapsulé						
Substrat Topsil Ronde 1mm	$3,38.10^{-12}$	$9,28.10^{-05}$	$4,34.10^{13}$	$7,85.10^{-03}$	$2,19.10^{05}$	$2,79.10^{07}$
Substrat Topsil Ronde 2mm	$4,42.10^{-12}$	$2,89.10^{-04}$	$2,71.10^{12}$	$3,14.10^{-02}$	$5,89.10^{07}$	$1,88.10^{09}$
Substrat Topsil Rectangulaire	$4,08.10^{-11}$	$2,26.10^{-04}$	$3,83.10^{12}$	0,9	$6,86.10^{04}$	$7,62.10^{04}$

3.3.4 Recommandations

Le niveau de courant de fuite est élevé par rapport aux contraintes émises en début du projet. Afin de réduire le bruit électronique, plusieurs recommandations ont été émises.

Substrat : Privilégier l'utilisation de substrats de silicium de très haute qualité afin de maximiser la durée de vie des porteurs et minimiser le courant de fuite du substrat, ainsi que l'orientation <100> pour minimiser le courant de fuite en surface.

Oxydation : Utiliser un procédé de croissance sèche au lieu d'humide pour l'oxyde de champ afin d'améliorer les propriétés en surface de la région active. Réaliser une deuxième oxydation sèche de plus courte durée dans les zones actives avant l'implantation au bore. Cette couche de SiO₂ permettrait de protéger les zones actives et de réduire la quantité de défauts créés en surface par l'implantation et peut être retirée au besoin.

Implantation : Augmenter la dose d'implantation des zones p+ et n+ afin d'obtenir une jonction PIN plus abrupte et un plus fort champ électrique, ainsi que des meilleurs contacts électriques. Réaliser le recuit d'activation à plus haute température, afin de réparer plus de défauts créés suite à l'implantation et d'activer une plus grande proportion de dopants, ainsi qu'à durée moindre, afin de diminuer la diffusion des impuretés.

Passivation : Passiver la région active avec la couche d'aluminium afin d'améliorer les propriétés en surface et de filtrer la lumière visible. Une couche de nitrure déposée sur l'aluminium permettrait d'augmenter la dureté et la stabilité à long terme.

Piège à contaminants : Intégrer au procédé de fabrication la déposition d'une couche de polysilicium sur la face arrière de la gaufre. Le procédé in situ n'est cependant pas disponible au CRN² et une recherche préliminaire rejette l'utilisation de ressources extérieures pour effectuer cette étape pour des raisons de coût. La suggestion d'utiliser l'implantation ionique disponible au CRN² à la place du dopage in situ a été proposée afin de réaliser le dopage de la couche de polysilicium.

3.4 Choix des paramètres de conception

Deux procédés de fabrication ont été élaborés et réalisés dans les infrastructures du CRN² dans le cadre de ce projet de maîtrise. Dans cette section seront rapportées les structures utilisées, ainsi que les principales étapes du procédé réalisé lors de la première itération.

3.4.1 Paramètres structuraux et procédé de fabrication

Plusieurs paramètres de conception des photodiodes ont été choisis en fonction des données présentées précédemment. La stratégie principale a été d'utiliser le procédé de fabrication réalisé pour une première fois au CRN² et de l'adapter en fonction des diverses recommandations et des éléments de conception énoncés. Les prochaines sections décrivent brièvement les choix de conception.

Substrat

Les substrats à haute résistivité disponibles au CRN² ont été choisis pour des raisons de simplicité et de coûts. Il s'agit des substrats de la marque Topsil avec les caractéristiques suivantes : orientation cristalline <111>, polie sur une face, type n, 6,7 à 25 kΩ-cm.

Avec ce type de substrat et la résistivité minimum théorique (~6 kΩ-cm), la polarisation nécessaire pour obtenir une zone de déplétion sur une épaisseur de 300 μm (environ l'épaisseur totale de la gaufre) correspond à environ -40 V selon l'Équation 3.3. Cette valeur de polarisation est très facilement envisageable dans un système portable d'échantillonnage.

Avec une zone de déplétion de 300 μm d'épaisseur (obtenu avec une polarisation de -40 V et plus sur un substrat de 300 μm), la capacité de jonction d'une photodiode de 3 x 30 mm² s'estime à 30 pF, ce qui est comparable à la capacité de 40 pF des détecteurs Hamamatsu utilisés dans le compteur μvolumétrique (voir section 1.1.2 **Projet de compteur sanguin μvolumétrique (CSμ)**).

Comme il a été vu précédemment, la réponse en fréquence d'une structure PIN *fully-depleted* peut être estimée par le temps de transit des porteurs. Avec une zone de déplétion de 300 μm , à une polarisation de -40 V et où la mobilité des porteurs est limitée à $450\text{ cm}^2/\text{Vs}$ (mobilité des trous dans un substrat de silicium de haute résistivité), le temps de transit s'estime à environ 5 ns selon l'Équation 3.7, ce qui est amplement suffisant pour notre application.

Oxyde de champ et passivation de la région active

Il a été suggéré d'utiliser la croissance sèche au lieu d'humide pour l'oxyde de champ (isolation entre les dispositifs) afin d'obtenir une meilleure qualité d'oxyde. Cependant, l'épaisseur d'oxyde minimale pour réaliser une bonne isolation, un masque de gravure et d'implantation efficace nécessite une longue durée (5 heures à $1100\text{ }^\circ\text{C}$ pour 300 nm). Il n'est pas certain que cette option sera la plus profitable, car une étape haute température est propice à la diffusion d'impuretés menant à la contamination. Puisque le bénéfice d'obtenir un oxyde de meilleure qualité n'étant pas nécessairement suffisant à contrecarrer les désavantages, les deux options ont été testées dans cette itération.

Au niveau de la région active, une seconde croissance thermique (sèche dans ce cas) a été utilisée pour former une couche de 100 nm d'oxyde comme protection avant l'implantation. Cette couche a été conservée comme passivation sur la région active sur certaines gaufres, alors que, sur d'autres, cette couche de protection a été enlevée après l'implantation afin de tester différents matériaux de passivation. Dans les références, l'aluminium et le SiO_2 ont tous deux donné de bons résultats au niveau de la passivation de la région active. Cependant, certains utilisent du SiO_2 cru [Han et al., 2002] et d'autres du SiO_2 déposé PECVD [Kim et al., 2008]. Toutes ces options ont été testées afin de déterminer quelle passivation est la plus performante pour notre procédé. En résumé, les types de passivation testés lors de cette nouvelle itération apparaissent au Tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Types de passivation testés sur la région active des diodes PIN.

Matériau utilisé pour la passivation et illustration		
$\text{SiO}_2_{\text{cru}}$	Al	$\text{SiO}_2_{\text{cru}} + \text{Al}$
$\text{SiO}_2_{\text{PECVD}}$	Al	$\text{SiO}_2_{\text{PECVD}} + \text{Al}$

Légende: Silicium, $\text{SiO}_2_{\text{cru}}$, $\text{SiO}_2_{\text{PECVD}}$, Aluminium, ●●● Région dopée

Dopage

Les doses et énergies des implantations ont été augmentées par rapport au procédé initial réalisé au CRN². Dans la littérature, trois références avaient recours à l'implantation comme technique de dopage et deux sur trois utilisaient des doses égales ou supérieures à $5.10^{15} \text{ cm}^{-2}$ [Kim et al., 2008] [Han et al., 2002] [Zhou et al., 1996]. Les doses pour le bore et pour le phosphore ont ainsi été fixées à $5.10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Les énergies d'implantation ont été modifiées en fonction de la nouvelle couche de protection en SiO_2 cru thermiquement. Les profils d'implantation et de diffusion ont été simulés avec Microtech et il fût déterminé que des énergies de 40 keV (bore) et 140 keV (phosphore) permettaient d'obtenir le maximum de dopant à la surface du silicium (à l'interface avec le SiO_2) et donc de meilleurs contacts électriques.

Activation des dopants

Suite au procédé initial, il a été suggéré d'utiliser une température plus élevée et une durée plus faible pour l'activation des dopants. Au niveau des références, les choix diffèrent (recuits entre 600 et 1100 °C). Deux options ont ainsi été retenues. La première consiste à utiliser la

durée et la température d'activation standards pour le procédé NMOS conçu au CRN², soit 30 minutes à 950 °C. La deuxième correspond à tester l'option RTA, utilisé par une référence [Han et al., 2002]. Cette option semble prometteuse, car elle permet des jonctions très abruptes et une faible durée de diffusion pour les contaminants.

Piège à contaminant

Dans la littérature, l'option d'ajouter une couche de polysilicium dopé n+ sur la face arrière a été plusieurs fois utilisée pour diminuer le courant de fuite. Dans cette itération, un procédé de déposition de polysilicium LPCVD et ensuite dopage par implantation a été comparé à un procédé sans polysilicium, c'est-à-dire avec implantation directement dans le silicium du substrat.

Étant donné que le polysilicium est dopé par implantation plutôt qu'In situ, il est préférable de choisir une épaisseur de couche à travers laquelle il sera possible d'obtenir une concentration de dopants relativement homogène. Il a été mentionné dans une publication [Holland et al., 1997] que même une épaisseur de polysilicium réduite à 10 nm permet d'obtenir un courant de fuite très faible ($\sim 0,3 \text{ nA/cm}^2$). Comme compromis, une épaisseur de 400 nm a été choisie.

En résumé, tous les choix de paramètres structuraux évalués dans cette itération en fonction du numéro de gaufre apparaissent au Tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Tests réalisés durant la première itération.

Tests	Gaufre E	Gaufre F	Gaufre G	Gaufre H
a. Couche de polysilicium	X	X		
b. Rien			X	X
a. Oxydation sèche (300 nm)				X
b. Oxydation humide (600 nm)	X	X	X	
a. Four standard	X			
b. RTA		X	X	X
a. SiO ₂ cru	X	X	X	X
b. SiO ₂ PECVD	X	X	X	X
c. Aluminium	X	X	X	X
d. Aluminium + SiO ₂ cru	X	X	X	X
e. Aluminium + SiO ₂ PECVD	X	X	X	X

Procédé de fabrication

Le procédé de fabrication complet est détaillé à l'Annexe A. Les principales étapes apparaissent cependant au Tableau 3.8.

Géométries

Plusieurs géométries ont été conçues en fonction des besoins du projet et de différents paramètres à évaluer. Il est à noter que toutes les géométries comportent des coins arrondis. Les géométries élaborées sont détaillées à l'Annexe B.

Tableau 3.8 : Procédé de fabrication de la première itération.

Type	Note	Illustration
1. Oxydation thermique a. Humide b. Sèche et gravure humide face arrière	a) 1050 °C (67 min) 700 nm b) 1100 °C (5 h) 250 nm	
2. Dépôt PolySi sur face arrière (sur gaufre E et F seulement)	0,4 µm	
3. Ouverture des régions actives		
4. Oxydation thermique sèche	1100 °C (46 min) 1 µm	
5. Implantation au bore (face avant)	$5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 40 keV	
6. Implantation au phosphore (face arrière)	$5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 140 keV	
7. Activation des dopants a. Four standard b. RTA	a) 950 °C (30 min) b) 1050 °C (1 min)	
8. Passivation a. Conservation de l'oxyde cru b. Gravure chimique de l'oxyde cru et dépôt PECVD de SiO ₂		
9. Dépôt Aluminium sur la face avant et arrière et gravure chimique	0,25 µm	
10. Recuit d'alliage silicium aluminium	450 °C (30 min)	

3.5 Conclusion

Ce chapitre a décrit les éléments théoriques et pratiques menant à la conception et à la fabrication du dispositif de détection.

La première section était consacrée à la description des éléments théoriques clés se rapportant à la conception et à la fabrication de photodiodes, tels que la sensibilité, la capacité, la bande passante, le courant d'obscurité, ainsi que la contamination associée au procédé de fabrication.

La deuxième section était dédiée à la présentation d'exemples de structures et de procédés de fabrication existants dans la littérature pour des applications semblables. Les étapes principales d'un procédé de fabrication de photodiode PIN ont d'abord été présentées. Ensuite, six différents procédés et leurs points d'intérêts ont été répertoriés de la littérature.

La troisième section a rapporté les étapes de fabrication de détecteurs conçus et réalisés antérieurement au CRN², les résultats alors obtenus, ainsi que les recommandations énoncées par la suite.

La quatrième et dernière section a conclu le chapitre en énonçant les paramètres de conception choisis pour le présent projet de recherche, tels que les paramètres structuraux, le procédé de fabrication et, finalement, les géométries.

CHAPITRE 4 - PERFORMANCES DES PHOTODIODES

Ce chapitre est consacré à l'analyse des résultats obtenus au niveau du premier objectif du projet, c'est-à-dire, la réalisation du dispositif de détection. Les deux premières sections de ce chapitre décrivent la méthode de caractérisation des détecteurs utilisée et l'analyse des résultats obtenus suite à la fabrication de la première série de prototypes. Ensuite, la troisième section énonce les modifications apportées à la conception des détecteurs afin de produire une deuxième itération de fabrication. Enfin, le chapitre rapporte les résultats obtenus de cette dernière itération.

4.1 Méthode de caractérisation des prototypes

La première étape de la caractérisation correspond à mesurer le courant de fuite et la capacité en obscurité, en fonction de la tension de polarisation. Cette mesure permet de réaliser une première comparaison des diodes, car un courant de fuite ou une capacité trop élevée rend automatiquement une photodiode inutilisable comme détecteur.

Procédure de caractérisation en noirceur

1. La gaufre est posée sur une plaque métallique. Un contact électrique est fait en appliquant une succion entre les deux (à l'aide d'une pompe). Comme il a déjà été énoncé, le dessous de la gaufre correspond à la cathode commune à toutes les diodes.
2. Une pointe est placée sur un contact avant (anode de la diode) et une autre pointe sur un deuxième contact avant (anneau de garde) lorsque nécessaire.
3. Les contacts électriques sont reliés à trois canaux SMU (*Source Measure Units* ou unité de mesure et source) d'un appareil Keithley 4200. Ce type d'appareil permet de générer une tension et de mesurer un courant sur la même ligne électrique.
4. Le tout est placé dans une boîte métallique noire où la lumière ambiante est coupée.
5. Un logiciel programmable permet de générer la tension voulue aux bornes de la diode, de mesurer ensuite le courant, la capacité ou la résistance et finalement de compiler les données.

La procédure est schématisée à la Figure 4.1.

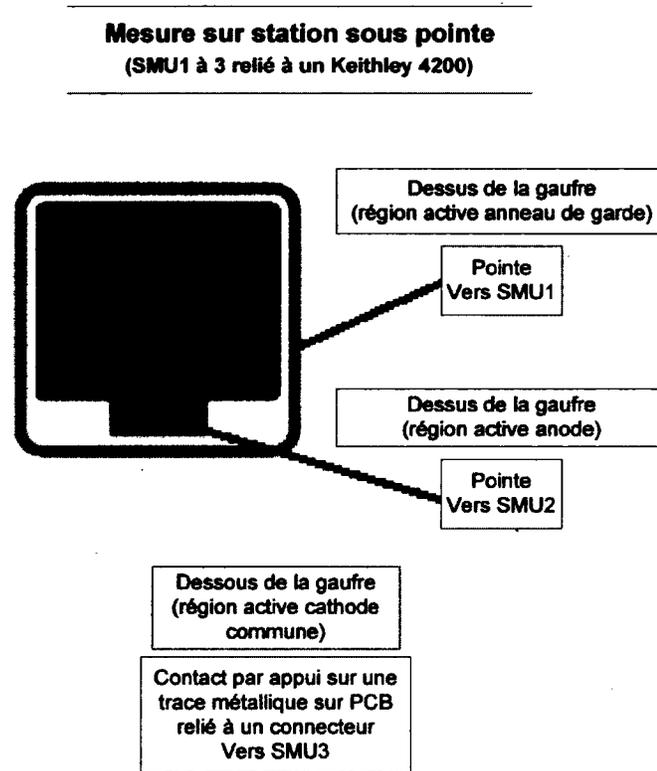


Figure 4.1 : Schéma illustrant la procédure de caractérisation en noirceur.

4.2 Résultats et discussion (première itération)

4.2.1 Résultats globaux

Quelques structures ont été évaluées sur chaque gaufre. Les prochaines sections comparent les résultats obtenus sur les gaufres E, F, G et H.

Polarisation directe

En polarisation directe, les courbes IV obtenues avec la gaufre E sont comparables à la courbe théorique d'une jonction PN, c'est-à-dire, une conduction apparaissant autour d'une tension entre 0 et 2 V. Les courbes IV en polarisation directe de diverses structures présentes sur la gaufre E apparaissent à la Figure 4.2.

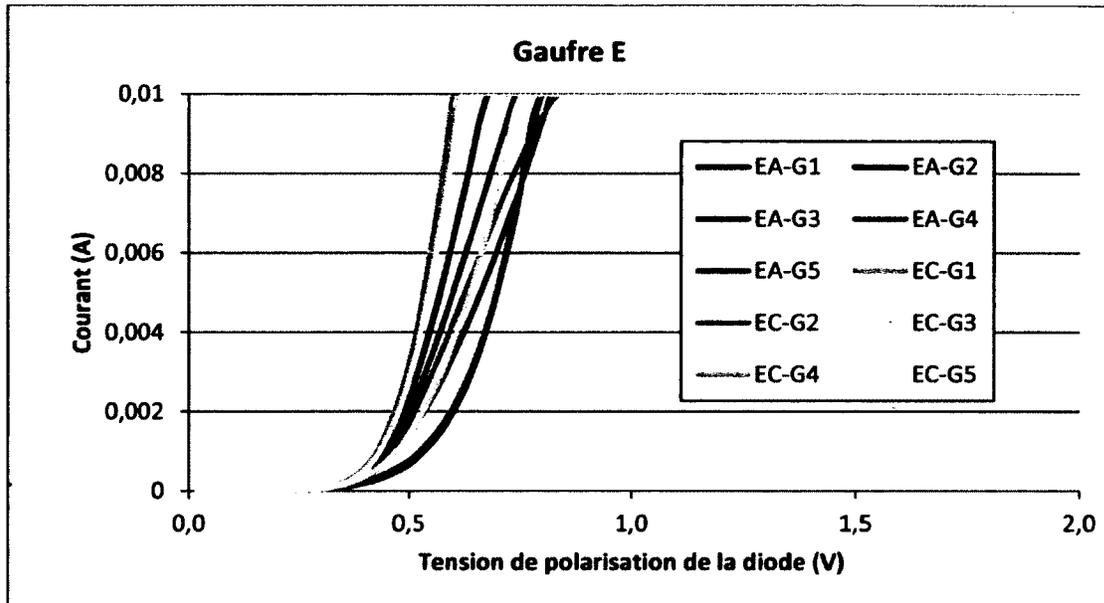


Figure 4.2 : Courant en fonction de la polarisation en direct sur la gaufre E. Durant les mesures réalisées sur ces gaufres, le courant était limité à 10 mA.

Pour leur part, les courbes IV en polarisation directe obtenues avec les gaufres F, G et H sont similaires à des droites. Les courbes IV en polarisation directe de diverses structures présentes sur ces gaufres apparaissent à la Figure 4.3. Elles ne présentent pas le même comportement redresseur que celles apparaissant à la Figure 4.2, typique d'une jonction PN. Une droite est attribuable à une simple résistance, plutôt qu'une jonction PN. Cette caractéristique est un indice que les structures sur ces gaufres comportent un défaut de fabrication.

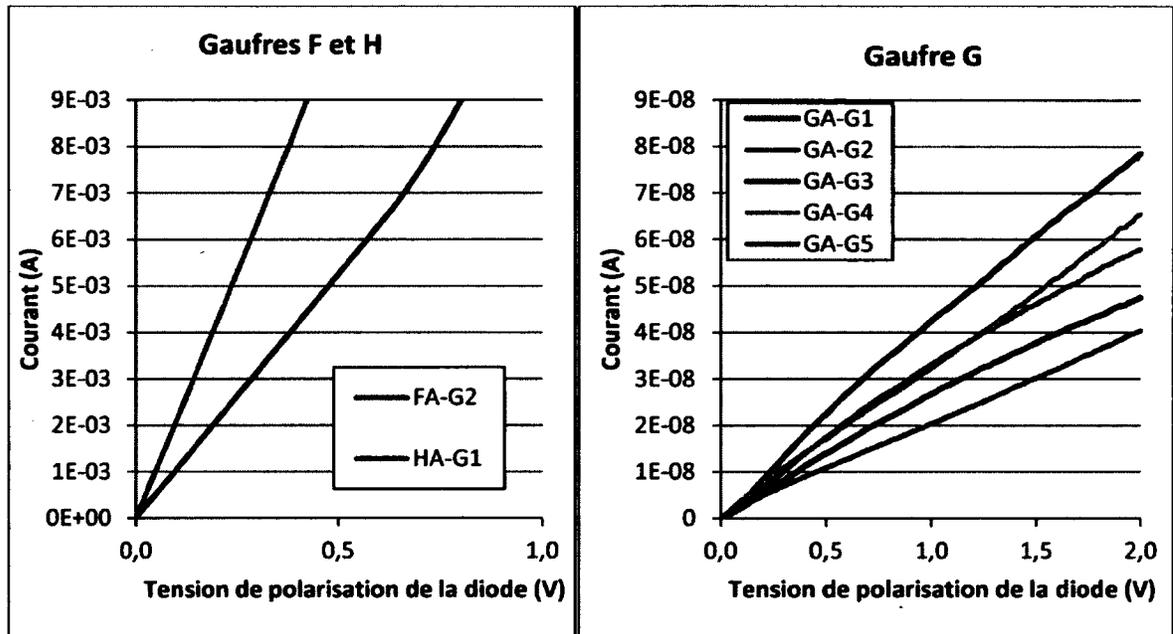


Figure 4.3 : Courant en fonction de la polarisation en direct sur les gaufres F, G et H. Durant les mesures réalisées sur ces gaufres, le courant était limité à 10 mA.

Polarisation inverse

Les courbes IV en polarisation inverse de diverses structures présentes sur la gaufre E apparaissent à la Figure 4.4. Les courbes IV de diverses structures présentes sur les gaufres F-G-H apparaissent à la Figure 4.5.

En polarisation inverse, les courbes IV obtenues avec la gaufre E sont comparables à la courbe théorique d'une jonction PN, c'est-à-dire qu'il est possible d'observer une saturation du courant en inverse. Sur les gaufres F-G-H, la saturation n'a pas été observée, de 0 à -35 V (la saturation à 10 mA est artificielle, car elle correspond à la limite de sécurité imposée au système de mesure). Il s'agit encore une fois du comportement typique d'une résistance plutôt que d'une jonction PN. De plus, le courant est beaucoup plus élevé que le courant mesuré sur la gaufre E. Ces caractéristiques sont des indices que les structures sur ces gaufres comportent un défaut de fabrication.

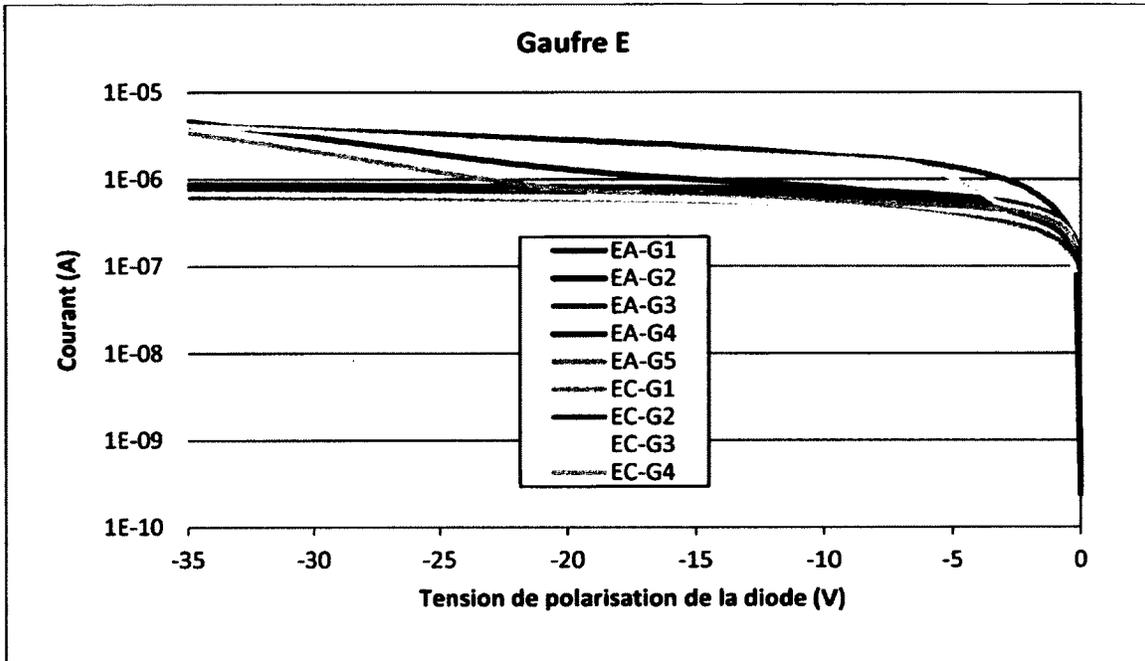


Figure 4.4 : Courant en fonction de la polarisation inverse sur la gaufre E.

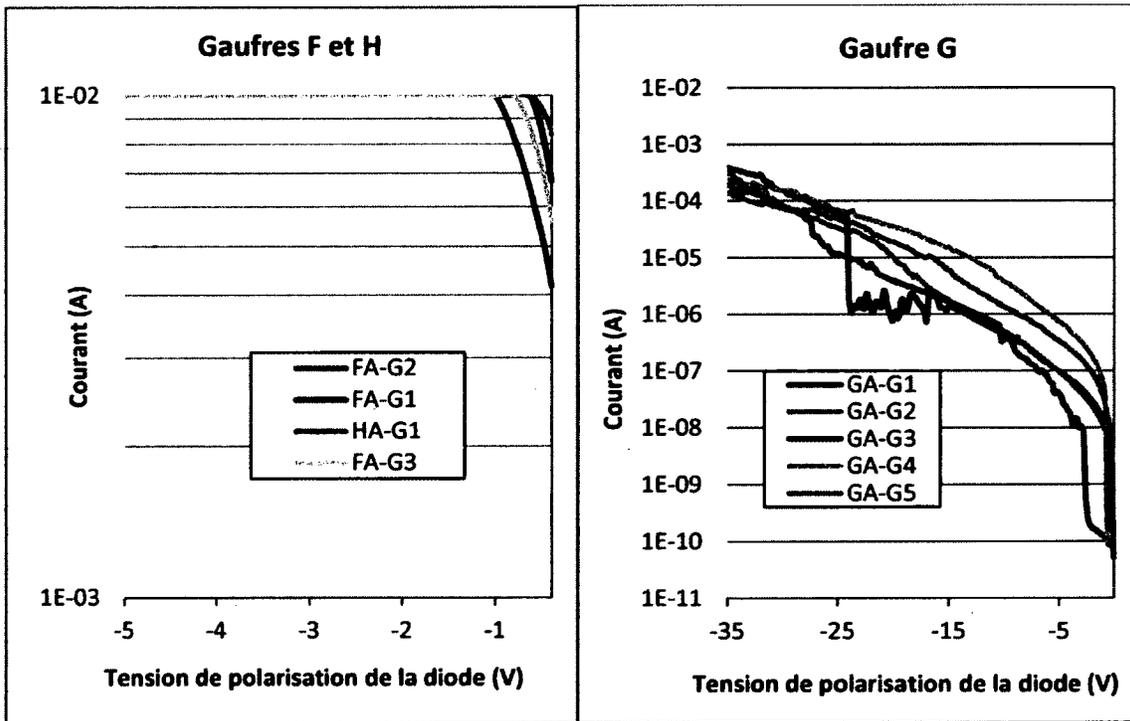


Figure 4.5 : Courant en fonction de la polarisation inverse sur les gaufres F, G et H. Durant les mesures réalisées sur ces gaufres, le courant était limité à 10 mA.

Capacité

La capacité a été mesurée en fonction de la polarisation sur les différentes gaufres. Quelques courbes CV en polarisation inverse de structures présentes sur la gaufre E apparaissent à la Figure 4.6. Il fût impossible d'obtenir une mesure valide de la capacité des structures présentes sur les gaufres F, G et H.

Sur la gaufre E, la capacité des structures adaptées à l'intégration aux microcanaux (surface active: $30,7 \text{ mm}^2$) a été mesurée. Elle sature aux environ de 15 pF (à -30 V). Selon l'Équation 3.5, la capacité estimée pour une telle surface, à une polarisation de -30 V et une résistivité de $6 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ est environ $\sim 14 \text{ pF}$, ce qui est près de la valeur mesurée. Sur les gaufres F, G et H, la capacité de ces structures sature à des valeurs variant entre 5 nF et 100 pF (à -30 V). Ces valeurs indiquent que les structures n'ont pas le comportement de jonctions PN standards.

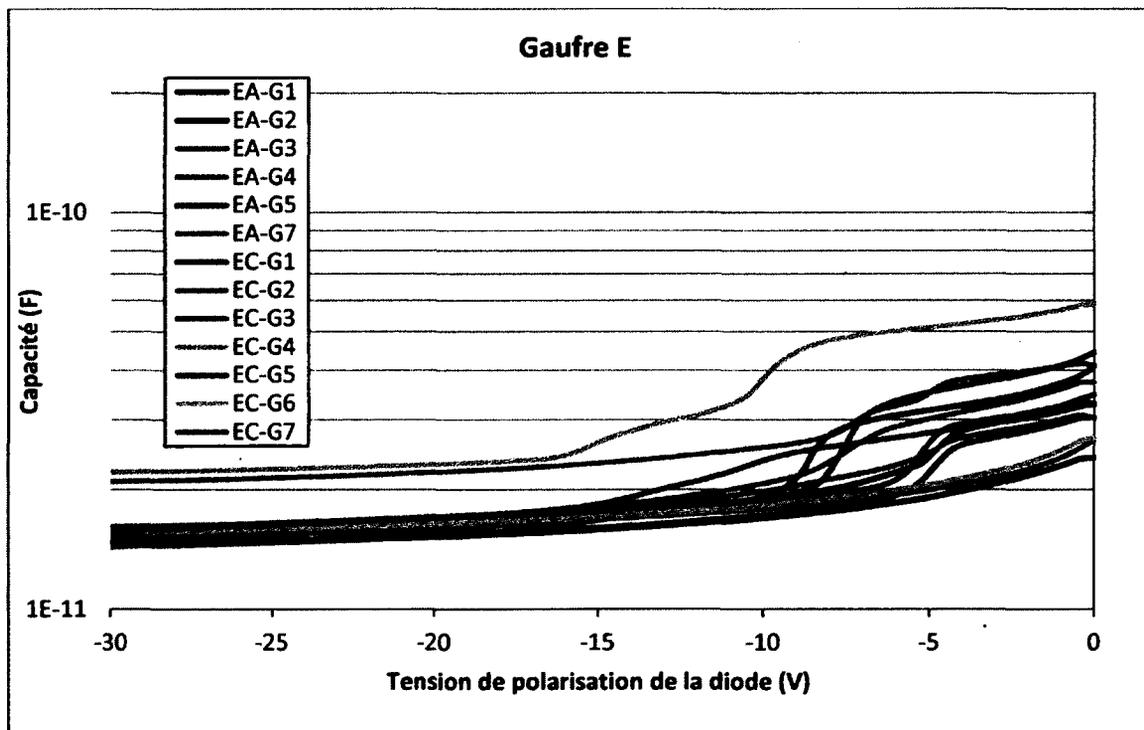


Figure 4.6 : Capacité en fonction de la polarisation inverse sur la gaufre E.

Résistance de feuille

La résistance de feuille de la zone P+ a été mesurée sur les gaufres E et F à titre de comparaison sur des structures de test. Ce type de structure permet une mesure de la résistance de feuille avec la méthode à quatre pointes. La résistance mesurée en ohms est répartie sur huit carrés. Sur la gaufre E, la résistance de feuille (R_s) est de 60 Ω par carré et sur la gaufre F, R_s est égale à 18 Ω par carré. Il apparaît donc que le procédé RTA permet un dopage plus élevé.

Résultats globaux

Trois gaufres sur quatre n'ont pas fourni de courbes IV-CV standards, comme celle apparaissant à la Figure 2.6. En conclusion, la seule gaufre fonctionnelle est la gaufre E (couche de polysilicium, oxydation humide pour l'oxyde de champ, activation des dopants par fournaise standard). Les structures présentes sur les trois autres gaufres ne présentent pas le comportement typique de jonctions PN et ne peuvent ainsi pas être évaluées. La section suivante décrit des causes possibles de ce comportement atypique.

4.2.2 Analyse du problème avec RTA

Les trois gaufres problématiques ont en commun le recuit RTA. Comme il a été vu au chapitre 3, ce type de recuit thermique rapide peut être utilisé au même titre qu'un recuit dans une fournaise standard afin d'activer les dopants et de réparer les dommages causés par l'implantation ionique. Cependant, le processus de diffusion des dopants est beaucoup moins long dans un recuit RTA et la couche fortement dopée se retrouve majoritairement en surface du substrat. Cette option avait justement été considérée afin de réduire les zones mortes correspondant aux zones fortement dopées et afin de maximiser la sensibilité du détecteur. Le désavantage est qu'une zone dopée très étroite en surface d'un semiconducteur est susceptible aux effets de surface induits par le procédé de fabrication et au court-circuitage de la jonction par un mauvais contrôle de certaines étapes du procédé. Un exemple de court-circuit apparaît à la Figure 4.7.

Les résistances de feuille mesurées sur les gaufres E et F suggèrent que le dopage et l'activation des dopants ont fonctionné dans les deux cas. Cependant, les courbes IV et CV mesurées sur les gaufres problématiques suggèrent le comportement d'une résistance électrique plutôt que celui d'une jonction PN. Le substrat correspond à un bloc de silicium d'une épaisseur et d'une résistivité donnée, ce qui est l'équivalent électrique d'une résistance. Ainsi, en présence d'un court-circuit, le signal électrique mesuré aux bornes de la structure sera en fait mesuré aux bornes du substrat plutôt qu'aux bornes de la jonction PN et ce, même si la zone P+ est adéquatement dopée. L'hypothèse de court-circuit de la jonction est donc plausible dans le cas présent.

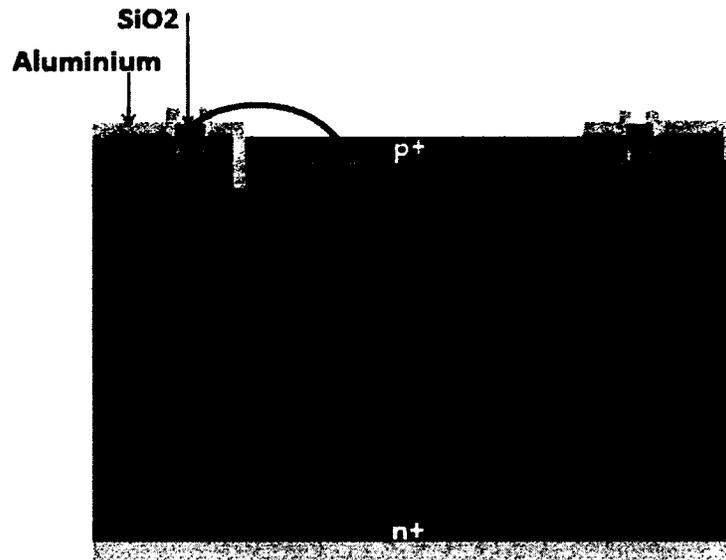


Figure 4.7 : Exemple de court-circuit possible dans une jonction PN.

Métallisation avec aluminium pur sur silicium

Une des étapes du procédé susceptibles d'avoir causé le court-circuit des jonctions RTA est la métallisation de la face avant des gaufres. Le procédé de métallisation utilisé est l'évaporation de 250 nm d'aluminium pur à la surface du silicium, suivi d'une étape de recuit d'alliage de 30 minutes à 450 °C.

En effet, une des limitations de la métallisation avec aluminium pur est la dissolution du silicium dans la couche d'aluminium, qui est pourtant nécessaire afin d'obtenir un contact ohmique [Pramanik et al., 1983]. Sous l'effet de la température, une certaine quantité d'atomes de silicium diffuse vers l'aluminium, jusqu'à saturation de celui-ci. Le silicium dans la région de contact est consommé et remplacé par de l'aluminium, sur une certaine distance Z , qui dépend de plusieurs paramètres, dont la densité des couches d'aluminium et de silicium, du coefficient de diffusion du silicium dans l'aluminium, de la largeur de la ligne d'aluminium, etc. Si cette distance Z est plus grande que l'épaisseur de la jonction, ce processus peut mener au court-circuitage de la jonction. Le problème est complexifié par le fait que la dissolution du silicium dans l'aluminium ne s'effectue pas uniformément dans la zone de contact, mais à certains points seulement. La présence de l'oxyde natif, dont

l'épaisseur est inégale sur la surface exposée du silicium accentue cet effet. Le mécanisme de dissolution est illustré à la Figure 4.8.

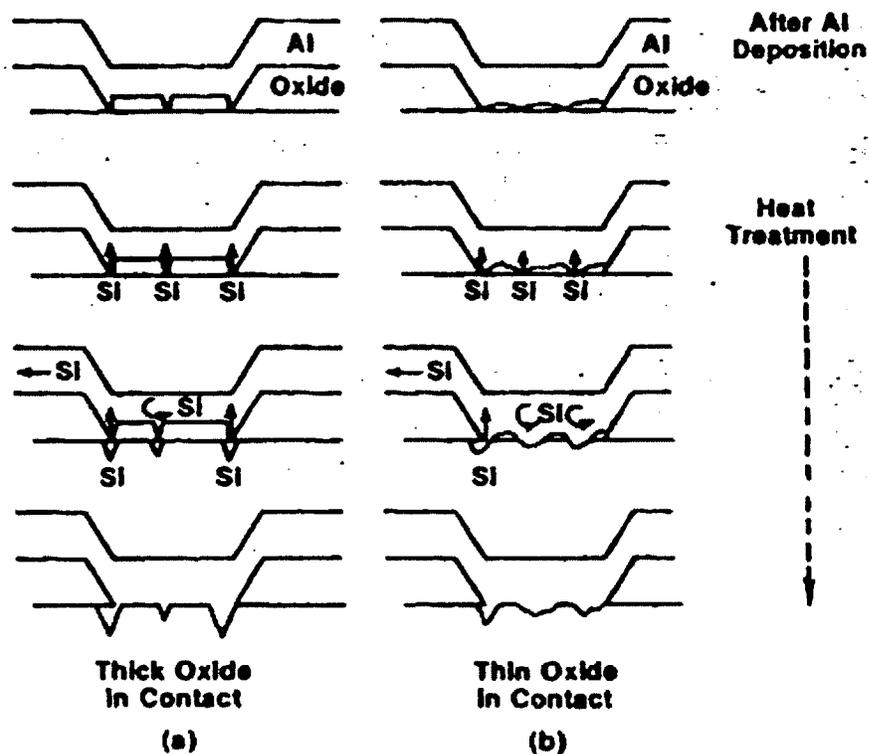


Figure 4.8 : Formation de pointes d'aluminium dans le silicium, à travers une épaisseur d'oxyde de 20Å (a) et à travers une épaisseur d'oxyde de 10Å (b).
(Tiré de [Pramanik et al., 1983])

Les pointes d'aluminium peuvent mesurer plus de 1 μm . Selon des simulations réalisées avec le logiciel Microtech, les zones P+ ne dépassent pas 0,4 μm en profondeur, avec une diffusion réalisée par fournaise standard (il n'est pas possible de simuler un recuit RTA avec ce logiciel). Le profil de dopage simulé avec paramètres de diffusion par fournaise standard apparaît à la Figure 4.9. Il apparaît ainsi plausible que le recuit d'aluminium soit responsable du court-circuitage des jonctions RTA, encore plus étroites que celles formées par diffusion en fournaise standard.

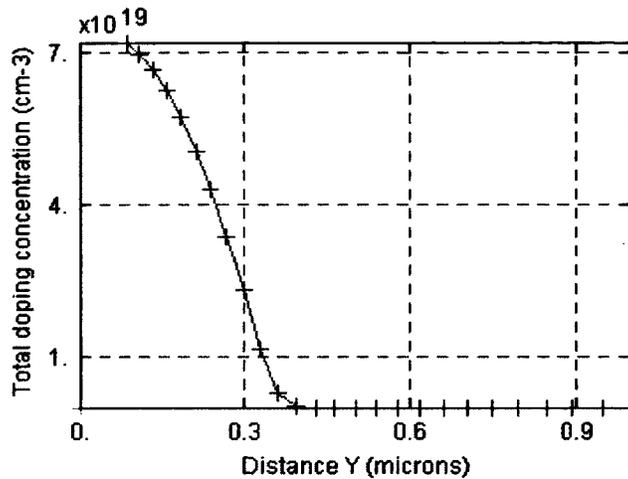


Figure 4.9 : Concentration de dopants (cm⁻³) en fonction de l'épaisseur (μm). Les paramètres de simulation utilisés sont : substrat de silicium, oxydation thermique sèche de 100 nm, implantation au bore avec dose de 2.10¹⁵ cm⁻² à une énergie de 40 keV, recuit à 950 °C pendant 30 minutes.

Le procédé de métallisation utilisé pour cette première itération est le même que celui développé pour réaliser la métallisation des structures NMOS au CRN² et ce type de problème n'est pas survenu auparavant. Cependant, les recuits RTA ne sont pas utilisés dans le procédé de fabrication NMOS, mais plutôt une diffusion en four standard.

Dans l'industrie, l'aluminium utilisé est souvent pulvérisé et additionné d'un certain pourcentage de silicium (ex. Al 99% / Si 1%). Ce pourcentage de silicium dans l'aluminium permet de préalablement saturer le matériau et de réduire ainsi significativement le processus d'interdiffusion entre la couche d'aluminium et le substrat de silicium lors de l'étape de recuit d'alliage.

Recommandations

Il est essentiel de concevoir le profil de dopage de la jonction en tenant compte des risques possibles de dégradation de la jonction en surface du substrat. Avec un procédé utilisant de l'aluminium pur, la recommandation en fonction des résultats obtenus est d'utiliser un recuit dans une fournaise standard, d'au moins 30 minutes, afin d'obtenir une profondeur de jonction suffisante pour pallier aux risques de court-circuitage des jonctions PIN.

De plus, la raison pour laquelle le RTA a été utilisé s'avère, avec le recul, peu avantageuse. La zone fortement dopée en surface est d'environ $0,4 \mu\text{m}$, avec diffusion standard ($950 \text{ }^\circ\text{C}$, 30 minutes). L'utilisation du RTA afin de réduire cette zone morte, dans le but d'augmenter la sensibilité, ne sera pratiquement pas perceptible, puisque le détecteur sera utilisé en mode *fully-depleted*, c'est-à-dire, déserté sur toute l'épaisseur du substrat ($\sim 300 \mu\text{m}$). L'avantage d'utiliser des jonctions étroites s'avère être réel lorsqu'on désire détecter un rayonnement en surface, comme les rayons UV (qui sont absorbés dans les premiers microns de silicium). Dans un cas comme le nôtre, une jonction profonde permettra un procédé de fabrication plus robuste, sans diminuer significativement la sensibilité.

4.2.3 Analyse du fonctionnement de l'anneau de garde

La majorité des structures présentes sur les gaufres fabriquées lors de cette première itération comportent un anneau de garde. Avant de poursuivre l'analyse des résultats, il est important de comprendre l'influence de l'anneau de garde sur les structures, afin d'être en mesure d'évaluer l'impact sur les performances.

Dans la littérature, l'anneau de garde est généralement polarisé à la même tension que la diode, mais il est important de vérifier l'influence de la polarisation de l'anneau sur le courant d'obscurité de la diode. Afin d'évaluer les différents types de polarisation applicables à l'anneau de garde, le courant d'obscurité en fonction de la polarisation de la diode et de l'anneau a été mesuré sur une structure de la gaufre E. Les courbes résultantes apparaissent à la Figure 4.10. La polarisation à 0 V génère le courant d'obscurité le plus élevé, donc cette option est rejetée dans le cadre d'une utilisation pratique. Les trois autres types de polarisation permettent de réduire significativement le courant d'obscurité entre -5 et -30 V . Lorsque l'anneau de garde est polarisé à la même tension que la diode, la courbe se stabilise seulement aux alentours de -10 V . Lorsque l'anneau est polarisé à -15 V , l'anneau est efficace jusqu'à une polarisation de -30 V sur la diode et devient inefficace par la suite. À une polarisation de -35 V sur l'anneau, la courbe est stable sur toute la polarisation de la diode (0 à -35 V).

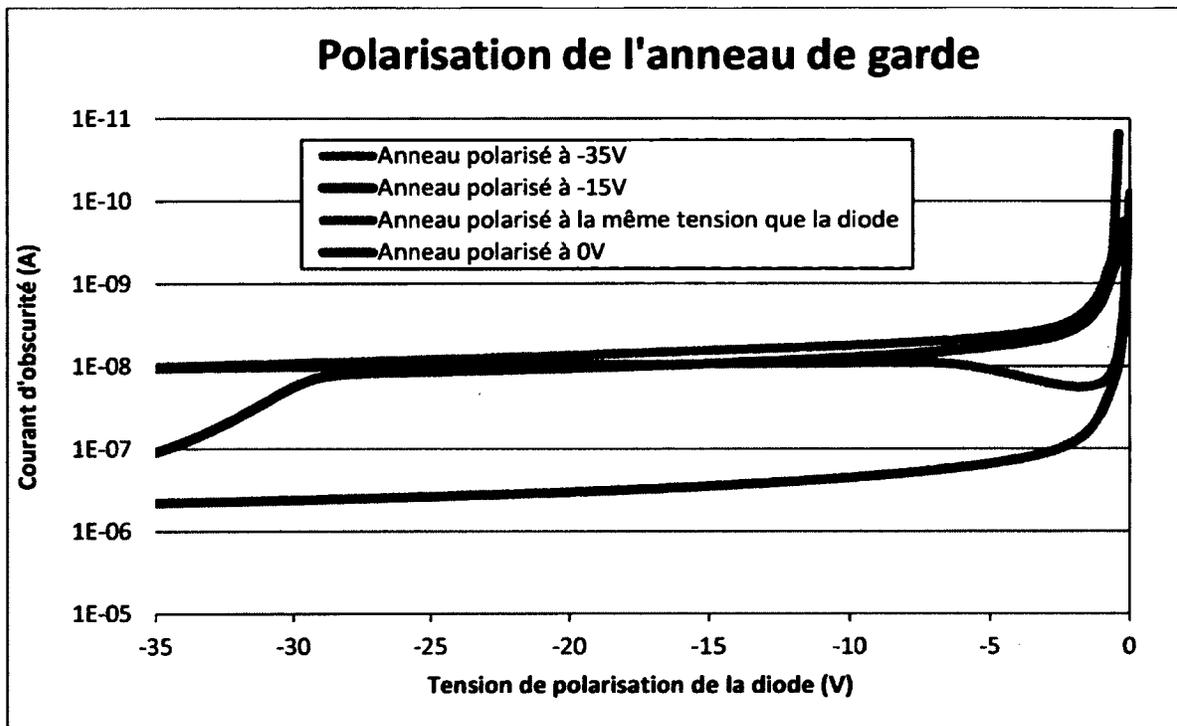


Figure 4.10 : Courbes IV en obscurité obtenues pour diverses polarisations de l'anneau de garde sur une structure de la gaufre E.

En résumé, polariser l'anneau de garde à une tension plus faible (ou plus forte en valeur absolue) que la diode semble être l'option idéale dans le cas d'une utilisation courante. Polariser l'anneau à la même tension que la diode est également fonctionnel, sauf pour une tension d'opération près de 0 V. Ces différents types de polarisation seront abordés plus en détail dans les sections suivantes.

Simulations Taurus Medici

Le logiciel de simulation Taurus-Medici a été utilisé afin de mieux comprendre le comportement de diodes PIN en fonction du branchement de l'anneau de garde. Quelques résultats obtenus en pratique ont été comparés aux résultats obtenus en simulations. En plus des courbes IV, des simulations 2D des photodiodes PIN ont été réalisées. Dans ce type de simulations, il est possible d'y afficher visuellement les zones de déplétion, la valeur du potentiel électrique et la direction du courant électrique. Les prochaines sections décrivent les simulations réalisées.

Afin de bien visualiser le type de structure simulé, un modèle électrique en vue de coupe de la région active et de l'anneau de garde apparaît à la Figure 4.11.

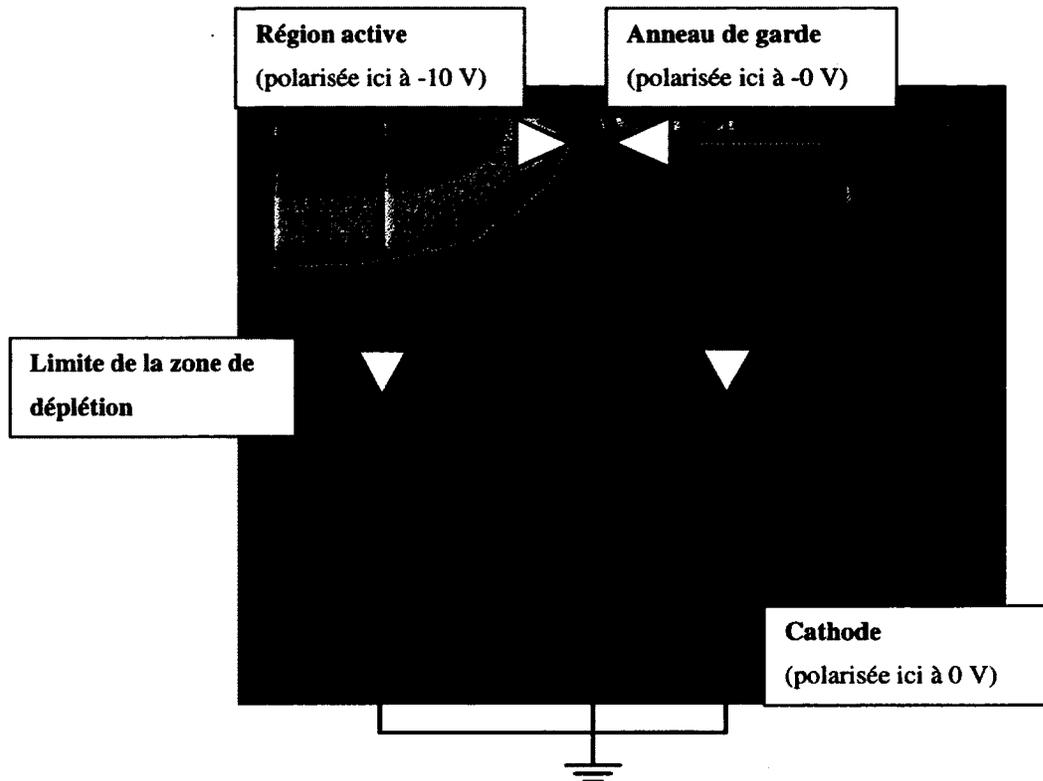
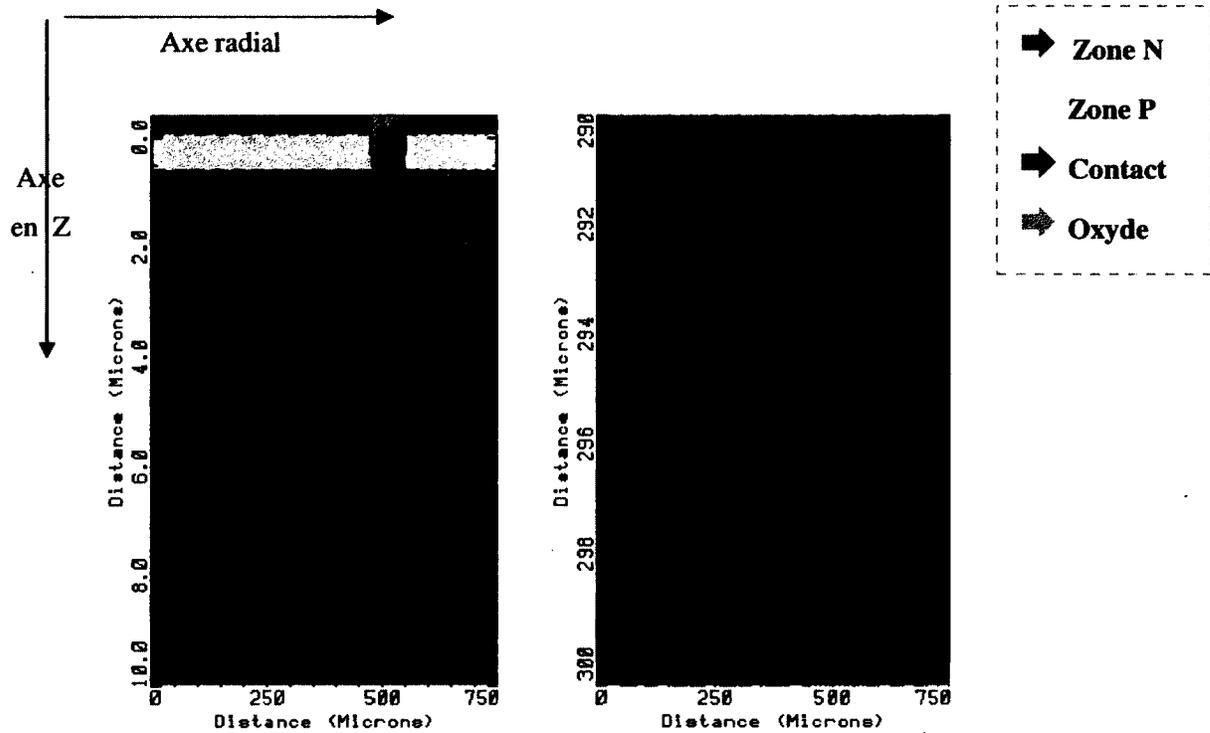


Figure 4.11 : Modèle électrique sur vue 2D en coupe d'une photodiode PIN avec anneau de garde et champ électrique simulé sur Taurus Medici.

Modèles utilisés en simulation

D'abord, afin de simuler les diodes rondes, le **modèle cylindrique** a été utilisé. Le modèle correspondant à la diode ronde de $0,79 \text{ mm}^2$ avec anneau de garde est représenté à la Figure 4.12 en vue de coupe (axe radial et axe en z).



Le modèle cartésien a été utilisé pour la géométrie de diode rectangulaire (90 mm²). Le modèle adapté à la diode PIN avec anneau de garde apparaît à la Figure 4.13 en vue de coupe (axe des X et axe des Y).

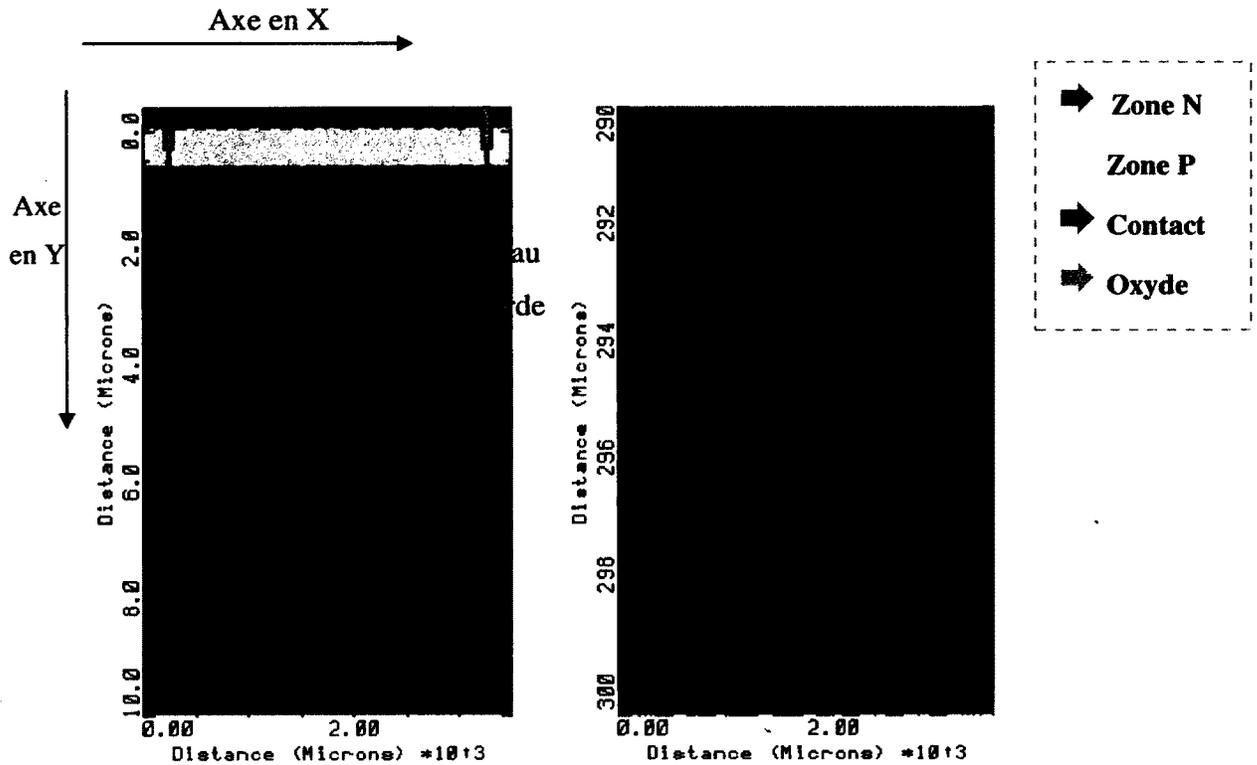


Figure 4.13 : Modèle cartésien pour diode PIN rectangulaire (90 mm²) avec anneau de garde.

Dans les deux types de modèles utilisés, une polarisation négative est appliquée au contact en surface et le contact arrière est mis à la masse.

Modèles physiques

Le simulateur MEDICI contient une grande variété de modèles physiques. Les modèles choisis apparaissent au Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Description des modèles physiques utilisés.

Modèle	Description
CONSRH	Recombinaisons Shockley-Read-Hall avec temps de vie des porteurs en fonction des concentrations.
AUGER	Recombinaisons Auger.
BGN	Modèle de rétrécissement de bande interdite (<i>Slotboom bandgap narrowing model</i>).
SFRMOB2	Modèle amélioré de la mobilité le long des interfaces semiconducteur-isolant qui tient compte de la diffusion des phonons, la rugosité en surface et la diffusion des impuretés ioniques.
CONMO	Tables de mobilité pour modéliser la dépendance de la mobilité des porteurs sur la concentration en impuretés.
FLDMOB	Modèle de mobilité utilisant la composante de champ électrique parallèle.
BTBT	Génération de porteurs par effet tunnel bande à bande.
IMPACT.I	Génération de porteurs par ionisation d'impact.

Paramètres structuraux par défaut

Lorsque non mentionné, les paramètres utilisés dans les simulations sont ceux apparaissant au Tableau 4.2. Ces paramètres correspondent aux paramètres utilisés lors du dernier procédé de fabrication réalisé au CRN².

Tableau 4.2 : Paramètres par défaut des simulations Taurus Medici.

Paramètres	Valeur
Dopage du substrat	$4.10^{12} \text{ cm}^{-3}$
Dopage des zones p et n	0 nm de la surface : $6.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 100 nm de la surface : $2.10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 150 nm de la surface : $1.10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Largeur du gap entre l'anneau et la région active	75 μm
Largeur de l'anneau	200 μm
Géométrie	Ronde 3 mm^2
Épaisseur de l'oxyde de champ	750 nm

Polarisation de l'anneau de garde à 0 Volt

Le courant d'obscurité en fonction de la polarisation de la diode a été mesuré sur une structure de la gaufre E avec l'anneau de garde polarisé à 0 V. Le courant a été mesuré simultanément sur l'anneau et sur la diode. Le même type de mesure a été simulé sur Taurus Medici. Pour réaliser cette simulation, le modèle cylindrique, les modèles physiques et les paramètres structuraux décrits aux sections précédentes ont été utilisés.

Les résultats mesurés et simulés apparaissent à la Figure 4.14. Le niveau absolu de courant dans les deux cas est différent, mais la polarité et la forme des courbes sont les mêmes. Ces résultats indiquent que lorsque l'anneau est polarisé à 0 V, le courant dans l'anneau de garde est plus faible et de polarité inverse par rapport au courant traversant la diode.

Afin de pousser un peu plus loin l'analyse, une autre simulation a été réalisée. Tous les paramètres cités ci-dessus ont été conservés, à l'exception du dopage du substrat qui a été diminué à $2.10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Ce changement a modifié quelque peu la courbe IV, qui apparaît à la Figure 4.15. La polarité des courants est demeurée inverse et le comportement observé sur la simulation précédente est reproduit jusqu'à une polarisation sur la diode de -15 V. Cependant, un nouveau phénomène est observable aux alentours de -20 V et plus. Les courants se rejoignent et deviennent égaux, mais toujours de polarité inverse.

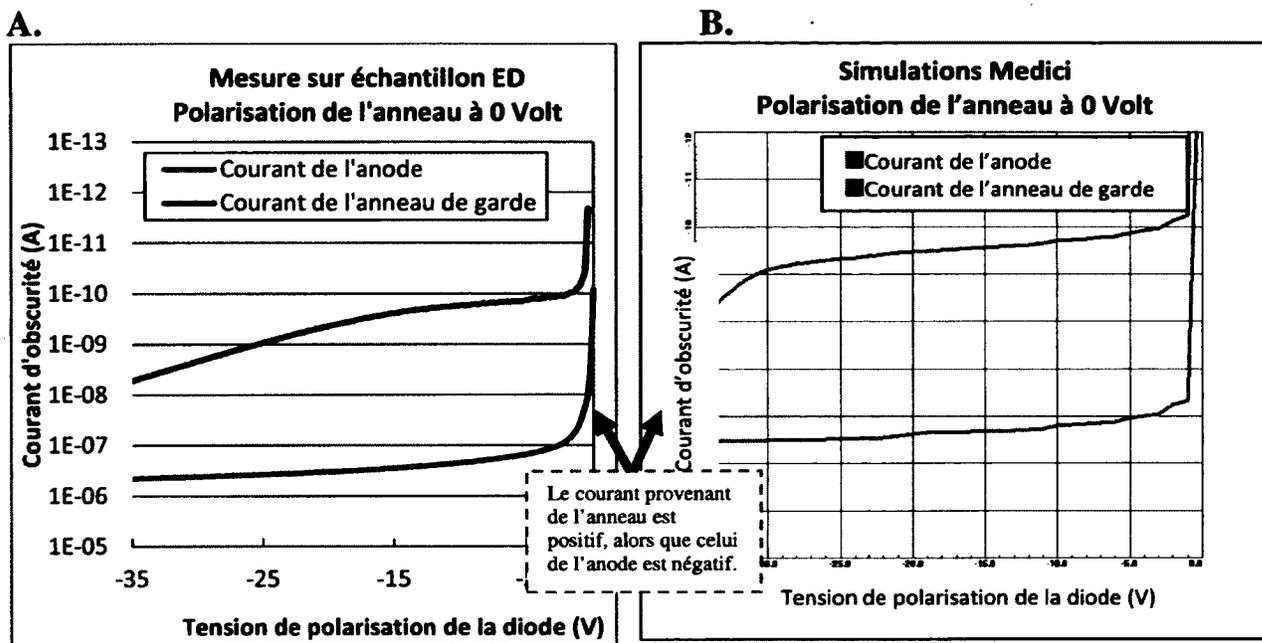


Figure 4.14 : Courbes IV en obscurité avec anneau de garde polarisé à 0 V. A : Échantillon ED, B : Simulation Taurus Medici. Dans les deux cas, le courant provenant de l'anode est négatif et le courant de l'anneau de garde est positif.

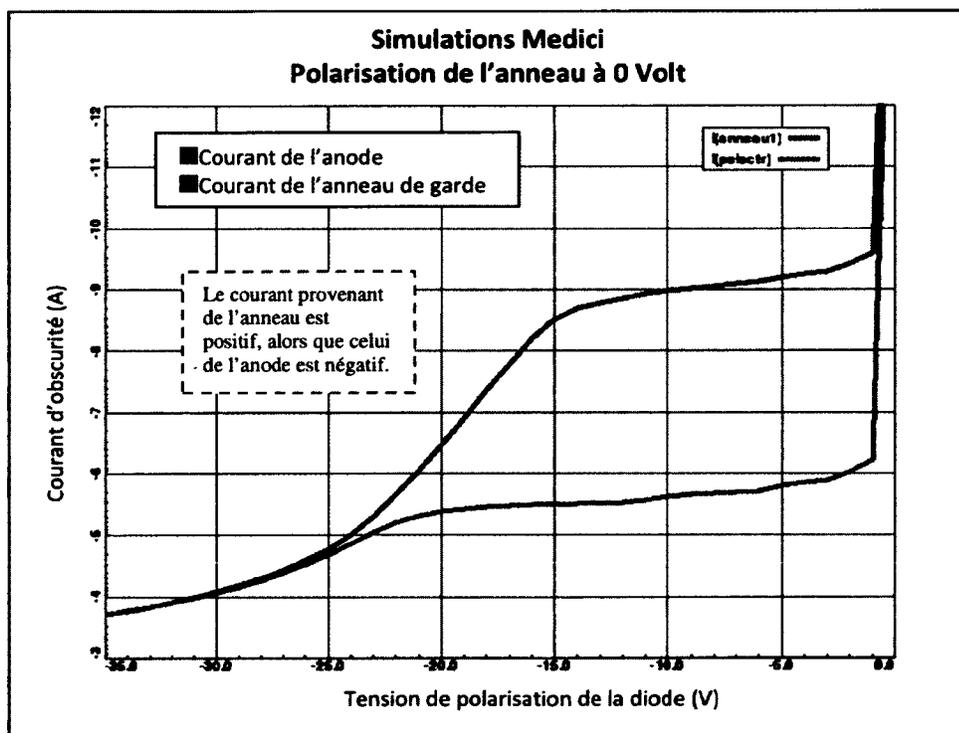


Figure 4.15 : Courbes IV en obscurité avec anneau de garde polarisé à 0 V obtenue en simulation Taurus Medici. Le courant de l'anneau de garde est positif et le courant de l'anode est négatif.

Afin de mieux comprendre ce résultat, une vue de coupe a été simulée à trois polarisations différentes de la diode (0 V, -10 V, -20 V), alors que l'anneau de garde est toujours maintenu à 0 V. Les résultats de ces simulations apparaissent à la Figure 4.16. La direction du courant électrique est représentée par des flèches blanches. Lorsque la diode est polarisée à 0 V et à -10 V, les zones de déplétion de l'anneau et de la diode sont distinctes. À -10 V, le courant provenant de l'anneau se dirige majoritairement vers l'anode de la diode, car la différence de potentiel entre l'anode et l'anneau est plus grande qu'entre l'anneau et la cathode. À partir de -20 V à l'anode, les zones de déplétion entre l'anneau et l'anode se rejoignent et le courant passe directement de l'anneau à l'anode de la diode. Les deux courants deviennent égaux, mais en sens contraire. Cette nouvelle structure PNP est plus complexe que les deux diodes distinctes du départ et n'est pas l'objet de ce mémoire.

En conclusion, l'anneau de garde polarisé à 0 V ne permet pas de réduire le courant de fuite et peut même mener à un défaut de fonctionnement si la polarisation inverse sur la diode est suffisante pour que les zones de déplétion se rejoignent.

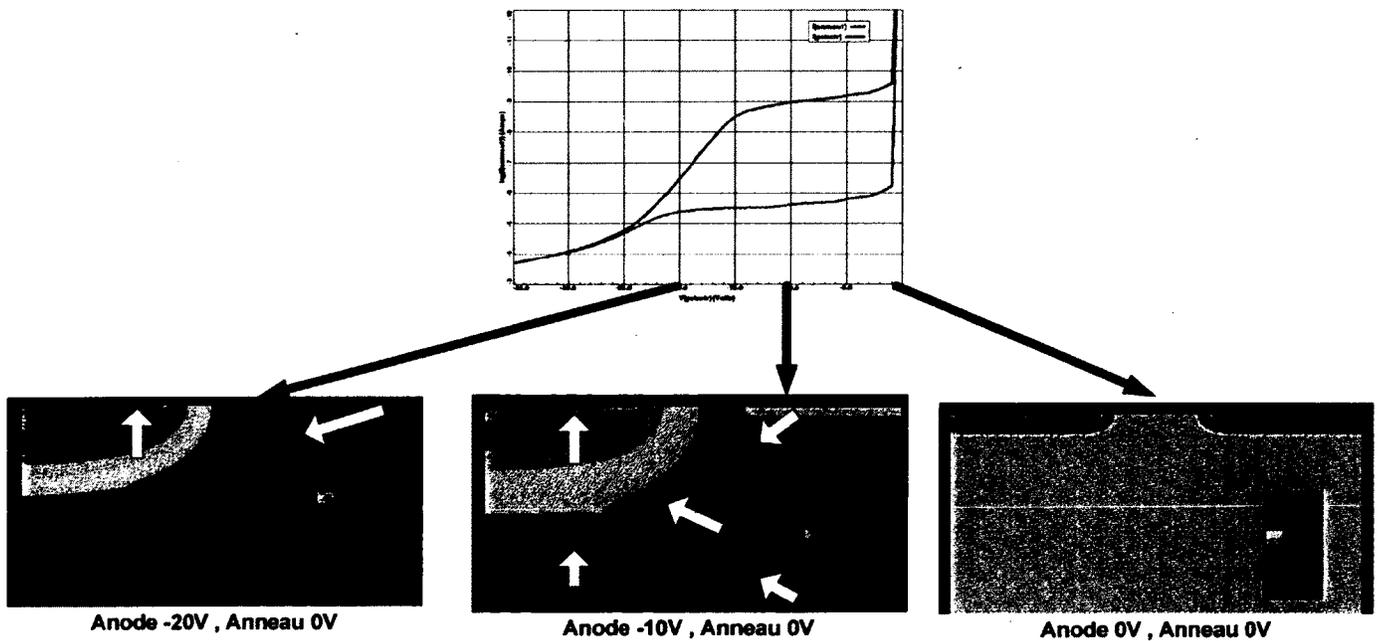


Figure 4.16 : Vue de coupe de la photodiode et de l'anneau de garde à trois différentes polarisations de la diode, alors que l'anneau de garde est maintenu à 0 V.

Polarisation de l'anneau de garde à une tension fixe

Le courant d'obscurité en fonction de la polarisation a été mesuré sur une structure de la gaufre E avec anneau de garde polarisé à -15 V. Le courant a été mesuré simultanément sur l'anneau et sur la diode. Le même type de mesure a été simulé sur Taurus Medici. Les modèles et paramètres ont été utilisés sont les mêmes qu'à la section précédente, sauf au niveau du dopage du substrat, remplacé ici par $2,5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. Les résultats mesurés et simulés apparaissent à la Figure 4.17. Les courbes obtenues sont similaires : la polarité et la forme des courbes sont les mêmes. Les résultats indiquent que lorsque l'anneau est polarisé à une tension fixe, le courant de la diode est diminué grâce à l'anneau de garde, mais jusqu'à une certaine limite de polarisation.

De ce nouveau modèle, la vue de coupe a été simulée à trois polarisations différentes de la diode (0 V, -10 V, -20 V), alors que l'anneau de garde est toujours maintenu à -15 V. Les résultats de ces simulations apparaissent à la Figure 4.18. D'abord, lorsque l'anneau est polarisé à -15 V et l'anode à 0 V, on observe le même phénomène que dans la simulation précédente, quand l'anneau était à 0 V et l'anode à -20 V, puisqu'il s'agit pratiquement des mêmes structures. Les deux zones de déplétion se rejoignent et un canal est formé entre l'anode et l'anneau. En diminuant la polarisation sur l'anode, celle-ci commence à attirer des charges de la cathode (toujours polarisée à 0 V). Le canal formé entre l'anneau et l'anode diminue jusqu'à disparaître. Les deux diodes que représentent l'anneau-cathode et l'anode-cathode fonctionnent alors majoritairement en parallèle. Lorsque la différence de potentiel entre l'anneau et l'anode s'inverse, c'est-à-dire que l'anode est à un potentiel plus bas que l'anneau de garde, on observe un nouveau canal de courant apparaître entre l'anneau et l'anode. Ce canal devient peu à peu dominant et fait augmenter le courant en inverse mesuré dans l'anode.

En conclusion, l'utilisation d'une polarisation fixe sur un anneau de garde permet de réduire le courant de fuite sur une plage d'opération de la photodiode bien précise. Celle-ci peut varier en fonction des structures fabriquées. Il est ainsi important de mesurer cette plage afin de déterminer la polarisation adéquate sur l'anneau.

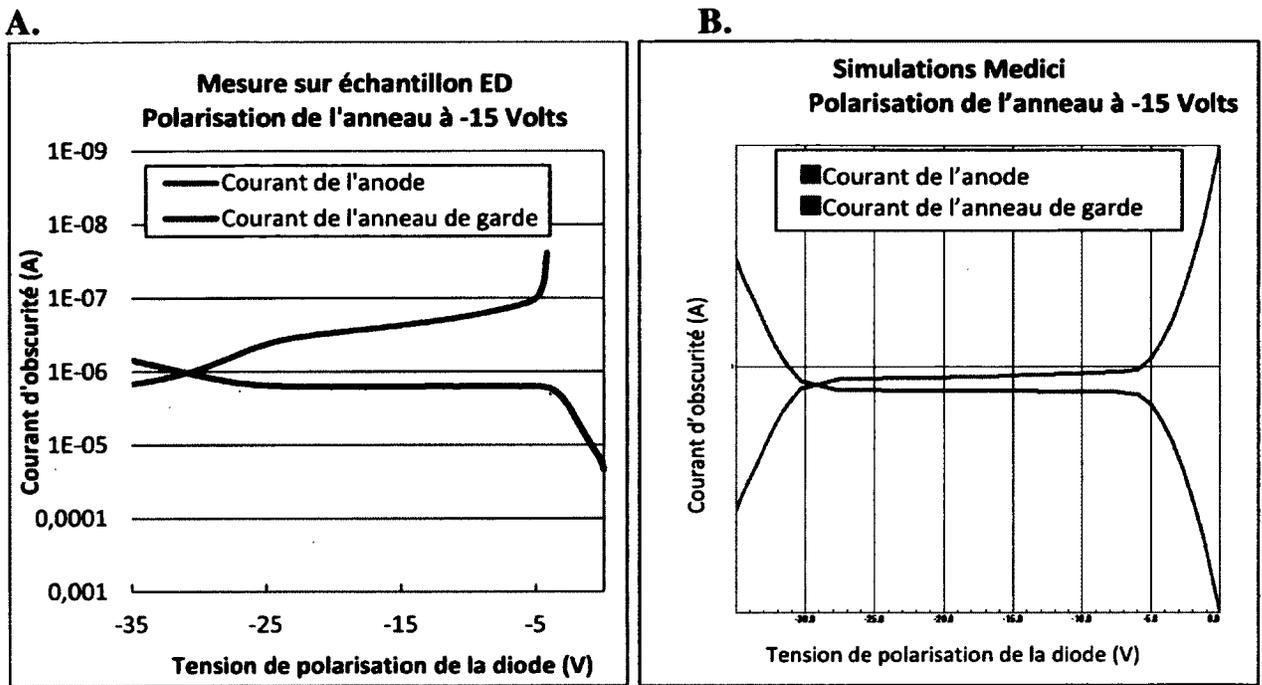


Figure 4.17 : Courbes IV en obscurité avec anneau de garde polarisé à -15 V. A : Échantillon ED, B : Simulation Taurus Medici. Tous les courants sont négatifs.

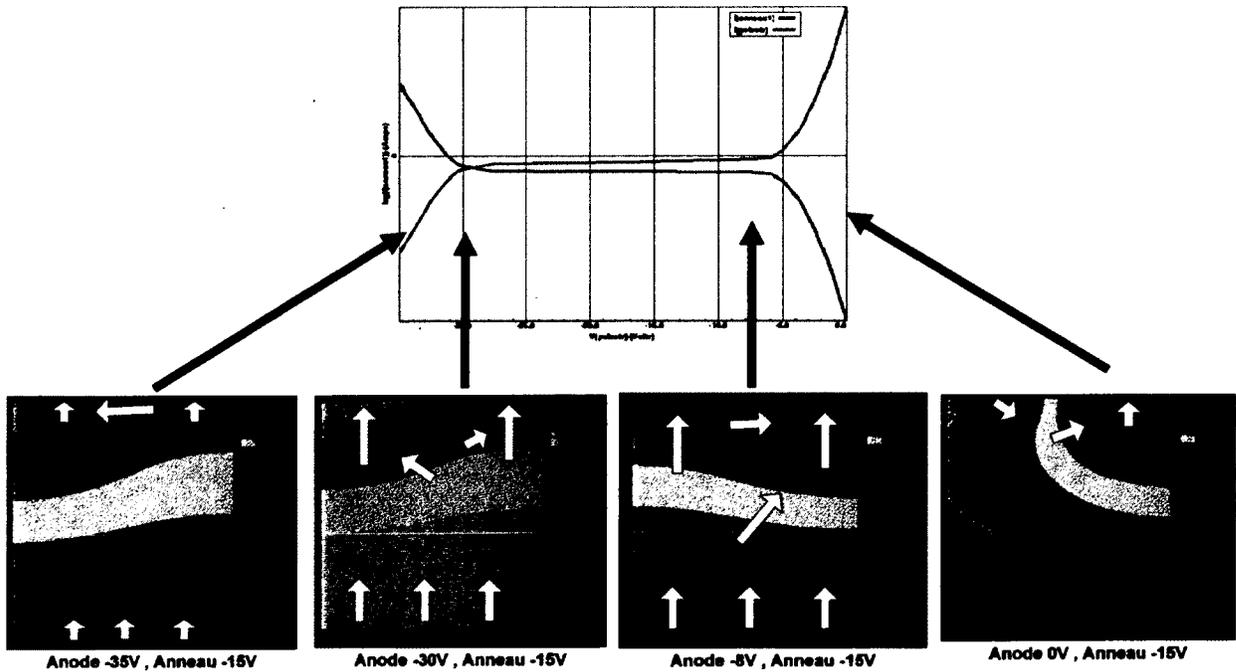


Figure 4.18 : Vue de coupe de la photodiode et de l'anneau de garde à trois différentes polarisations de la diode, alors que l'anneau de garde est maintenu à -15 V.

Polarisation de l'anneau de garde à la même tension que la diode

Sur pratiquement toutes les diodes fabriquées avec un anneau de garde, un effet de résistance négative apparaît sur la courbe IV lorsque l'anneau est polarisé à la même tension que la diode. Cet effet est illustré à la Figure 4.19. En simulation, il n'a jamais été possible de simuler cet effet de résistance négative. Par contre, en observant les courbes obtenues en pratique, des hypothèses peuvent être émises afin d'expliquer le phénomène. À basse tension, l'anneau pourrait n'être pas suffisamment polarisé pour que le courant qu'il extrait soit significatif en comparaison avec celui capté par la diode. Peu à peu, lorsque la polarisation augmente sur l'anneau, il capte de plus en plus de courant parasite, et le soustrait à celui capté par l'anode de la diode. Si cette hypothèse est valide, un anneau plus près de la région active permettrait éventuellement de rapprocher la tension de stabilisation du système de 0 V. Il est également possible qu'une certaine barrière doive être surmontée avant que l'anneau ne devienne efficace à capter les impuretés environnantes.

En conclusion, polariser l'anneau de garde à la même tension que la photodiode permet de réduire le courant de fuite sur les structures fabriquées, sauf à basse tension. Il est ainsi important de mesurer à partir de quelle tension l'anneau devient efficace, afin de déterminer la polarisation adéquate sur l'anneau.

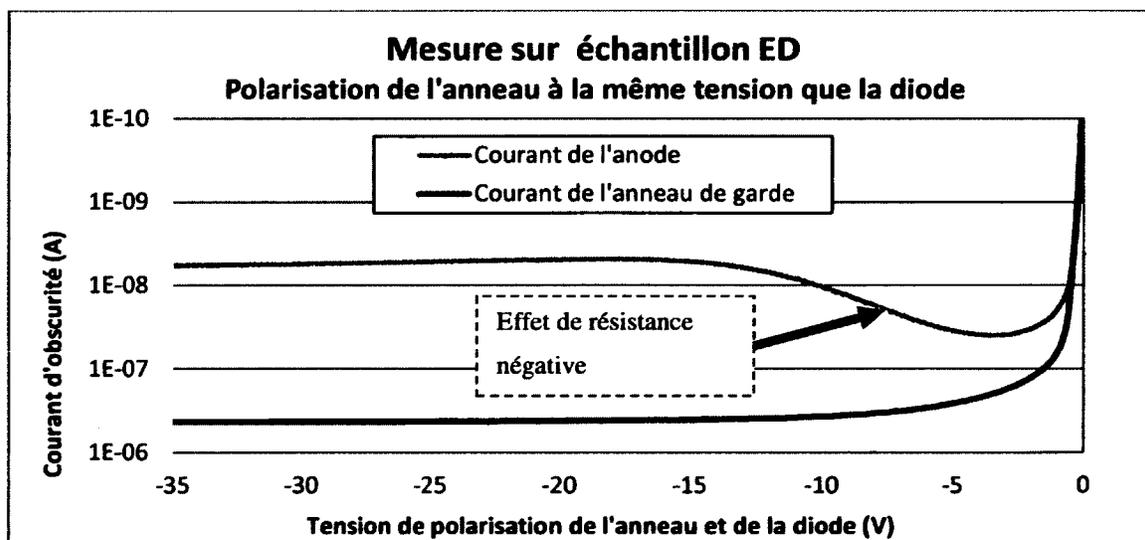


Figure 4.19 : Courbes IV en obscurité avec anneau de garde polarisé à la même tension que la diode sur l'échantillon ED.

4.2.4 Comparaison des divers procédés et structures disponibles

Avec la gaufre E, il est possible d'évaluer les différentes géométries élaborées pour cette itération et tous les types de passivation prévus au Tableau 3.7. Les courbes IV de plusieurs structures présentes sur cette gaufre ont été mesurées. Les résultats obtenus sont décrits dans les sections suivantes.

Il est important de noter qu'il est impossible d'établir une comparaison 100 % fiable à partir des données, vu le nombre de facteurs externes qui peuvent influencer les performances des photodiodes et le nombre limité de structures disponibles pour chaque test. En effet, les étapes de mesure ne sont pas toujours réalisées en même temps ou sur le même équipement pour tous les échantillons. Les variations de température ambiante peuvent modifier les résultats obtenus, car le courant de fuite est proportionnel à la température. Ensuite, le contact électrique réalisé avec la pointe peut être plus ou moins efficace d'une mesure à l'autre. Enfin, les nombreuses manipulations durant le procédé de fabrication peuvent également induire des défauts mécaniques répartis non uniformément sur les gaufres.

Passivation

Le courant d'obscurité a été mesuré sur plusieurs structures ayant différents matériaux de passivation sur la région active de la photodiode. Les échantillons utilisés (EA et EC) proviennent de la gaufre E et comportent chacun un type d'oxyde différent, croissance sèche dans le cas de EA et dépôt PECVD dans le cas de EC. Les résultats sont résumés à la Figure 4.20. Les valeurs de courant d'obscurité apparaissant sur le graphique sont des valeurs moyennes calculées à partir de mesures réalisées sur 6 photodiodes par type de passivation.

Les deux matériaux de passivation qui semblent les plus prometteurs selon ces résultats sont l'aluminium et l'oxyde cru thermiquement (oxydation sèche).

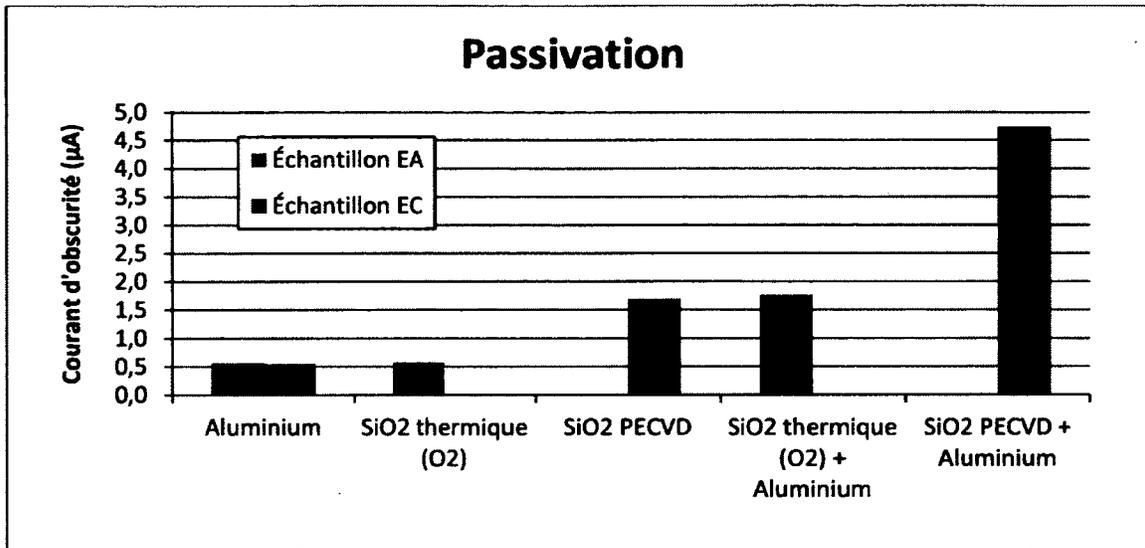


Figure 4.20 : Courant d'obscurité mesuré à -35V en fonction du type de passivation.

Géométrie du contact électrique

Le courant d'obscurité a été mesuré sur plusieurs structures ayant différentes géométries de contact à la région active de la photodiode. Les résultats sont résumés à la Figure 4.21. Les valeurs de courant d'obscurité sont des valeurs moyennes calculées à partir de mesures réalisées sur 4 photodiodes par géométrie de contact.

Selon les résultats obtenus, le type de contact qui semble le plus prometteur est le rectangle placé en retrait de la photodiode avec environ deux ordres de grandeur de courant d'obscurité plus bas que les autres structures. Il est cependant important de mentionner ici qu'il y avait plusieurs défauts visuels sur ces photodiodes (en grande partie dus aux manipulations avec la pince), car les structures utilisées pour ce test étaient placées très près du bord des gaufres. Ces résultats doivent donc être considérés avec précaution.

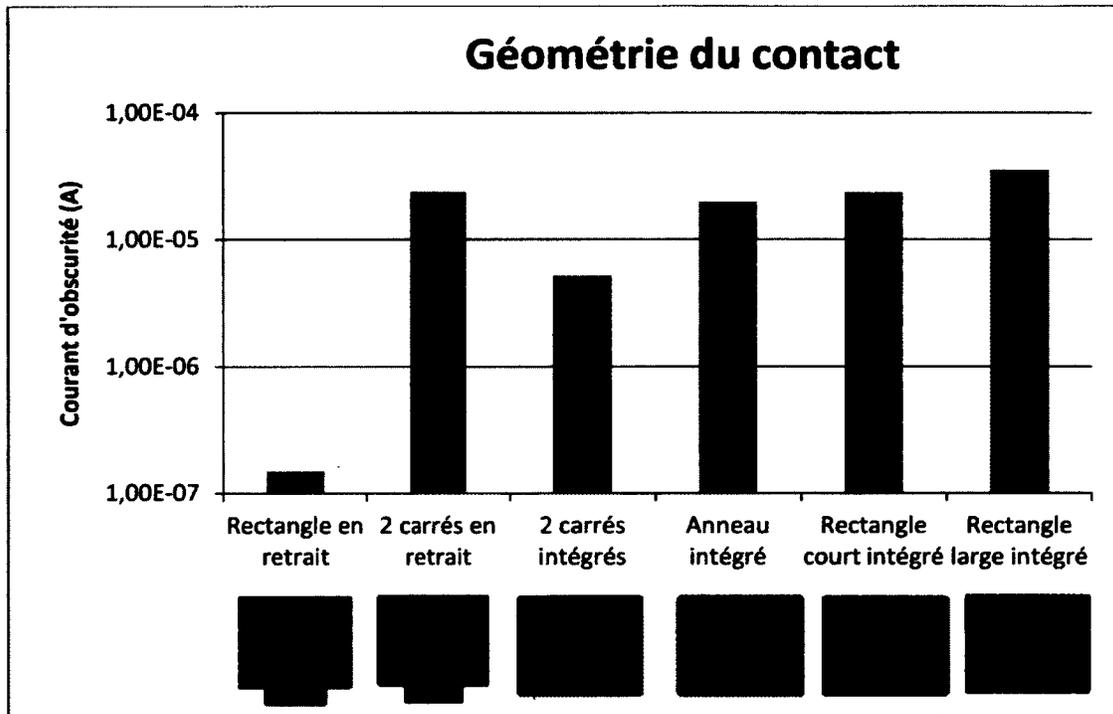


Figure 4.21 : Courant d'obscurité mesuré à -35V en fonction de la géométrie de contact.

Géométrie de l'anneau de garde : espacement entre l'anneau et la région active

Le courant d'obscurité en fonction de la polarisation de la diode a été mesuré afin d'obtenir, pour une même structure, une comparaison au niveau de l'influence de l'espacement entre l'anneau et la région active. La série de structures utilisée est présente sur les quatre quarts de la gaufre, donc quatre fois. Les résultats obtenus sur le quart de gaufre ED apparaissent à la Figure 4.22 en exemple. Toutes les mesures ont été réalisées avec l'anneau de garde branché à la même tension que la région active.

Selon les résultats obtenus, l'espacement minimum (75 μm) permet de diminuer le courant de fuite au minimum dans la région stable de la courbe IV. Une explication plausible est que plus l'anneau de garde est près de la région active, plus il permet de capter de porteurs avant qu'ils ne diffusent vers la région active. Pour ce qui est de l'effet résistance négative ou, autrement dit, tension de stabilisation de l'anneau, il est plus difficile de tirer des conclusions à partir des résultats. Selon deux échantillons (EB et EC) sur 4, le plus petit espacement (75 μm) permet la plus faible tension de stabilisation. Sur les deux autres échantillons (EA et ED), il n'y a pas de

tendance claire qui ressort des résultats (la tension de stabilisation se ressemble ou ne suit pas de tendance évidente).

En conclusion, l'utilisation d'espacement plus faible ($<75 \mu\text{m}$) semble diminuer le courant de fuite. Pour ce qui est de diminuer la tension de stabilisation du système, d'autres données seront nécessaires pour valider l'effet de l'espacement de l'anneau, mais des espacements plus faibles que $75 \mu\text{m}$ pourraient être avantageux.

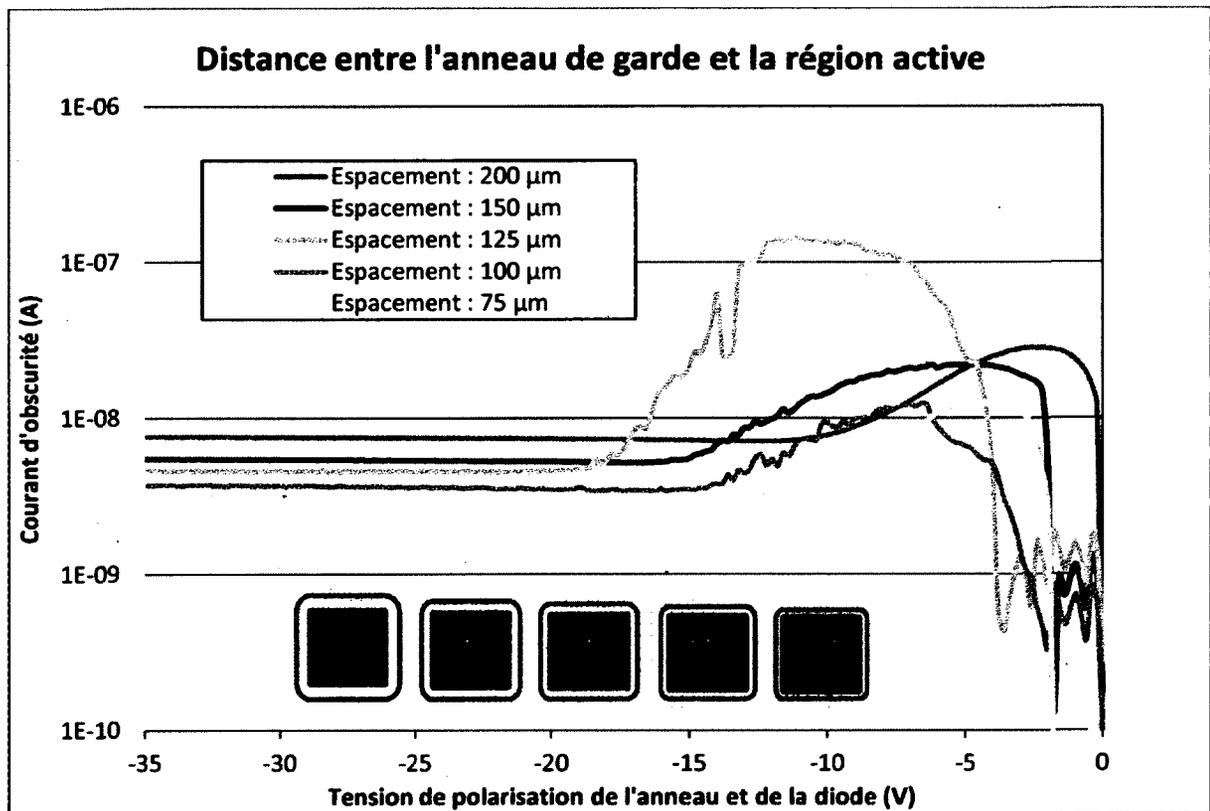


Figure 4.22 : Courbes IV en obscurité pour divers espacements entre l'anneau de garde et la région active sur l'échantillon ED.

Géométrie de l'anneau de garde : largeur de l'anneau

Le courant d'obscurité en fonction de la polarisation de la diode a été mesuré afin d'obtenir, pour une même structure, une comparaison au niveau de l'influence de la largeur de l'anneau. La série de structures utilisée est présente sur les quatre quarts de la gaufre, donc quatre fois. Les résultats obtenus sur le quart de gaufre ED apparaissent à la Figure 4.23 en exemple.

Toutes les mesures ont été réalisées avec l'anneau de garde branché à la même tension que la région active.

Selon les résultats obtenus, la largeur maximum (150 μm) permet de diminuer le courant de fuite au minimum dans la région stable de la courbe IV. Une explication possible est qu'un anneau plus large permet de capter une plus grande quantité de porteurs. Pour ce qui est de la tension de stabilisation, il semble que plus l'anneau est large, plus la tension de stabilisation est faible et l'effet de résistance négative diminue.

Selon ces résultats, une structure avec un anneau de garde plus large obtient ainsi un courant de fuite plus faible et nécessite une tension de polarisation plus faible pour stabiliser le système.

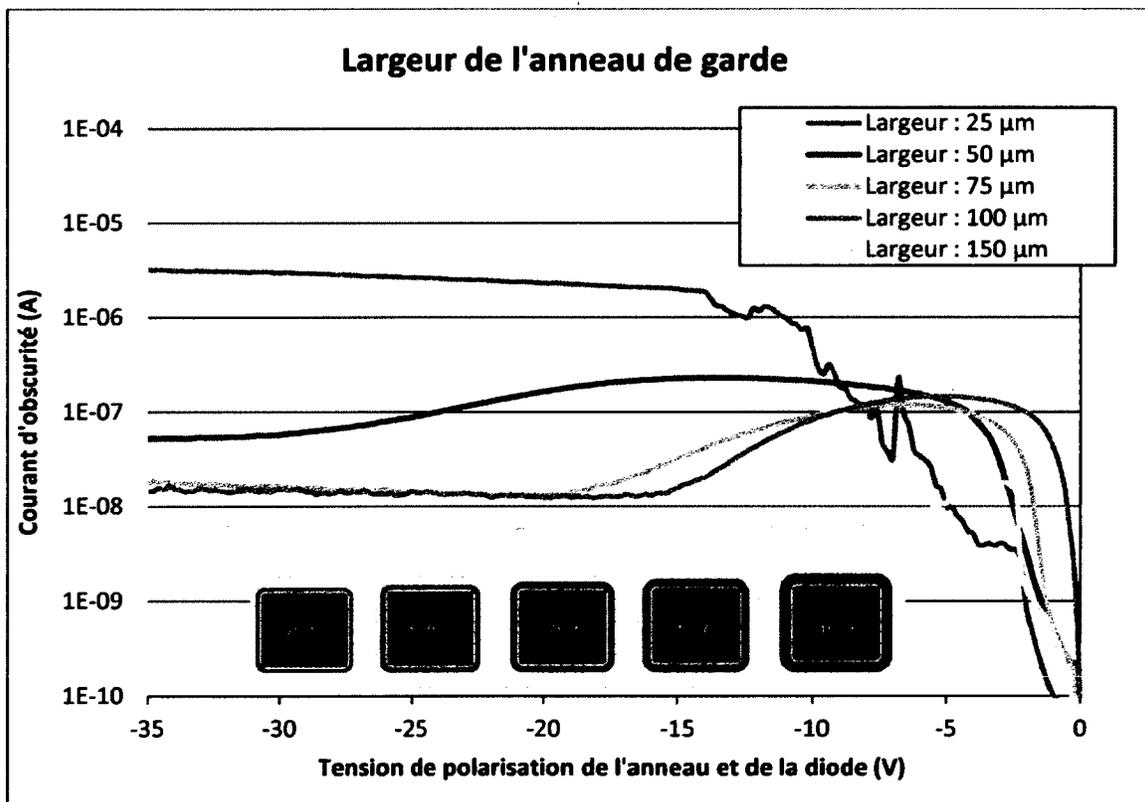


Figure 4.23 : Courbes IV en obscurité pour diverses largeurs d'anneau de garde sur l'échantillon ED.

Recommandations

D'après les analyses précédentes, le type de passivation à privilégier dans l'optique de la réduction du courant d'obscurité est l'oxyde cru thermiquement ou l'aluminium. Le type de géométrie de contact préférable est le rectangle en retrait de la photodiode. L'utilisation d'un espacement plus faible entre l'anneau et la région active ($<75 \mu\text{m}$), ainsi qu'une largeur d'anneau de garde de plus de $150 \mu\text{m}$ semblent avantageux.

Les résultats concernant l'anneau de garde sont confirmés dans la littérature. Quelques références sont présentées au Tableau 4.3. Les largeurs utilisées sont beaucoup plus importantes que celles présentes sur la première série de photomasques. De plus, l'espacement est en dessous de $75 \mu\text{m}$ dans deux cas sur trois.

Tableau 4.3 : Rappel des dimensions de différentes structures d'anneau de garde utilisées dans la littérature.

Référence	Structure	Espacement entre l'anneau et la région active (μm)	Largeur de l'anneau (μm)	Densité de courant d'obscurité (nA/cm^2)
[Zhou et al., 1996]	Carré $1000 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$	25	275	1.2
[Holland, 1989b]	Rond $1000 \mu\text{m}$ (rayon)	100	300	1
[Holland, 1989a]	Matrice de 128 bandes $5 \mu\text{m} \times 6 \text{mm}$	40	Non disponible	79

4.2.5 Performances obtenues

Cette section présente les meilleures performances électriques obtenues avec le nouveau procédé de fabrication selon trois catégories de structures (ronde, carrée et rectangulaire). Les performances obtenues sont d'abord comparées aux résultats obtenus lors du premier procédé réalisé au CRN² et, ensuite, aux performances de dispositifs commerciaux similaires.

Comparaison avec procédé initial

Une structure commune, la structure ronde (rayon : 0,5 mm), permet d'établir une comparaison directe entre les deux procédés réalisés au CRN². Plus spécifiquement, la mesure du courant d'obscurité et de la capacité en fonction de la polarisation a été réalisée sur deux configurations de structures rondes du procédé initial et trois de la nouvelle itération. À partir de la mesure de la capacité, il est possible de calculer la largeur de la zone de déplétion, la concentration en porteurs majoritaires, ainsi que la résistivité des substrats (les équations utilisées sont tirées de la section **3.1.2 Capacité**). Les résultats obtenus apparaissent au Tableau 4.4.

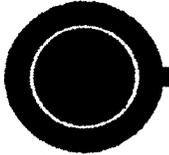
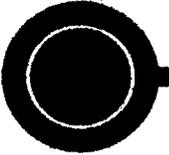
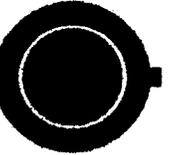
Le courant d'obscurité mesuré en fonction de la polarisation de la diode est affiché sous forme de graphique à la Figure 4.24. Les courbes de la nouvelle itération sans anneau et avec anneau branché ont des anomalies à faible polarisation.

Selon l'Équation 3.5, la capacité estimée pour une surface ronde de rayon de 0,5 mm, à une polarisation de -30 V et une résistivité de 6 k Ω -cm est environ 0,4 pF, ce qui est près des valeurs mesurées sur les structures de la nouvelle itération, mais loin de la valeur mesurée sur les structures du procédé initial. En effet, les capacités mesurées sur les structures réalisées lors du procédé initial sont environ trois fois plus élevées que celles mesurées sur les structures de la nouvelle itération, indépendamment du type de substrat. Étant donné que les mêmes substrats Topsisil ont été utilisés dans les deux cas, cette mesure est anormale. Plusieurs raisons pourraient expliquer ce phénomène, dont un mauvais contact ou une étape de fabrication défectueuse. Il est possible également que le procédé initial ait induit suffisamment d'impuretés dans le substrat pour en modifier significativement la résistivité de départ.

Les substrats Atomergic, utilisés lors du procédé initial, ont fourni de meilleurs résultats que les substrats TOPSIL pour un même branchement (anneau flottant). Ensuite, le nouveau procédé est légèrement plus efficace que le procédé initial en comparant les résultats avec l'utilisation d'un même type de substrat (Topsisil) et même type de branchement de l'anneau de garde (flottant). Il est également important de noter que le branchement de l'anneau à la

même tension que la région active a permis d'enregistrer la meilleure performance (89 nA/cm^2).

Tableau 4.4 : Comparaison entre procédé initial et nouvelle itération avec structures rondes (Rayon : 0,5 mm).

Caractéristique	Nouvelle itération	Nouvelle itération	Nouvelle itération	Procédé initial	Procédé initial
Illustration					
Substrat	TOPSIL	TOPSIL	TOPSIL	TOPSIL	Atomergic
Aire de la zone P+ (mm^2)	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
Branchement de l'anneau de garde	Sans anneau	Flottant	Polarisé	Flottant	Flottant
Courant d'obscurité à -35 V (nA)	90,1	113,8	0,7	167,1	5,46
Densité de courant d'obscurité à -35 V (nA/cm^2)	$11,5 \cdot 10^3$	$14,5 \cdot 10^3$	89	$21,3 \cdot 10^3$	695
Capacité à -30 V (pF)	0,9	0,8	-	2,4	3,0
Zone de déplétion à -30 V (μm) (calculé)	70	80	-	20	20
Concentration en porteurs minoritaires du substrat (atomes.cm^{-3}) (calculé)	$4,5 \cdot 10^{12}$	$3,6 \cdot 10^{12}$	-	$3,4 \cdot 10^{13}$	$5,3 \cdot 10^{13}$
Résistivité (Ohm.cm) (calculé)	2900	3600	-	400	300

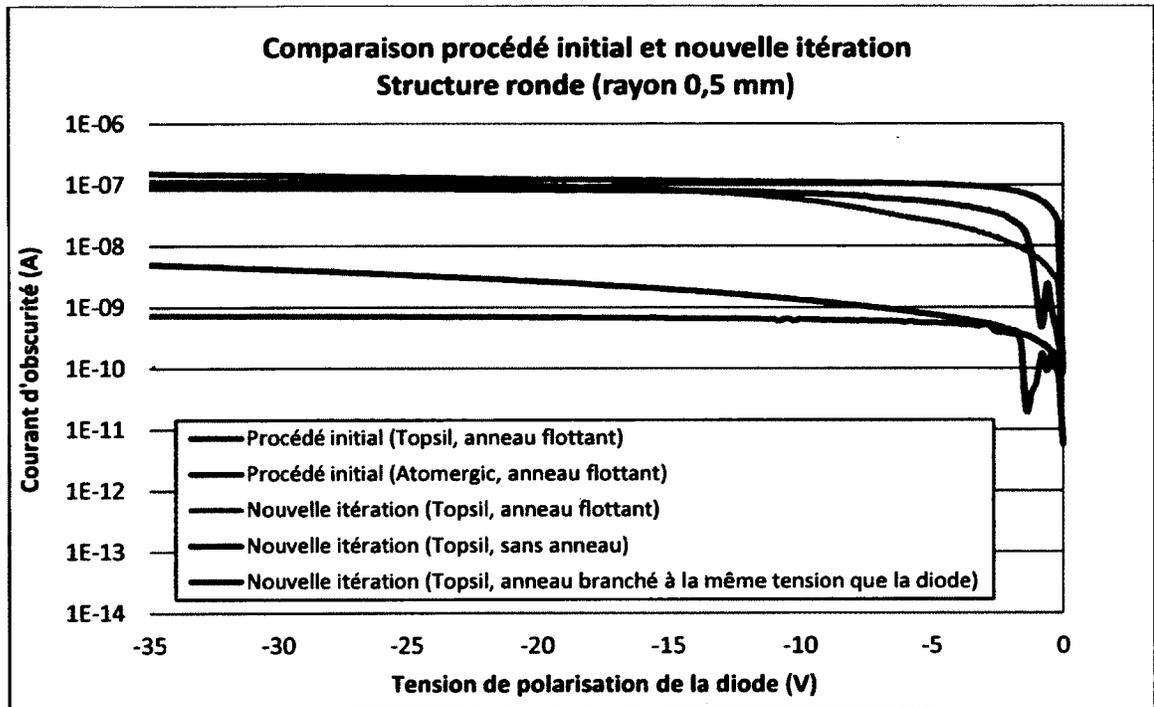


Figure 4.24 : Courbes IV en obscurité pour procédé initial et nouvelle itération avec structures rondes (Rayon : 0,5 mm).

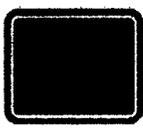
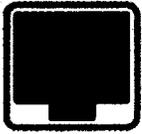
Comparaison avec diodes commerciales à structure carrée

Une deuxième comparaison est réalisée sur des structures très semblables, de géométrie carrée avec coins arrondis. Plus spécifiquement, la mesure du courant d'obscurité et de la capacité en fonction de la polarisation a été réalisée sur trois configurations de structures carrées de la nouvelle itération et une diode commerciale de la compagnie Perkin Elmer (photodiode PIN non encapsulée). La largeur de la zone de déplétion, la concentration en porteurs majoritaires, ainsi que la résistivité des substrats ont été calculées à partir de la mesure de la capacité comme à la section précédente. Les résultats numériques apparaissent au Tableau 4.5 et les courbes IV à la Figure 4.25.

Le branchement de l'anneau à la même polarisation que la région active permet encore une fois de réduire significativement le courant d'obscurité. Le courant d'obscurité obtenu avec le nouveau procédé est environ un ordre de grandeur plus élevé que le courant provenant de la diode commerciale.

Il est intéressant de noter que la meilleure densité de courant obtenue avec la structure carrée (213 nA/cm^2) est environ deux fois plus élevée qu'avec la structure ronde (89 nA/cm^2 , section précédente). Deux hypothèses pourraient expliquer ce résultat. La première est que la présence de coins dans la structure carrée pourrait augmenter le courant d'obscurité. La deuxième est que la géométrie de l'anneau de garde serait plus efficace dans le cas de la structure ronde grâce à sa géométrie en proportion plus large.

Tableau 4.5 : Comparaison numérique entre nouvelle itération et photodiode de la compagnie Perkin Elmer.

Procédé	Nouvelle itération	Nouvelle itération	Nouvelle itération	Perkin Elmer
Illustration				
Substrat	TOPSIL	TOPSIL	TOPSIL	-
Aire de la zone P+ (mm^2)	2,16	2,01	2,16	~2,16
Branchement de l'anneau de garde	Sans anneau	Flottant	Branché	Sans anneau
Courant d'obscurité à -35 V (nA)	160	228	4,6	0,4
Densité de courant d'obscurité à -35 V (nA/cm^2)	$7,42 \cdot 10^3$	$11,3 \cdot 10^3$	213	18,5
Capacité à -30 V (pF)	1,6	1,7	1,6	2,5
Zone de déplétion à -30 V (μm) (calculé)	140	120	140	90
Concentration en porteurs minoritaires du substrat (atomes.cm^{-3}) (calculé)	$1,9 \cdot 10^{12}$	$2,6 \cdot 10^{12}$	$2,0 \cdot 10^{12}$	$4,8 \cdot 10^{12}$
Résistivité (Ohm.cm) (calculé)	6700	5000	6400	2700

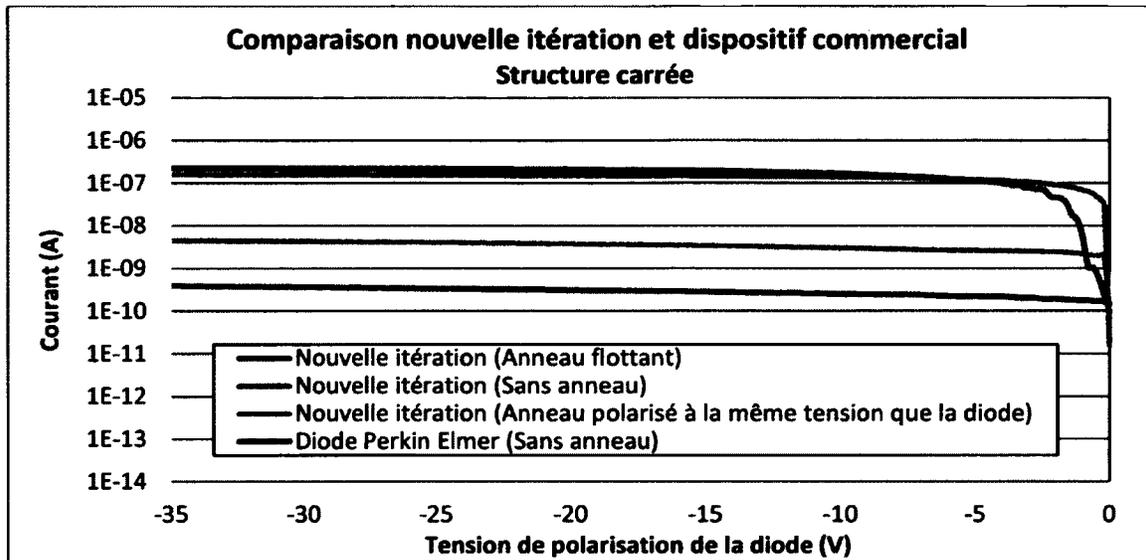


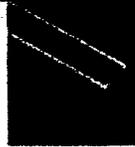
Figure 4.25 : Courbes IV en obscurité pour première itération et procédé commercial avec structures carrées.

Comparaison avec diodes commerciales à structure rectangulaire

Une troisième comparaison est réalisée sur des structures rectangulaires de grande taille, avec différents branchements sur l'anneau de garde. Plus spécifiquement, la mesure du courant d'obscurité et de la capacité en fonction de la polarisation a été réalisée sur trois configurations de structures rectangulaires de la nouvelle itération et une diode commerciale de la compagnie Hamamatsu (photodiode PIN encapsulée). La largeur de la zone de déplétion, la concentration en porteurs majoritaires, ainsi que la résistivité des substrats ont été calculées à partir de la mesure de la capacité comme à la section précédente. Les résultats numériques apparaissent au Tableau 4.6. Le courant d'obscurité mesuré en fonction de la polarisation de la diode est affiché sous forme de graphique à la Figure 4.26. La courbe de la nouvelle itération avec anneau branché a des anomalies à faible polarisation.

En comparaison avec une diode PIN encapsulée de la compagnie Hamamatsu, la densité de courant d'obscurité mesurée sur la nouvelle itération est environ deux ordres plus élevés. Dans ce cas, la comparaison est relative, car on compare des résultats obtenus par station sous pointe sur substrat complet à une structure découpée puis encapsulée sur céramique.

Tableau 4.6 : Comparaison numérique entre nouvelle itération et photodiode de la compagnie Hamamatsu.

Procédé	Nouvelle itération	Nouvelle itération	Nouvelle itération	Hamamatsu
Illustration				
Substrat	TOPSIL	TOPSIL	TOPSIL	-
Aire de la zone p+ (mm ²)	30,7	30,7	30,7	90
Branchement de l'anneau de garde	Sans anneau	Flottant	Branché	Sans anneau
Courant d'obscurité à -35 V (nA)	779	630	36,5	1,3
Densité de courant d'obscurité à -35 V (nA/cm ²)	2,7.10 ⁰³	2,2.10 ⁰³	119,8	1,4
Capacité à -30 V (pF)	14,5	14,3	14,3	77,0
Zone de déplétion à -30 V (μm) (calculé)	220	220	220	120
Concentration en porteurs minoritaires du substrat (atomes.cm ⁻³) (calculé)	8.10 ¹¹	7,8.10 ¹¹	7,8.10 ¹¹	2,6.10 ¹²
Résistivité (Ohm.cm) (calculé)	16300	16600	16600	5000

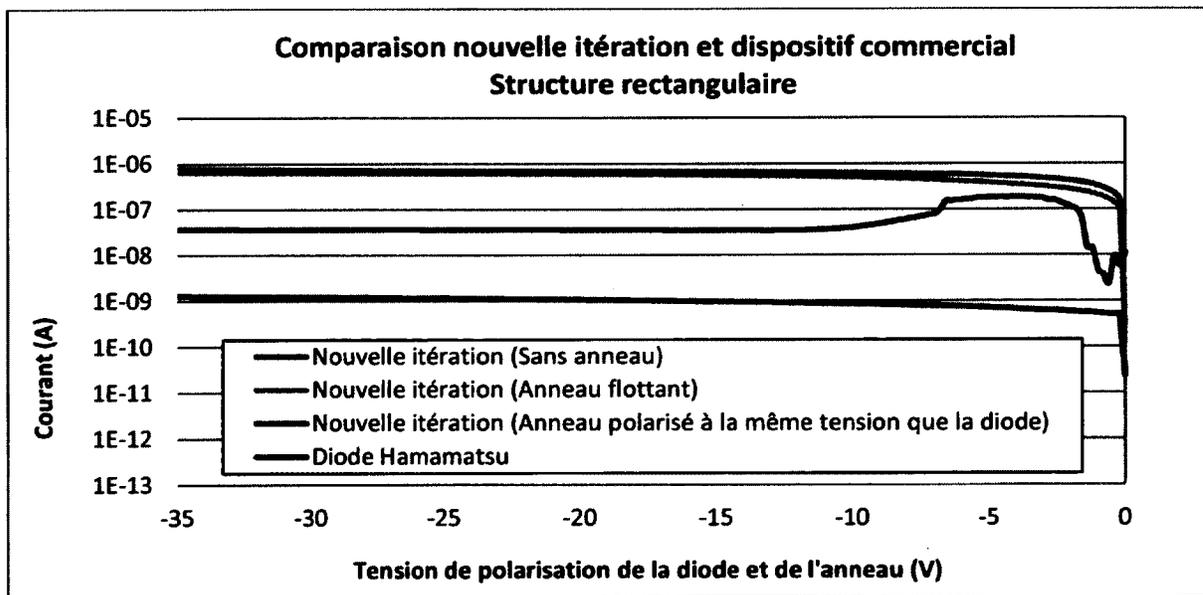


Figure 4.26 : Courbes IV en obscurité pour nouvelle itération et procédé commercial avec structures rectangulaires.

Conclusion

La performance des structures fabriquées lors de cette première itération a été comparée aux performances obtenues lors du procédé initial réalisé au CRN² et aux performances de photodiodes commerciales de géométrie similaire. Le courant d'obscurité obtenu est plus faible avec le présent procédé de fabrication que celui obtenu lors du procédé initial réalisé au CRN², lorsqu'on compare les performances d'une même structure sur le même type de substrat. Ensuite, le courant d'obscurité obtenu sur la structure carrée de 2 mm² est environ un ordre plus élevé que celui mesuré sur une structure similaire non encapsulée de la compagnie Perkin Elmer. Finalement, le courant d'obscurité obtenu sur la structure rectangulaire de 30 mm² est environ deux ordres plus élevés que celui mesuré sur une structure similaire encapsulée de la compagnie Hamamatsu. Ces résultats sont encourageants étant donné les contraintes de fabrication du CRN² qui ne sont pas idéales pour la fabrication de photodétecteur. Il serait cependant nécessaire de réduire le courant d'obscurité afin de rendre utilisables les détecteurs de grande taille.

4.3 Modifications à la conception

À la suite des résultats obtenus à la première itération, le procédé de fabrication et la géométrie des structures ont été redéfinis afin de réaliser une deuxième itération. Les sections suivantes présentent les modifications apportées au procédé de fabrication et aux photomasques.

4.3.1 Optimisation des paramètres structuraux et du procédé de fabrication

Le procédé de fabrication a été d'abord revu en fonction des deux recommandations majeures énoncées dans les sections précédentes et synthétisées ci-dessous :

- Utilisation d'un recuit dans une fournaise standard d'au moins 30 minutes pour l'activation des dopants.
- Passivation de la région active avec oxyde cru thermiquement ou aluminium.

Les prochaines sections décrivent plus en détail les changements réalisés au niveau de la conception et du procédé de fabrication.

Substrat

Afin d'améliorer les performances électriques des photodiodes, de nouveaux substrats ont été commandés pour cette itération. Il s'agit encore une fois de substrats à haute résistivité, mais l'orientation cristalline <100> a été privilégiée afin de réduire le courant de fuite (comme indiqué à la section **3.1.5 Courant d'obscurité**). Il s'agit de substrat de la compagnie University Wafer avec les caractéristiques suivantes : orientation cristalline <100>, polie sur deux faces, type n, 3 à 5 kΩ-cm.

Les substrats à haute résistivité disponibles au CRN² de la marque TOPSIL ont été également conservés afin d'établir une référence avec les itérations précédentes.

Oxyde de champ et passivation de la région active

Durant la première itération, la croissance sèche au lieu d'humide pour l'oxyde de champ avait été testée afin d'obtenir une meilleure qualité d'oxyde. Cependant, cette option n'a pas pu être évaluée, car elle était jumelée au recuit RTA. Pour cette nouvelle itération, la croissance sèche a été éliminée des tests pour des raisons d'économie. En effet, dans la littérature, la croissance humide est généralement utilisée comme croissance initiale dans ce type de dispositif et son importance ne semble pas être critique.

Suite aux recommandations, la seconde croissance thermique sèche et l'aluminium ont été conservés pour former la passivation sur la région active. Il a été mentionné à la section **3.1.5 Courant d'obscurité** que le nitrure de silicium pouvait être combiné à l'oxyde de silicium afin de fournir une protection optimale. Ainsi, le nitrure a également été ajouté aux options. En résumé, les types de passivation testés lors de cette nouvelle itération apparaissent au Tableau 4.7.

Tableau 4.7 : Types de passivation testés sur la région active des diodes PIN.

Matériau utilisé pour la passivation et illustration		
<p>Passivation: $\text{SiO}_2_{\text{cru}}$</p>	<p>Passivation: Al</p>	<p>Passivation: $\text{SiO}_2_{\text{cru}}$ + Al</p>
<p>Passivation: $\text{SiO}_2_{\text{cru}}$ + Nitrure</p>	<p>Passivation: Al + Nitrure</p>	<p>Passivation: $\text{SiO}_2_{\text{cru}}$ + Al + Nitrure</p>

Activation des dopants

Dans la section 3.2 Exemples de structures et de procédés de fabrication existants dans la littérature pour des applications semblables, on mentionne que des étapes de diffusion aussi longues que douze heures ont été utilisées afin d'optimiser le piégeage des impuretés. Afin d'évaluer l'impact de cette étape sur les performances des dispositifs, quatre types de diffusion avec fournaise standard ont été testés durant la deuxième itération sur une même gaufre en premier lieu. Ensuite, le recuit permettant les meilleures performances électriques a été utilisé sur les autres gaufres. Comme référence, l'étape d'activation à 950 °C durant 30 minutes a été conservée. Ensuite, à une température de 900 °C, les durées suivantes ont été testées : deux heures, quatre heures et douze heures.

Piège à contaminant

Il a été mentionné à la section 3.2 Exemples de structures et de procédés de fabrication existants dans la littérature pour des applications semblables qu'une couche d'oxyde de protection, déposée sur le polysilicium, pouvait améliorer les performances des photodiodes lors de l'utilisation d'une couche de polysilicium comme piège à contaminant. L'oxyde de protection permet en effet d'empêcher l'oxydation de la couche de polysilicium durant les

étapes de croissance subséquentes. Ainsi, une étape de dépôt PECVD d'oxyde sur la couche de polysilicium a été ajoutée au procédé de fabrication, avant de réaliser la deuxième croissance.

Étapes de nettoyage

Étant donné que la contamination est un problème majeur, l'utilisation de vaisselle et de fournaies dédiées au silicium a été privilégiée lors de ce nouveau procédé. Les deux étapes d'oxydation ont ainsi été réalisées à l'INRS, car l'institut comporte des installations dédiées, contrairement au CRN².

En résumé, tous les choix de paramètres structuraux évalués dans cette itération en fonction du numéro de gaufre apparaissent au Tableau 4.8.

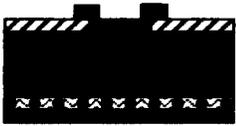
Tableau 4.8 : Tests réalisés durant la deuxième itération.

Tests	Gaufre A	Gaufre B	Gaufre C	Gaufre D	Gaufre E	Gaufre F	Gaufre H
a) TOPSIL	X	X	X	X			
b) University Wafer					X	X	X
a) Couche de polysilicium		X	X	X		X	X
b) Rien	X				X		
a) Dépôt SiO ₂ PECVD		X	X			X	
b) Rien	X			X	X		X
a) 950 °C 30 minutes		X					
b) 900 °C 2 heures		X					
c) 900 °C 4 heures		X					
d) 900 °C 12 heures		X					
a) SiO ₂ cru	X	X	X	X	X	X	X
b) Aluminium	X	X	X	X	X	X	X
c) Aluminium + SiO ₂ cru	X	X	X	X	X	X	X
d) SiO ₂ cru + nitrure	X	X	X	X	X	X	X
e) Aluminium + nitrure	X	X	X	X	X	X	X
f) Aluminium + SiO ₂ cru + nitrure	X	X	X	X	X	X	X

Procédé de fabrication

Le nouveau procédé de fabrication complet est détaillé à l'Annexé C. Les principales étapes apparaissent cependant au Tableau 4.9.

Tableau 4.9 : Procédé de fabrication de la deuxième itération.

Type	Note	Gaufre
1. Oxydation thermique humide et gravure face arrière	Croissance réalisée à l'INRS 67 min <111> 77 min <100>	
2. Dépôt PolySi sur face arrière (sur gaufre B-C-D-F-H seulement)	0,4 µm	
3. Couche de protection du polysilicium (sur gaufre B-C-F seulement)	80 nm	
4. Ouverture des régions actives		
5. Oxydation thermique sèche	Croissance réalisée à l'INRS 95 min <111> 130 min <100>	
6. Implantation Bore (face avant)	$5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 40 keV	
7. Implantation Phosphore (face arrière)	$5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 140 keV	
8. Activation des dopants a. 950 °C 30 minutes b. 900 °C 2 heures c. 900 °C 4 heures d. 900 °C 12 heures		
9. Dépôt Aluminium sur la face avant et arrière et gravure chimique	0,25 µm	
10. Recuit d'alliage silicium aluminium	450 °C (30 min)	
11. Passivation finale au nitrure	0,1 µm	

4.3.2 Optimisation de la géométrie

Les masques ont subi plusieurs changements suite aux résultats obtenus à la première itération. D'abord, toutes les structures sans anneau de garde ont été supprimées, puisqu'il n'était pas possible d'obtenir de résultats satisfaisants avec ce type de structure. Les structures de test destinées à évaluer la différence entre les diverses possibilités de contacts électriques ont été supprimées, car la géométrie avec rectangle en retrait a été retenue. De nouveaux types de structure destinés à être intégrés à un microcanal ont été ajoutés. Comme il est intéressant de poursuivre l'analyse de l'effet de l'anneau de garde sur le courant de fuite, un éventail plus complet de structures où l'espacement et la largeur de l'anneau varient a été ajouté. Finalement, la passivation de l'anneau de garde a été modifiée sur certaines structures afin de déterminer plus précisément l'influence de ce paramètre.

Afin de simplifier le procédé de fabrication, il a été établi qu'il n'y aurait qu'une étape de métallisation sur la face avant. De ce fait, il n'existe que trois possibilités de géométrie d'anneau de garde. Première possibilité : le contact à l'anode est intégré à la zone active, ce qui permet à l'anneau d'avoir une forme régulière et d'être à égale distance de la région active sur tout son périmètre. Deuxième possibilité : le contact à l'anode est éloigné de la région active et l'anneau contourne la région de contact. Dans cette configuration, l'anneau de garde peut être recouvert de métal, mais a une forme irrégulière. Il est possible que certaines géométries subissent alors une augmentation du courant de fuite causée par des effets indésirables aux coins irréguliers. Troisième possibilité : le contact à l'anode se situe en dehors de l'anneau et est relié à la zone active par une fine ligne de métal passant au-dessus de l'anneau de garde. Dans ce cas, l'anneau de garde n'est isolé de la région active que par la couche d'oxyde servant de passivation des zones actives, d'une épaisseur de 100 nm. Ces trois types de géométrie sont illustrés à la Figure 4.27.

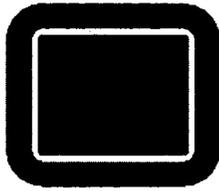


Figure 4.27.a : Géométrie avec contact intégré à la zone active.

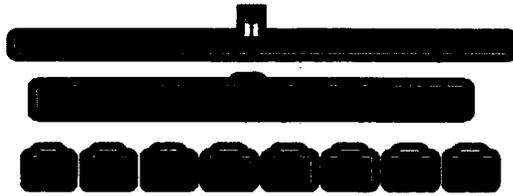


Figure 4.27.b : Géométries avec contact éloigné de la zone active.

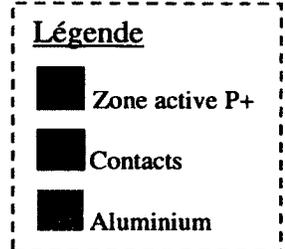
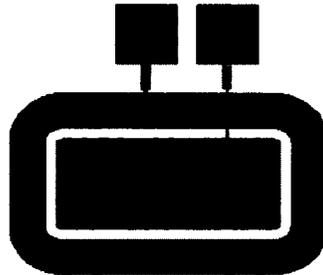


Figure 4.27.c : Géométrie avec contact éloigné et relié par une ligne de métal passant au-dessus de l'anneau.



Les nouvelles géométries élaborées sont détaillées à l'Annexe D.

4.4 Résultats et discussion (deuxième itération)

4.4.1 Résultats globaux

Les étapes du procédé de fabrication ont été réalisées en parallèle sur toutes les gaufres jusqu'à l'étape d'activation des dopants. À cette étape, la gaufre B a été subdivisée en quatre et les autres gaufres ont été mises de côté. Les quatre types de diffusion ont été réalisés chacune sur un quart de la gaufre B. Ensuite, les étapes finales, jusqu'au recuit d'alliage silicium aluminium, ont été effectuées sur la gaufre B. Une première série de caractérisation IV et CV a révélé que les structures présentes sur les quatre quarts de gaufre ne présentent pas le comportement typique de jonctions PN. La gaufre B ne peut pas être évaluée.

Il a été décidé de poursuivre les étapes de fabrication sur les gaufres restantes en utilisant le type de recuit d'activation de la gaufre fonctionnelle de la précédente itération, c'est-à-dire, 950 °C 30 minutes. Seule l'étape de déposition du nitrure n'a pas été réalisée, comme pour la

gaufre B. Suite à l'évaluation des performances électriques, il s'est avéré que les courbes IV des structures de toutes les gaufres ne sont pas standards. En conclusion, les structures présentes sur les sept gaufres ne présentent pas le comportement typique de jonctions PN et ne peuvent ainsi pas être évaluées.

4.4.2 Hypothèses

Plusieurs hypothèses ont été émises afin d'expliquer le non-fonctionnement de toutes les gaufres du présent procédé.

Passivation de la région active

Pour les deux croissances réalisées à l'INRS, les temps de diffusion ont été choisis en fonction des recettes standards de l'INRS. Ces recettes sont développées sur des substrats de diamètre de deux pouces, alors que les substrats utilisés au CRN² ont trois pouces de diamètre. Il s'est avéré que sur nos substrats, la croissance a été plus efficace que sur les contrôles utilisés. Ainsi, les étapes d'oxydation réalisées à l'INRS n'ont pas fourni l'épaisseur d'oxyde prévue. Dans le cas de la première oxydation, la différence était négligeable, mais dans le cas de la croissance de la couche de protection de la région active, l'impact est plus important. La difficulté est qu'il était difficile de mesurer l'épaisseur d'oxyde cru, car aucun motif ne permettait l'utilisation de l'ellipsomètre. Seule la gaufre E permettait une mesure sur le dos de la gaufre, car celle-ci est polie des deux côtés et n'a pas reçu de polysilicium. Une mesure à l'ellipsomètre a indiqué ~130 nm, plutôt que les 100 nm prévus au départ.

Une épaisseur plus importante d'oxyde a pu modifier le profil de dopage des gaufres, car l'implantation est réalisée à travers cette couche de passivation. Des simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel Microtech afin de vérifier l'impact d'une couche d'oxyde plus épaisse. Les paramètres des simulations apparaissent au Tableau 4.10.

Tableau 4.10 : Paramètres de simulations Microtech.

Paramètres	Valeur
Dopage initial du substrat	$1.10^{12} \text{ cm}^{-3}$
Type d'oxydation	Sèche
Type de dopant	Bore
Énergie d'implantation	40 keV
Dose d'implantation	$2.10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Température de diffusion	900 °C
Durée de la diffusion	2 heures

Les résultats obtenus apparaissent à la Figure 4.. Selon les simulations réalisées, une épaisseur de 130 nm devrait permettre d'obtenir un profil de dopage près de celui créé avec une épaisseur de 100 nm, mais la jonction sera légèrement plus en surface. Également, selon les résultats obtenus, il faut une épaisseur d'oxyde plus grande que 550 nm pour bloquer complètement l'implantation.

En conclusion, l'épaisseur d'oxyde plus importante que prévu ne devrait pas, en théorie, affecter grandement le profil de dopage. Cependant, il est possible que le dopage plus en surface ait fragilisé la jonction et l'a rendu plus susceptible aux effets de surface induits par le procédé de fabrication.

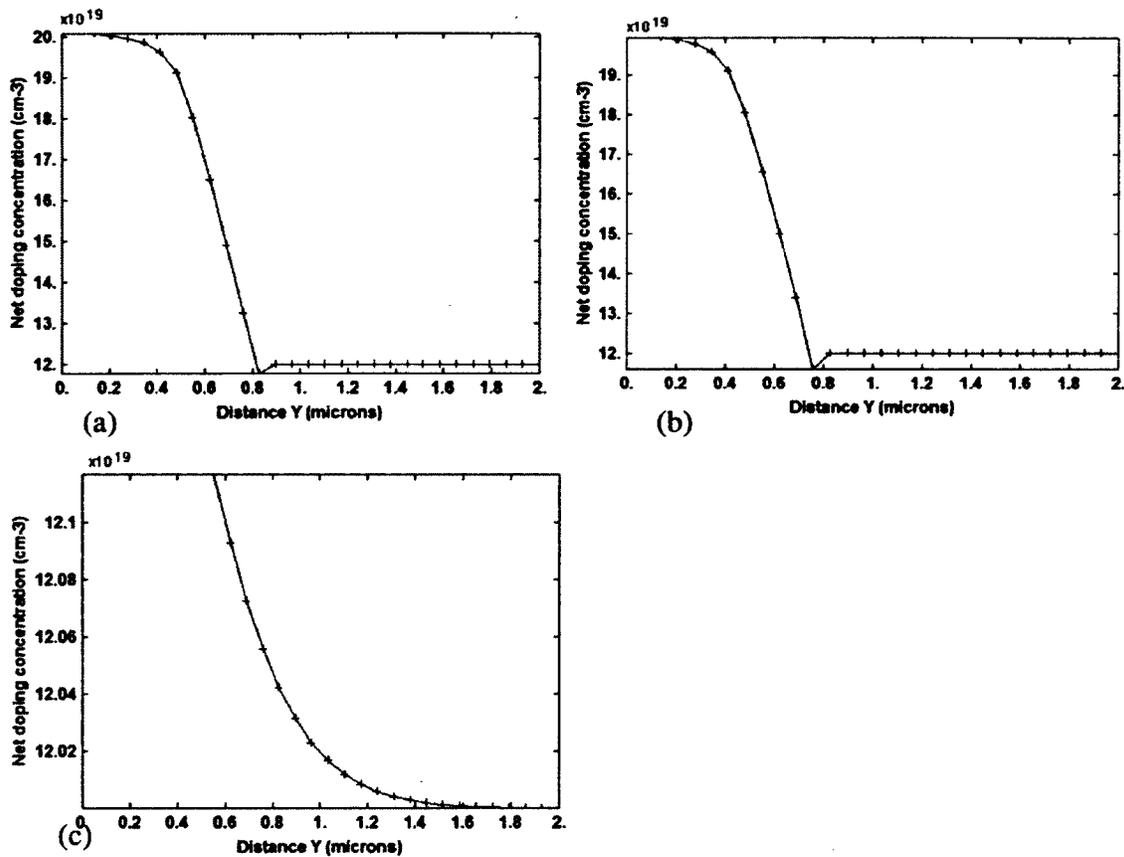


Figure 4.28 : Simulations Microtech du profil de dopage du substrat suite à la seconde croissance d'oxyde et à l'étape de recuit d'activation. Les paramètres communs aux deux simulations apparaissent au Tableau 4.10. L'épaisseur d'oxyde correspond à 100 nm (a), 130 nm (b) et à 550 nm (c).

Gravure des contacts

La température et l'humidité des salles blanches sont plus difficiles à contrôler durant la période estivale. Certaines étapes de fabrication sont sensibles à un taux d'humidité plus élevé, telles que l'application de la résine durant la photolithographie. Le résultat est une mauvaise adhésion et un décollement plus rapide de la résine durant une gravure humide. Ceci peut causer une surgravure de certaines structures.

La fabrication des gaufres de cette itération a été accomplie durant la période estivale. Durant l'étape de gravure humide des contacts, une surgravure importante a effectivement été observée. Plusieurs structures ont été visiblement détruites par cette étape.

Connexions électriques

L'utilisation de contact en métal placé directement sur les régions actives augmente les risques d'endommager la jonction lors de la caractérisation avec station sous pointe, mais également lors de l'encapsulation des photodiodes avec microsoudures. En effet, les pointes métalliques ou le fil de microsoudure peuvent traverser la mince couche métallique et la jonction pour créer un court-circuit permanent au substrat.

Pratiquement toutes les structures conçues ici ont leur contact métallique directement sur la région active et l'épaisseur de métal utilisé n'est que de 250 nm. Il est ainsi possible que les jonctions aient été court-circuitées par la caractérisation sur station sous pointe.

4.4.3 Recommandations finales

Il est nécessaire de renforcer le procédé de fabrication présent afin qu'il ne soit moins susceptible aux variations possibles des diverses étapes. Cette section regroupe quelques suggestions suite aux résultats de la dernière itération.

Profil de dopage

Afin de rendre le procédé de fabrication plus robuste, il est préférable de créer une jonction profonde dans le silicium. Pour se faire, plusieurs options peuvent être envisagées. Diminuer l'épaisseur de la couche d'oxyde de passivation et/ou augmenter l'énergie d'implantation permettrait d'obtenir une jonction plus profonde. Ensuite, il est également possible d'augmenter la température et/ou la durée du recuit d'activation.

Métallisation

Il est préférable d'éloigner les zones de contact électrique de la région active afin d'éliminer les risques de dommage par pointe métallique ou microsoudure. Dans le cas présent, il est nécessaire de redessiner le masque destiné à l'étape de métallisation. La zone de connexion doit être placée à l'extérieur de la région active, donc sur l'oxyde de champ, et reliée par une trace de métal à la région active.

Aussi, afin d'éliminer les possibilités de court-circuit causé par la dissolution de l'aluminium pur dans le silicium, il faudrait envisager l'utilisation d'autres types de métal ou d'un mélange d'aluminium avec silicium par pulvérisation.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a décrit l'analyse des performances obtenues, ainsi que les recommandations émises à la suite de cette analyse.

La première section a rapporté brièvement la méthode de caractérisation des détecteurs utilisée pour évaluer les performances des détecteurs fabriqués.

La deuxième section était consacrée à l'analyse des résultats obtenus suite à la fabrication de la première série de prototypes. Les résultats globaux ont d'abord été rapportés et analysés, soient les courbes IV, les courbes CV et les résistances de feuille mesurées. L'analyse du problème avec RTA et les recommandations émises pour éviter ce problème ont ensuite été décrites. L'analyse du fonctionnement de l'anneau de garde en fonction de la polarisation a également été abordée. Finalement, les meilleures performances obtenues lors de cette première itération ont été comparées aux résultats obtenus précédemment au CRN² et aux performances de dispositifs similaires commerciaux.

La troisième section a énoncé les modifications apportées à la conception des détecteurs afin de produire une deuxième itération de fabrication. Les paramètres structuraux, le procédé de fabrication et les géométries optimisées ont été répertoriés à cet endroit.

La quatrième et dernière section a conclu le chapitre par l'analyse des résultats obtenus de la deuxième itération, soient les performances obtenues, les hypothèses pouvant expliquer ces performances, ainsi que les recommandations finales quant à la conception et fabrication des détecteurs.

En outre, les résultats obtenus lors de la première itération démontrent que les performances ont été améliorées par rapport au premier procédé de fabrication réalisé au CRN². De plus, les caractéristiques électriques obtenues avec les nouveaux détecteurs ont été démontrées proches des performances de détecteurs commerciaux similaires.

CHAPITRE 5 - INTÉGRATION À LA PUCE MICROFLUIDIQUE ET ENCAPSULATION

Ce chapitre est consacré au deuxième objectif du projet, soit l'intégration du détecteur à la plateforme microfluidique et son encapsulation. La première section décrit le procédé de fabrication des canaux microfluidiques réalisés directement sur le substrat contenant les photodétecteurs. La deuxième section relate la procédure d'encapsulation développée spécifiquement pour la puce microfluidique. La troisième section décrit la réalisation et les résultats de la caractérisation d'un prototype fabriqué selon les méthodes énoncées dans les sections précédentes.

5.1 Fabrication de canaux microfluidiques

Afin de pouvoir intégrer le procédé de fabrication des photodiodes PIN à la puce microfluidique, il est essentiel de connaître les étapes de fabrication des microcanaux. On retrouve ici les étapes globales du procédé [Convert et al., 2008] .

Les microcanaux sont composés de deux couches de photorésine à base de polymère (KMPR). Une lamelle de verre, utilisée pour l'observation au microscope, ferme le canal. Cette lamelle est préalablement percée afin de conserver un accès au microcanal. Des nanoports permettent de relier un cathéter au microcanal. On observe une vue de coupe de la structure finale de la puce microfluidique à la Figure 5.1.

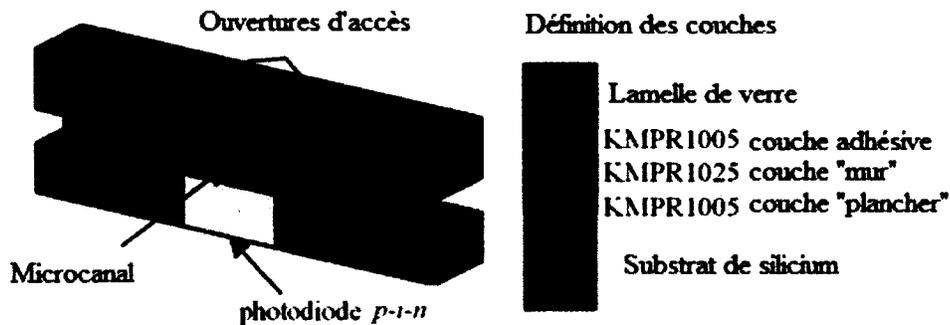


Figure 5.1 : Puce microfluidique intégrant les microcanaux à un substrat avec photodiodes PIN (vue de coupe).
(Adapté de [Convert et al., 2008])

La première étape de fabrication est de réaliser la couche « plancher » et la couche « mur » sur le substrat de base en silicium. Le substrat peut être vierge ou prétraité (comme dans le cas d'un substrat avec photodiodes PIN intégrées). Ensuite, la lamelle de verre est gravée. L'étape finale consiste au collage des deux substrats ensemble et à la pose des nanoports. Le procédé de fabrication complet est détaillé à l'Annexe E.

5.2 Procédure d'encapsulation

Afin d'intégrer une puce microfluidique à un circuit électronique, des interconnexions doivent exister. Le département de génie électrique de l'Université de Sherbrooke dispose d'un service d'usinage de circuit imprimé sur plaquette de cuivre. Pour des raisons de coût, de simplicité et d'efficacité, l'utilisation de ces plaquettes de cuivre a été privilégiée pour encapsuler les puces microfluidiques. Un procédé d'encapsulation sur carte de circuit imprimé a ainsi été élaboré à partir de ces plaquettes. Afin d'optimiser le procédé, plusieurs prototypes ont été montés à partir de puces microfluidiques fabriquées sur substrats commerciaux de la compagnie Perkin Elmer. Un exemple de prototype apparaît à la Figure 5.2.



Figure 5.2 : Exemple de prototype de puce microfluidique encapsulée sur plaquette de cuivre pour circuit imprimé.

La première étape du procédé d'encapsulation correspond à la préparation et à la gravure des plaquettes. Ensuite, la puce microfluidique est collée à la plaquette. Finalement, les microsoudures sont réalisées pour lier les lignes de métal aux régions de contact des photodiodes. Le procédé de fabrication complet est détaillé à l'Annexe F.

5.3 Réalisation et caractérisation d'un prototype de puce microfluidique

Cette section décrit d'abord les étapes de fabrication d'un prototype de puce microfluidique, et ensuite, les résultats de caractérisation électrique et nucléaire du prototype fabriqué.

5.3.1 Fabrication du prototype

Un prototype a été fabriqué à partir des diodes fabriquées à la première itération (Échantillon EC). Les diodes utilisées sont de géométrie carrée avec coins arrondis (2 mm^2), avec contact au centre en retrait. Ces diodes comportent un anneau de garde de $50 \mu\text{m}$ de large et espacé de la région active de $75 \mu\text{m}$. Les couches de passivation sont SiO_2 et Aluminium.

D'abord, un microcanal a été fabriqué sur l'échantillon selon la procédure énoncée à la section 5.1 **Fabrication de canaux microfluidiques**. Ensuite, la puce microfluidique a été encapsulée sur une plaquette de circuit imprimé selon la procédure énoncée à la section 5.2 **Procédure**

d'encapsulation. Le prototype final apparaît à la Figure 5.3. Un connecteur BNC a été ajouté afin de faire une connexion électrique séparée pour l'anneau de garde.



Connecteur
BNC pour la
connexion électrique
à l'anneau de garde

Figure 5.3 : Prototype de puce microfluidique intégrée avec photodiodes fabriquées au CRN² (Échantillon EC de la première itération).

5.3.2 Performances électriques

La fabrication du microcanal sur l'échantillon a abîmé deux diodes sur trois qui se trouvaient en dessous du canal. Une diode est demeurée fonctionnelle. Les performances électriques de cette diode ont été mesurées à chaque étape du procédé d'encapsulation et apparaissent à la Figure 5.4. On remarque que l'effet de résistance négative est présent sur ces courbes. Cependant, le courant d'obscurité diminue et se stabilise en dessous de 5 nA à partir d'une tension de polarisation de -20 V. Étant donné que la performance finale est très proche de la performance initiale, on en déduit que le procédé d'encapsulation et le test d'exposition aux radiations n'a pas modifié le fonctionnement de la diode. La performance mesurée après encapsulation a probablement été diminuée par un facteur temporaire comme un mauvais contact, humidité ou température ambiante plus élevée que durant les trois autres mesures.

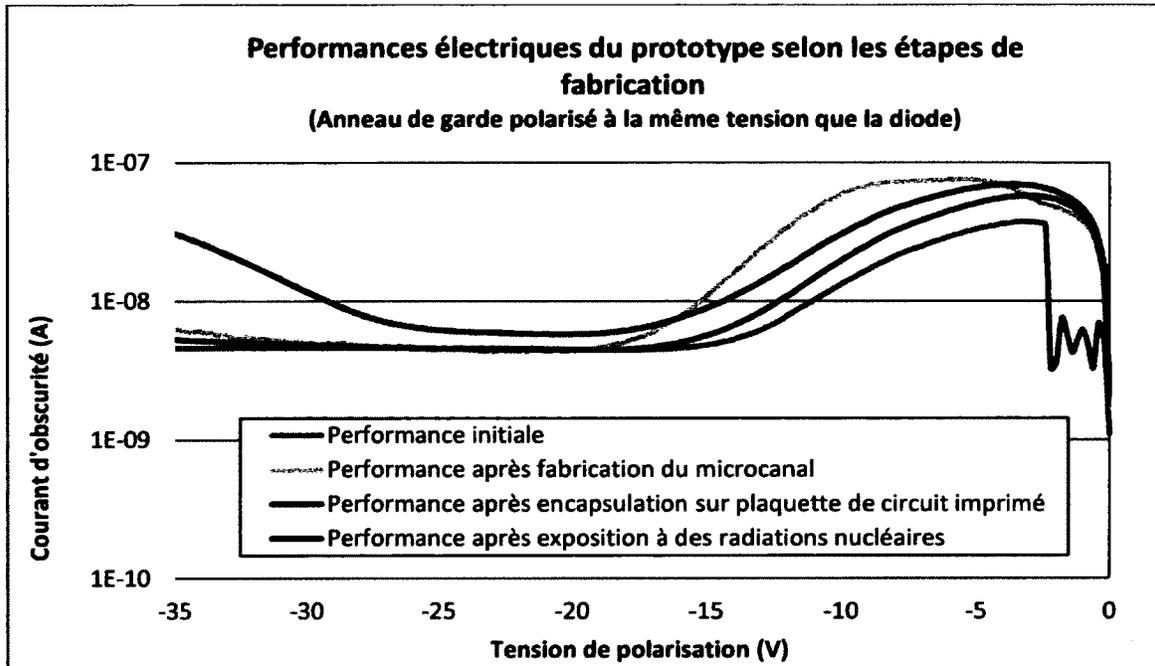


Figure 5.4 : Courbes IV en obscurité obtenues à chaque étape du processus d'encapsulation et de test de la puce microfluidique.

5.3.3 Caractérisation avec radiations nucléaires

Le prototype a été caractérisé pour l'application finale, c'est-à-dire la détection de radiations nucléaires sous forme de particules énergétiques. Pour effectuer ces mesures, un montage électronique a été réalisé à partir de cartes analogiques commerciales de la compagnie Cremat et d'une carte de conversion analogique à numérique conçue et montée par Laurence Convert [Convert, 2006]. La carte de conversion est reliée par communication série à un ordinateur. Ce montage est utilisé pour la mesure de l'activité radioactive dans le temps. Pour la mesure du spectre en énergie, la carte analogique est directement liée à une carte d'acquisition de signaux numériques intégrée à l'ordinateur. Une vue schématisée du montage électronique apparaît à la Figure 5.5.

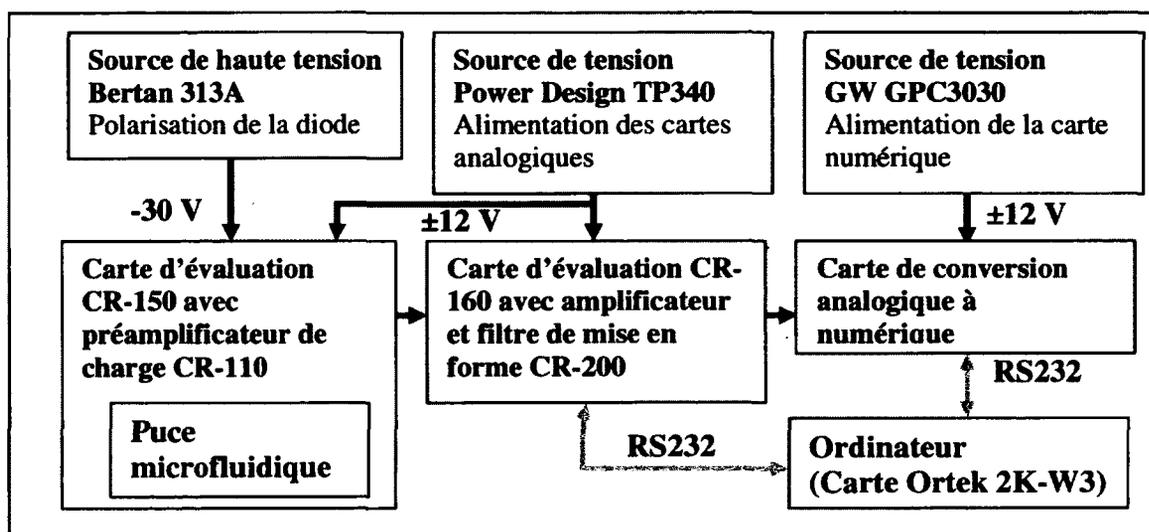


Figure 5.5 : Schéma du montage d'acquisition de données pour la détection de radiations nucléaires.

La première caractérisation avec radiations nucléaires a été un spectre en énergie des émissions radiatives du ^{18}F à partir de trois systèmes de détection différents. Le premier système correspond au montage utilisé dans le compteur μ volumétrique, c'est-à-dire une photodiode PIN commerciale de la compagnie Hamamatsu et un cathéter PE50 placé au-dessus (surface de détection totale : 90 mm^2). Le deuxième système est un prototype de puce microfluidique fabriquée sur une matrice de diodes commerciales de la compagnie Perkin Elmer (surface de détection totale : $25,2 \text{ mm}^2$). Le troisième système est le prototype de puce microfluidique réalisée sur les diodes fabriquées au CRN² présenté dans la section précédente (surface de détection totale : $1,1 \text{ mm}^2$). Les différents spectres mesurés à partir de ces trois systèmes apparaissent à la Figure 5.6.

Le seuil de bruit (en mV, convertible en keV) correspond au minimum de tension à partir duquel les impulsions détectées sont comptabilisées. La durée de l'acquisition (en s), le seuil de bruit ainsi que les surfaces de détection diffèrent dans les trois systèmes. Ces caractéristiques font qu'il est impossible de comparer la quantité de comptes entre chaque système. Cependant, il est possible de déterminer que les trois systèmes fonctionnent et permettent de réaliser la détection d'un spectre en énergie de positrons. En effet, la forme des trois spectres mesurés se rapproche grandement de la forme du spectre en énergie typique du

^{18}F énoncé à la section 2.1.1 **Caractéristiques du rayonnement à détecter**. Il est certain qu'une portion du spectre ne peut être détectée dans les trois systèmes étant donné que les positrons de faible énergie sont absorbés dans les premières couches interface du système (paroi du cathéter ou du microcanal, couches de passivation des diodes, etc.) ou génèrent des impulsions d'amplitude inférieure au niveau de bruit. Ensuite, en comparant l'énergie maximale détectée par rapport au seuil de bruit, il est possible d'évaluer grossièrement le rapport signal sur bruit des systèmes de détection. Le système avec diode Hamamatsu correspond à celui dont le rapport signal sur bruit est le plus élevé. Cette observation concorde avec les performances électriques du détecteur Hamamatsu (courant d'obscurité total et capacité plus faible que pour les deux autres détecteurs). L'énergie maximale détectée par les deux autres prototypes (sur puce microfluidique) est proche de celle du système avec Hamamatsu et le seuil de bruit légèrement plus élevé. Les rapports signal sur bruit sont donc relativement similaires.

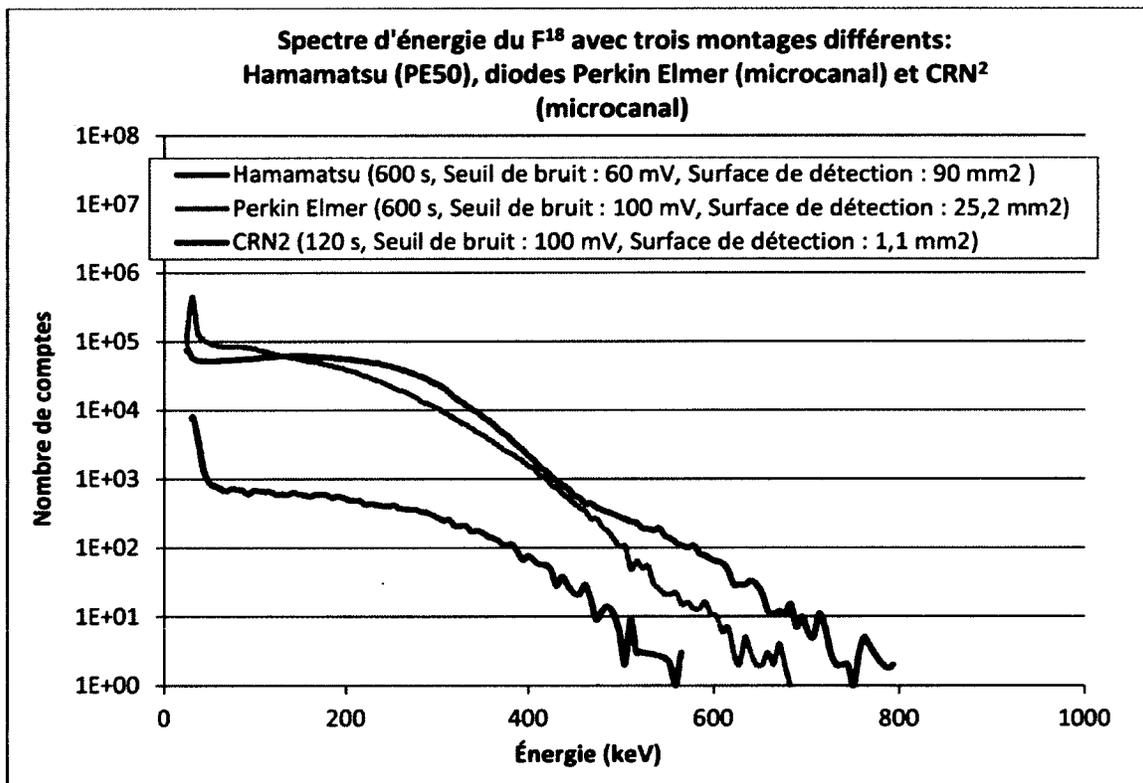


Figure 5.6 : Spectre d'énergie du ^{18}F mesuré sur trois différents systèmes de détection.

La deuxième caractérisation avec radiations nucléaires a été la mesure de l'activité radioactive du ^{18}F en fonction du temps sur le système de détection avec puce microfluidique sur diodes CRN². L'activité mesurée en comptes par seconde en fonction du temps est comparée à l'activité théorique à la Figure 5.7. On remarque que l'activité mesurée suit bien la décroissance théorique du ^{18}F dont la demi-vie est de 110 minutes (6600 secondes).

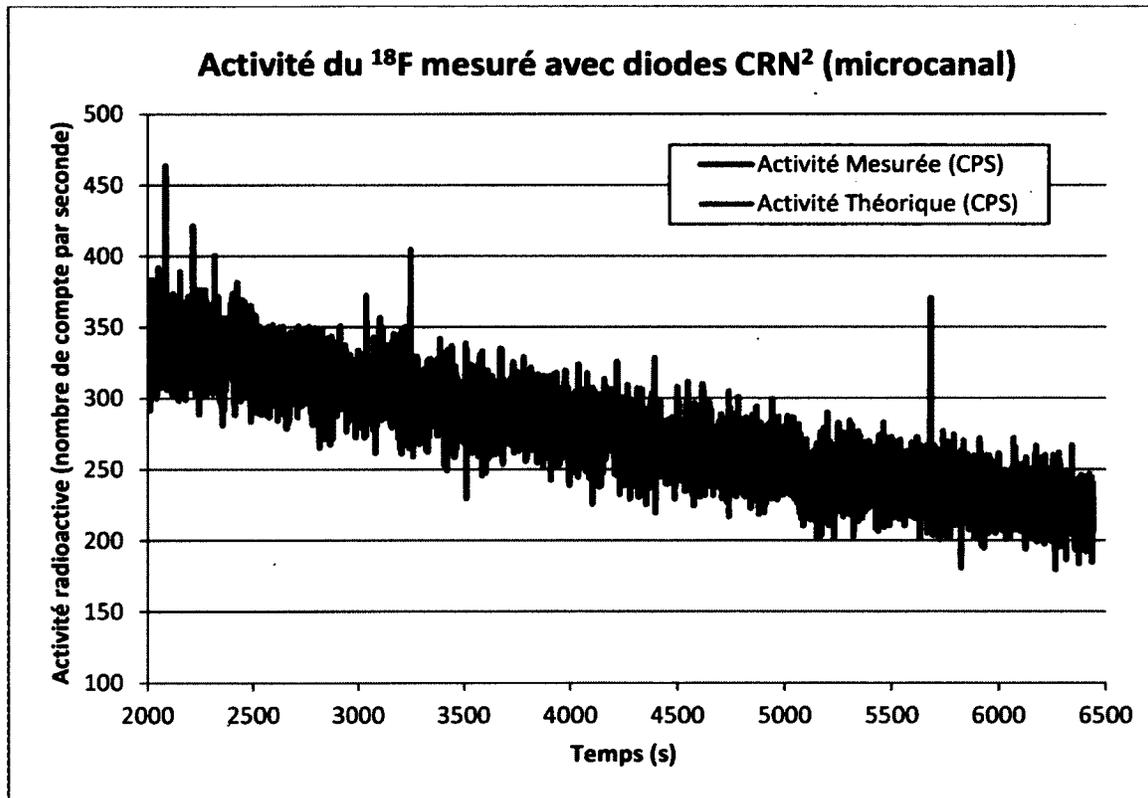


Figure 5.7 : Mesure de l'activité radioactive du ^{18}F à partir du système de détection avec diode CRN².

5.4 Conclusion

Ce chapitre a décrit l'intégration du détecteur à la plateforme microfluidique et son encapsulation.

Les deux premières sections étaient dédiées au procédé de fabrication des canaux microfluidiques utilisé dans la réalisation de la puce microfluidique, ainsi que la procédure d'encapsulation développée lors du présent projet de recherche et permettant de caractériser les prototypes.

La troisième section décrit la réalisation et les résultats de la caractérisation d'un prototype fabriqué selon les méthodes énoncées dans les sections précédentes. Les performances électriques des photodiodes caractérisées tout au long de la procédure d'encapsulation, ainsi que les performances finales du prototype, en caractérisation nucléaire, ont été répertoriées. La quatrième et dernière section est dédiée à la mention des performances globales obtenues au niveau de l'intégration des détecteurs à une puce microfluidique.

En outre, les résultats obtenus démontrent qu'il est possible de réaliser l'intégration des détecteurs fabriqués au CRN² à une puce microfluidique. À partir de la caractérisation électrique, il a été démontré que l'intégration et l'encapsulation des détecteurs n'altéraient pas leurs performances électriques. Finalement, il a été démontré que le prototype de puce microfluidique fabriquée permettait une détection fonctionnelle de la radioactivité en temps réel.

La preuve de concept a donc été réalisée à l'aide de la première série de photodiodes fabriquées dans le cadre de ce projet de recherche.

CHAPITRE 6 - CONCLUSION

Ce chapitre est consacré à faire un rappel sommaire du cadre et des objectifs initiaux du présent projet de recherche, pour ensuite résumer les divers travaux réalisés, ainsi que les performances obtenues, pour finalement énoncer les contributions et les perspectives d'avenir du projet.

6.1 Cadre et objectifs du projet

La tomographie d'émission par positrons (TEP) est une technique d'imagerie moléculaire qui consiste en l'injection d'une molécule, dont le comportement biologique est connu, dans le corps d'un sujet. La molécule a été préalablement marquée par un atome radioactif qui émet, en se désintégrant, des particules énergétiques nommées positron. En détectant le rayonnement émis, il est possible de créer une représentation 2D ou 3D de la concentration des molécules d'intérêt dans le corps et d'extraire ainsi une image métabolique du sujet. En recherche, lorsque la TEP est utilisée pour établir le comportement pharmacocinétique des molécules, il est nécessaire d'approfondir l'analyse réalisée à partir d'une image TEP par l'ajout d'une mesure dynamique de la radioactivité dans le sang. Le laboratoire de TEP animale de l'Université de Sherbrooke utilise présentement un compteur microvolumétrique automatisé pour réaliser cette mesure [Convert et al., 2007]. Ce compteur sanguin est limité par une mesure de l'activité du sang total, alors que la concentration radioactive plasmatique et la séparation d'échantillons sont très utiles. Également, l'efficacité de détection aurait avantage à être améliorée afin d'obtenir une mesure plus précise de l'activité radioactive. L'Université de Sherbrooke développe présentement un système microfluidique programmable d'échantillonnage ayant pour but de séparer et de mesurer la radioactivité du plasma en direct [Convert, 2007]. Ce système est destiné à caractériser de nouveaux radiotraceurs conçus au CIMS.

Le nouveau système nécessite un dispositif électronique assurant la détection de la radioactivité. Le détecteur en question doit être adapté et optimisé pour la mesure spécifique de la radioactivité présente sous forme de particules chargées provenant de radiotraceurs

communément utilisés en TEP. Le détecteur doit également pouvoir s'intégrer de manière optimale à la puce microfluidique en étant incorporé directement dans le substrat de silicium contenant les canaux microfluidiques. Enfin, la multitude de fonctions présentes sur la puce nécessite un contrôle total sur les paramètres de conception des détecteurs, aussi bien en termes de géométrie, qu'en termes de fabrication. C'est pourquoi il est impossible d'utiliser des dispositifs commerciaux dans le développement de la plateforme.

6.2 Sommaire du projet

Le but principal du présent projet de maîtrise était de réaliser le dispositif de détection des émissions de positrons intégrée à la puce microfluidique. Plus spécifiquement, le premier objectif était de faire la conception et la fabrication de détecteurs selon les principes de fabrication en salle blanche et la disponibilité des ressources au CRN². Le deuxième objectif était d'intégrer le dispositif à la plateforme microfluidique et d'en réaliser l'encapsulation.

L'option retenue a été l'usage de photodiodes PIN en silicium capables de détecter directement des particules énergétiques telles que les positrons. Un procédé de fabrication, ainsi qu'une série de photomasques ont été développés afin de produire une première itération de prototypes. Les détecteurs ont été conçus de manière à optimiser leur sensibilité en fonction du type de rayonnement à détecter. En effet, la région de détection doit être suffisamment épaisse et sensible pour absorber le maximum de particules énergétiques. Pour ce faire, des substrats de haute résistivité ont été choisis. Également, il est nécessaire de minimiser le courant de fuite en noirceur afin d'obtenir un photocourant directement proportionnel à l'énergie des radiations incidentes. Diverses stratégies ont été testées afin d'atteindre cet objectif, telles que deux types d'oxyde de champ (croissance humide et sèche), divers types de passivation (oxyde cru, oxyde PECVD, aluminium, oxyde + aluminium), deux types de recuit d'activation (fournaise standard et RTA), un piège à contaminant (couche de polysilicium dopé au dos des substrats), des structures d'anneau de garde, etc.

Les premières photodiodes fabriquées au CRN² ont permis de réaliser une preuve de concept. En effet, les caractéristiques électriques obtenues avec les détecteurs issus de cette première

itération ont été démontrées proches des performances de détecteurs commerciaux similaires. Le courant d'obscurité obtenu sur la structure carrée de 2 mm^2 est environ un ordre plus élevé que celui mesuré sur une structure similaire non encapsulée de la compagnie Perkin Elmer. Étant donné les conditions de fabrication de laboratoire, comparativement aux fonderies commerciales qui détiennent de l'équipement dédié à la fabrication de détecteurs en silicium, ces premières performances obtenues sont satisfaisantes. Pour ce qui est du courant d'obscurité obtenu sur une structure rectangulaire de 30 mm^2 , il est environ deux ordres plus élevés que celui mesuré sur une structure similaire encapsulée de la compagnie Hamamatsu.

Ensuite, il a été possible d'intégrer un canal microfluidique au substrat contenant les photodiodes fabriquées et d'en réaliser l'encapsulation sans altérer les performances électriques initiales des détecteurs. Une courbe de l'activité radioactive du ^{18}F a été mesurée, celle-ci se comparant à l'activité théorique associée à ce radioisotope communément utilisé en TEP. Enfin, un spectre en énergie des émissions radiatives du ^{18}F a été mesuré et comparé aux performances de systèmes utilisant des photodiodes commerciales. Il a également démontré que le prototype de puce microfluidique basée sur les photodiodes fabriquées au CRN² offrait un rapport signal sur bruit similaire aux systèmes basés sur des photodiodes commerciales. Les premiers prototypes fabriqués permettent ainsi de réaliser l'objectif principal du projet, c'est-à-dire la détection de particules chargées telles que les positrons, lorsqu'intégrés avec une puce microfluidique.

Le courant de fuite mesuré sur la première série de détecteurs, facteur principal limitant les performances dans ce type de dispositif, demeure, malgré tout, trop élevé. Une seconde itération a suivi afin d'optimiser les performances des détecteurs. Plusieurs modifications ont été apportées au procédé de fabrication, ainsi qu'à la géométrie des structures, telles que l'utilisation de substrats mieux adaptés à la présente application, l'ajout d'une passivation au nitrure, l'optimisation des configurations de l'anneau de garde et le choix de nouvelles géométries prévoyant une intégration à des microcanaux. Des problèmes durant la fabrication ont cependant compromis les performances de la deuxième itération de détecteurs. Une série de recommandations finales a été émise suite à cette dernière itération réalisée dans le cadre de ce projet de maîtrise.

6.3 Contributions et travaux futurs

Les résultats obtenus lors de la première itération démontrent que les performances ont été améliorées par rapport au premier procédé de fabrication réalisé au CRN². De plus, les caractéristiques électriques obtenues avec les nouveaux détecteurs ont été démontrées proches des performances de détecteurs commerciaux similaires. Ces résultats sont encourageants étant donné les contraintes de fabrication du CRN² qui ne sont pas idéales pour la fabrication de photodétecteur. En effet, ce laboratoire universitaire est utilisé pour une multitude de projets d'étude sur des sujets très variables, rendant la reproductibilité et la contamination des contraintes majeures du présent projet de recherche.

Ensuite, même si la technologie microfluidique offre plusieurs avantages et profite d'un développement exponentiel depuis plus de 10 ans, elle demeure une technologie émergente. Plusieurs fonctionnalités ont déjà été développées, mais aucun standard n'existe à l'heure actuelle et les systèmes intégrés demeurent rares. L'incorporation de détecteurs dans le substrat d'une puce microfluidique constituait ainsi un défi majeur de ce projet. Les résultats obtenus démontrent qu'il est possible de réaliser l'intégration de détecteurs fabriqués au CRN² à une puce microfluidique. À partir de la caractérisation électrique, il a été établi que la procédure d'encapsulation développée n'altérerait pas les performances électriques initiales des détecteurs. Finalement, il a été démontré qu'une puce microfluidique basée sur des photodiodes fabriquées au CRN² permettait une détection fonctionnelle de la radioactivité. Le rapport signal sur bruit était similaire à des systèmes comparables utilisant des photodiodes commerciales. La preuve de concept a donc été réalisée dans le cadre de ce projet de recherche.

Il est cependant encore nécessaire d'améliorer certains aspects de la conception des photodiodes afin de considérer le procédé de fabrication développé dans le cadre de ce projet de recherche utilisable à long terme dans le système d'échantillonnage microfluidique. D'abord, le courant d'obscurité doit être réduit afin de rendre utilisables les détecteurs de grande taille. Les stratégies développées dans ce sens lors de la deuxième itération sont susceptibles de répondre à ce besoin, mais leur effet doit encore être validé par une itération

supplémentaire. Ensuite, les résultats obtenus avec la deuxième itération démontrent que le procédé de fabrication demeure trop sensible aux variations de procédé et doit définitivement être repensé afin d'en améliorer la robustesse. Des stratégies ont également été émises au chapitre 4 afin d'améliorer cet aspect du procédé de fabrication.

L'utilisation de substrats commerciaux, option d'abord rejetée pour des raisons de contrôle des géométries des détecteurs, pourrait être réévaluée dans l'optique d'un compromis. Il est certain que cette option impose d'utiliser des structures prédéterminées sans pouvoir les modifier facilement en fonction des besoins de la puce microfluidique. Cependant, un procédé commercial permettrait de répondre aux problèmes de courant d'obscurité et de robustesse énoncés précédemment. Un environnement de production commerciale a certainement l'avantage de la reproductibilité et du contrôle des spécifications des détecteurs, en comparaison avec un procédé effectué dans les laboratoires du CRN². Toutefois, il est important d'avoir accès aux substrats avant la découpe et l'encapsulation, afin d'avoir la possibilité de fabriquer des canaux microfluidiques.

Une collaboration est déjà existante entre la compagnie Excelitas, basée à Montréal, et l'Université de Sherbrooke, pour la production du Labpet 1 et 2. Cette compagnie fabrique des photodétecteurs spécialisés, entre autres, pour la détection de rayonnement à haute énergie. Dans le cadre de travaux de recherche futurs, il serait ainsi possible d'utiliser des substrats industriels avec photodiodes non encapsulées comme base pour des dispositifs intégrés.

ANNEXE A - PROCÉDÉ DE FABRICATION DES PHOTODIODES

1^{ÈRE} ITÉRATION

1. Dégraissage et nettoyage du substrat

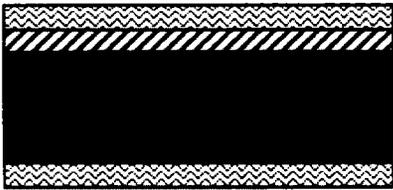
Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Marquage					
2. Nettoyage chimique RCA	Bancs humides Bain à ultrasons	Opticlear, Acétone, IPA Rinçage Eau DI	5 min 2 min		
		H ₂ O ₂ :H ₂ SO ₄ (1:1) Rinçage Cascade eau DI	15 min 2/3 min	Contenant de verre dans l'évier	
		HF:H ₂ O 1:10 Rinçage Cascade eau DI	15 s 1/0 min	Contenant de plastique	
		H ₂ O:H ₂ O ₂ :NH ₄ OH (100:4:1) Rinçage Cascade eau DI	10 min 1/1 min	65 °C	
		HF:H ₂ O / 1:50 Rinçage Cascade eau DI	15 s 30/0 s		
		H ₂ O:HCl:H ₂ O ₂ (6:1:1) Rinçage Cascade eau DI	10 min 2/3 min	65 °C	
		Semitool : rinçage/séchage	2/3 min		
					Dans bassin de quartz de 2l dédié et thermomètre dédié /plaque chauffante. Le mélange 100:4:1 évite les défauts de surface et est aussi efficace que 5:1:1. Transférer rapidement les gaufres de la cascade au bain de quartz du SC-2.

2. Croissance et gravure de l'oxyde de champ

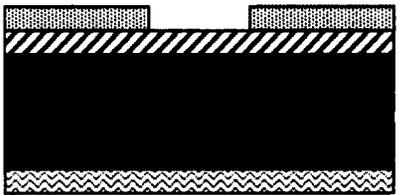
Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. A) Oxydation thermique humide	Four Tempress	1050 °C	67 min	0,6 µm Couche d'arrêt pour gravure polySi, masque dopage au bore et oxyde de champ	
2. B) Oxydation thermique sèche	Four Tempress	1100 °C	5 h	0,3 µm Couche d'arrêt pour gravure polySi, masque dopage au bore et oxyde de champ	
3. Mesure épaisseur	Ellipsomètre				
4. Déshydratation	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
5. HMDS	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s		
6. Étalement de résine S1813 sur la face avant	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 µm Masque de la face avant pour gravure de la face arrière au BOE	
7. Cuisson forte	Étuve	125 °C	30 min	Refroidissement air ambiant 5 min	

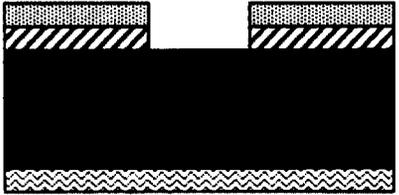
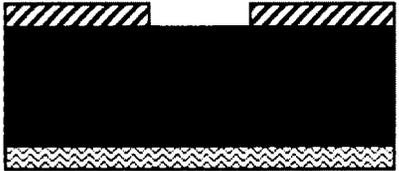
<p>8. Gravure chimique de l'oxyde sur la face arrière</p>	<p>Bancs humides</p>	<p>HF:NH₄F (1:6) (BHF) Rinçage Cascade eau DI Semitool : rinçage/séchage Inspection</p>	<p>2/2 min 2/3 min</p>	<p>110 nm/min, 26 °C Contenant de plastique dans un bain-marie Gravure jusqu'à couleur uniforme</p>	
<p>9. Décapage de résine</p>	<p>Bancs humides</p>	<p>Acétone + US IPA + US Rinçage eau DI Séchage azote</p>	<p>5 min 5 min</p>	<p>2 bains d'acétone Ultra-son</p>	

3. Dépôt de polysilicium sur la face arrière (facultatif)

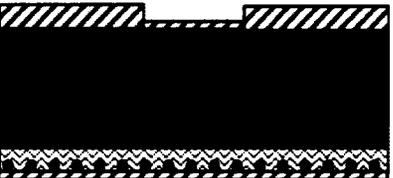
Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Nettoyage	Bancs humides	Nanostrip Rinçage Cascade eau DI HF:H ₂ O 1:50 Rinçage Cascade eau DI Semitool, rinçage/séchage	15 min 2/3 min 30s 2/3 min 2/3 min	Contenant de verre dans l'évier Contenant de plastique	Requis pour éviter les impuretés et pour retirer l'oxyde natif avant le dépôt. À faire peu de temps avant l'étape d'après.
2. Dépôt PolySi LPCVD	Four Tempress	650 °C		0.4 µm	
3. Mesure épaisseur	Ellipsomètre				
4. Gravure ASE		Gravure sur le dessus de la gaufre	8 min		

4. Photolithographie et gravure des jonctions

Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Déshydratation	Étuve	125 °C	30 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
2. HMDS	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s		
3. Étalement 4. de résine S1813	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 µm Masque pour gravure de SiO ₂ au HF	
5. Cuisson douce	Plaque chauffante	115 °C	1 min		
6. Exposition	Aligneuse : OAI	20 mW/cm ² Alignement : Oui Mode de contact : Dur Force : 15 mA	12 s	Masque 1 : Zones d'implantation	
7. Développement	Développeuse	MF319	30 s	Utiliser la machine développeuse plutôt que les bains (grandes zones de résine à soulever, nécessite pulvérisation)	
8. Cuisson forte	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min Avant gravure humide	

9. Descum	Plasmaline	75 W	1 min		
10. Gravure chimique de l'oxyde	Bancs humides	HF:NH ₄ F (1:6) (BHF) Rinçage Cascade eau DI Semitool : rinçage/séchage Inspection	2/2 min 2/3 min	110 nm/min, 26 °C Contenant de plastique dans un bain-marie (21,7 °C) Gravure jusqu'à couleur uniforme	
11. Décapage de résine	Bancs humides	Acétone + US IPA + US Rincage eau DI Séchage azote	5 min 5 min	2 bains d'acétone	

5. Dopage et recuit d'activation

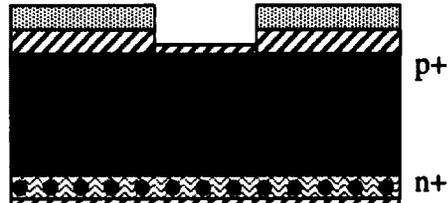
Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Nettoyage chimique RCA	Bancs humides Bain à ultrasons	H ₂ O ₂ :H ₂ SO ₄ (1:1) Rinçage Cascade eau DI	15 min 2/3 min	Contenant de verre dans l'évier	<p>Dans bassin de quartz de 2l dédié et thermomètre dédié /plaque chauffante. Le mélange 100:4:1 évite les défauts de surface et est aussi efficace que 5:1:1.</p> <p>Transférer rapidement les gaufres de la cascade au bain de quartz du SC-2.</p>
		H ₂ O:H ₂ O ₂ :NH ₄ OH (100:4:1) Rinçage Cascade eau DI HF:H ₂ O / 1:50 Rinçage Cascade eau DI	10 min 1/1 min 15 s 30/0 s	65 °C	
		H ₂ O:HCl:H ₂ O ₂ (6:1:1) Rinçage Cascade eau DI Semitool : rinçage/séchage	10 min 2/3 min 2/3 min	65 °C	
2. Oxydation sèche	Four Tempress	1100 °C	46 min	0,1 µm Protection contre défauts lors de l'implantation	
3. Dopage au Bore, face avant	Implanteur ionique	5.10 ¹⁵ cm ⁻² , 40 KeV			 p+
4. Dopage au Phosphore, face arrière	Implanteur ionique	5.10 ¹⁵ cm ⁻² , 140 KeV		0 nm : 8e ¹⁹ cm ⁻³ 310 nm : 1.5e ¹⁷ cm ⁻³ Après diffusion	 p+ n+

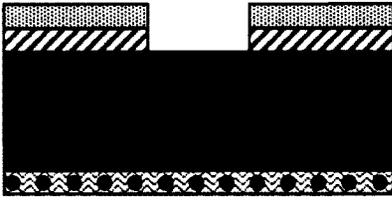
5. Mesure de l'épaisseur d'oxyde de protection	Ellipsomètre				
6. Nettoyage	Bancs humides Bain à ultrasons	Nanostrip Rinçage Cascade eau DI HF:H ₂ O 1:50 Rinçage Cascade eau DI Semitool : rinçage/séchage	15 min 2/3 min 15 s 1/0 min 2/3 min	Contenant de verre dans l'évier Contenant de plastique (à faire juste avant l'étape suivante)	
7. Activation des dopants	Four RTA	1050 °C	1 min	Recuit thermique rapide	
8. Activation des dopants	Four Tempress	950 °C, N ²	30 min	Faible température de recuit augmente durée de vie porteurs mais limite activation	

6. Découpage des gaufres

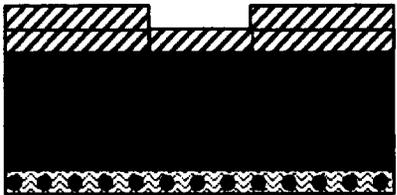
Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Déshydratation	Étuve	125 °C	30 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
2. HMDS	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s		
3. Étalement de résine S1813	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 µm Protection contre la contamination	
4. Cuisson forte	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
5. Collage	Papier bleu				
6. Découpage					
7. Décapage de résine	Bancs humides	Acétone + US IPA + US Rincage eau DI, Séchage azote	5 min 5 min	2 bains d'acétone	

7. Gravure de l'oxyde de protection (facultatif)

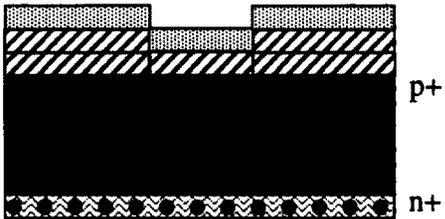
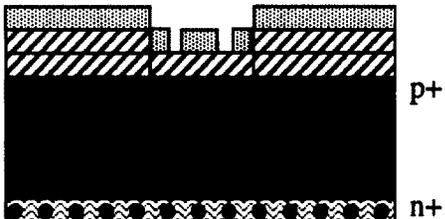
Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Déshydratation	Étuve	125 °C	30 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
2. HMDS	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s		
3. Étalement de résine S1813	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 µm Masque pour gravure de SiO ₂ au HF	
4. Cuisson douce	Étuve	115 °C	1 min		
5. Exposition	Aligneuse : OAI	20 mW/cm ² Alignement : Oui Mode de contact : Dur Force : 15 mA	12 s	Masque 1 : Zones d'implantation	
6. Développement	Développeuse	MF319	30 s		
7. Cuisson forte	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min Avant gravure	
8. Descum	Plasmaline	75 W	1 min		

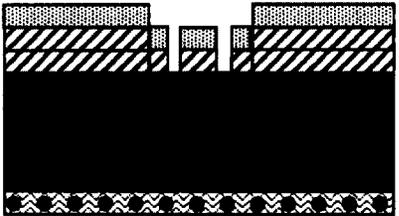
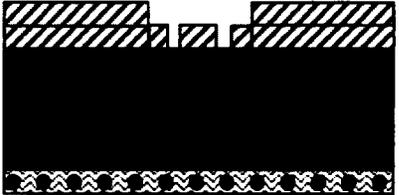
9. Gravure chimique de l'oxyde	Bancs humides	HF:NH ₄ F (1:6) (BHF) Rinçage Cascade eau DI Semitool : rinçage/séchage Inspection	1.1 min 2/2 min 2/3 min	110 nm/min, 26 °C Contenant de plastique dans un bain-marie (21,7 °C)	
10. Décapage de résine	Bancs humides	Acétone + US IPA + US Rinçage eau DI, Séchage azote	5 min 5 min	2 bains d'acétone	

8. Dépôt d'oxyde PECVD (facultatif)

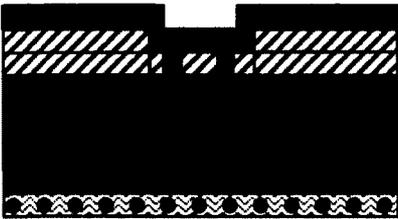
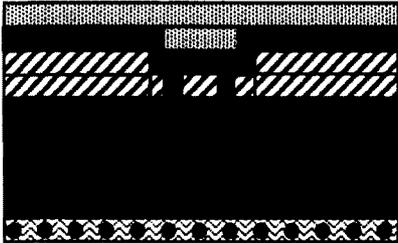
Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Nettoyage chimique	Bancs humides Bain à ultrasons	Nanostrip Rinçage Cascade eau DI Semitool : rinçage/séchage	15 min 2/3 min 2/3 min	Contenant de verre dans l'évier	
2. Dépôt Oxyde PECVD	STS			0,5 μm	 <p>p+</p> <p>n+</p>

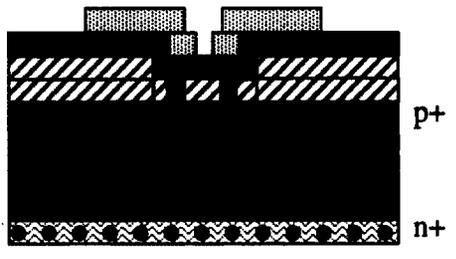
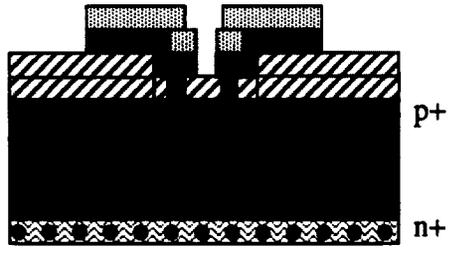
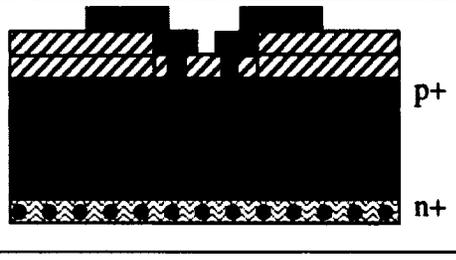
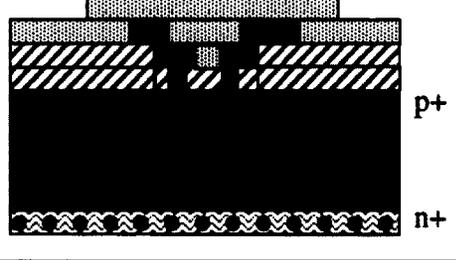
9. Ouverture des contacts

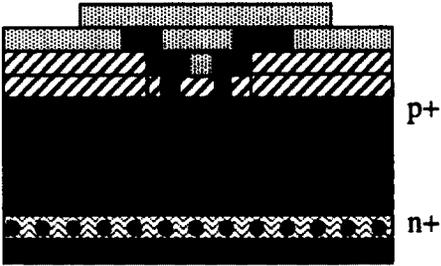
Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Déshydratation	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
2. HMDS	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s		
3. Étalement de résine S1813	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 µm Masque pour gravure de SiO ₂	
4. Cuisson douce	Étuve	115 °C	1 min		
5. Exposition	Aligneuse : OAI	20 mW/cm ² Alignement : Oui Mode de contact : Dur Force : 15 mA	12 s	Masque 2 : Ouverture des contacts	
6. Développement	Développeuse	MF319	30 s		
7. Cuisson forte	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
8. Descum	Plasmaline	75 W	1 min		

<p>9. Gravure chimique de l'oxyde</p>	<p>Bancs humides</p>	<p>HF:NH₄F (1:6) (BHF) Rinçage Cascade eau DI Semitool : rinçage/séchage Inspection</p>	<p>5 min 2/2 min 2/3 min</p>	<p>110 nm/min, 26 °C Contenant de plastique dans un bain-marie Surgravure facile avec 5 min à graver. Faire attention, ajouter seulement 10 s au temps calculé</p>	
<p>10. Décapage de résine</p>	<p>Bancs humides</p>	<p>Acétone + US IPA + US Rincage eau DI Séchage azote</p>	<p>5 min 5 min</p>	<p>2 bains d'acétone</p>	

10. Métallisation

Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Nettoyage chimique	Bancs humides	Nanostrip Rinçage Cascade eau DI Semitool, rinçage/séchage	15 min 2/3 min 2/3 min	Contenant de verre dans l'évier	
2. Dépôt Aluminium sur la face avant	Évaporateur Edwards			0,25 µm	 p+ n+
3. Déshydratation	Étuve	125°C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
4. HMDS	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s		
5. Étalement de résine S1813 face avant	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 µm Masque pour gravure Alu au H ₃ PO ₄	 p+ n+
6. Cuisson douce	Étuve	115 °C	1 min		
7. Exposition	Aligneuse : OAI	20 mW/cm ² Alignement : Oui Mode de contact : Dur Force : 15 mA	12 s	Masque 3 : Métallisation	

8. Développement	Développeuse	MF319			 p+ n+
9. Cuisson forte	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
10. Gravure chimique de l'aluminium	Bancs humides	H ₃ PO ₄ : IPA CH ₃ CO ₂ HCH ₃ (3:1) Rinçage Cascade eau DI Séchage azote	~1 min + 10 s 2/2 min	4 nm/s, 55 °C sur plaque chauffante avec agitation On verse l'acide dans l'IPA Inspection	 p+ n+
11. Décapage de résine	Bancs humides	1 ^{er} bain : Acétone + US 2 ^e bain : Acétone + US 3 ^e bain : IPA + US Rinçage Cascade eau DI Séchage azote Semitool, rinçage/séchage	2 min 2min 3 min 2/3 min		 p+ n+
12. Étalement de résine S1813 face avant	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 µm Protection pour l'évaporateur	 p+ n+
13. Cuisson forte	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement	

				air ambiant 5 min	
14. Gravure de l'oxyde natif	Bancs humides	HF:H ₂ O / 1:50 Rinçage Cascade eau DI Séchage azote	15 s 2/2 min	Ou jusqu'à hydrophobie À faire juste avant l'étape suivante	
15. Dépôt Aluminium sur la face arrière	Évaporateur Edwards			0,25 µm	 p+ n+
16. Décapage de résine	Bancs humides	1 ^{er} bain : Acétone + US 2 ^e bain : Acétone + US 3 ^e bain : IPA + US Rinçage Cascade eau DI Séchage azote Semitool, rinçage/séchage	2 min 2 min 3 min 2/3 min		 p+ n+
17. Recuit d'alliage Al-Si	Four tempres	450 °C 80% N ₂ , 20% H ₂	30 min		

ANNEXE B - PHOTOMASQUE 1^{ÈRE} ITÉRATION

Première série : structures adaptées à l'intégration aux microcanaux

D'abord, une première série de diodes ont été conçues de manière à s'adapter à la structure des microcanaux et apparaissant à la Figure B.1.

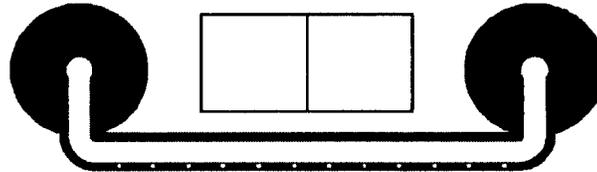


Figure B.1 : Structure d'un microcanal.

Les caractéristiques de base de cette série sont les suivantes :

- Forme de la région active : rectangulaire avec coins arrondis.
- Surface active: 30,7 mm².
- Contact : intégré à la région active.
- Forme de l'anneau de garde : régulière entourant la région active à distance égale sur tout le périmètre.
- Largeur de l'anneau de garde : 100µm.
- Espacement de l'anneau de garde : 75µm.

Les différents paramètres géométriques évalués sont détaillés au Tableau B.1 et illustrés à la Figure B.2.

Tableau B.1 : Structures adaptées à l'intégration aux microcanaux.

#	Description	Passivation de la région active	Passivation de l'anneau de garde
1.a	Géométrie : Anneau de garde.	SiO ₂ + Aluminium	Aluminium
1.b	Géométrie : Anneau de garde.	SiO ₂	Aluminium
1.c	Géométrie : Anneau de garde.	Aluminium	Aluminium
1.d	Géométrie : Sans anneau. Passivation et contact en aluminium, dépassant la zone active sur une largeur	Aluminium	Aluminium

	de 800 μm .		
1.e	Géométrie : Sans anneau.	SiO ₂ + Aluminium	-
1.f	Géométrie : Sans anneau.	SiO ₂	-
1.g	Géométrie : Sans anneau.	Aluminium	-

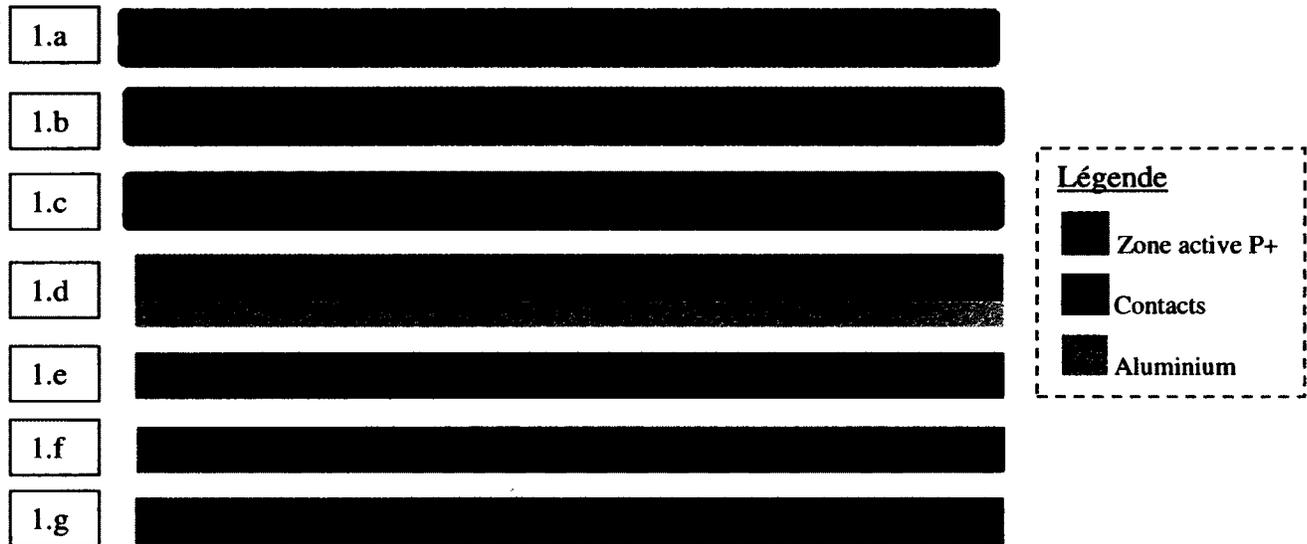


Figure B.2 : Structures adaptées à l'intégration aux microcanaux.

Deuxième série : structures pour largeur et espacement d'anneau de garde

Des structures ont été élaborées afin de déterminer l'effet de la largeur et de l'espacement de l'anneau de garde sur le courant de fuite de la diode.

Les caractéristiques de cette série sont les suivantes :

- Forme de la région active : carrée avec coins arrondis (2 mm^2).
- Contact : intégré à la région active.
- Forme de l'anneau de garde : régulière entourant la région active à distance égale sur tout le périmètre.
- Largeur de l'anneau de garde : $50\mu\text{m}$ (2.a) et $25\text{-}50\text{-}75\text{-}100\text{-}150\mu\text{m}$ (respectivement, 2.b1 à 2.b5).
- Espacement de l'anneau de garde : $200\text{-}150\text{-}125\text{-}100\text{-}75\mu\text{m}$ (respectivement, 2.a1 à 2.a5) et $75\mu\text{m}$ (2.b).
- Passivation de la région active: Aluminium.
- Passivation de l'anneau de garde : Aluminium.

Les différents paramètres géométriques évalués sont illustrés à la Figure B.3.

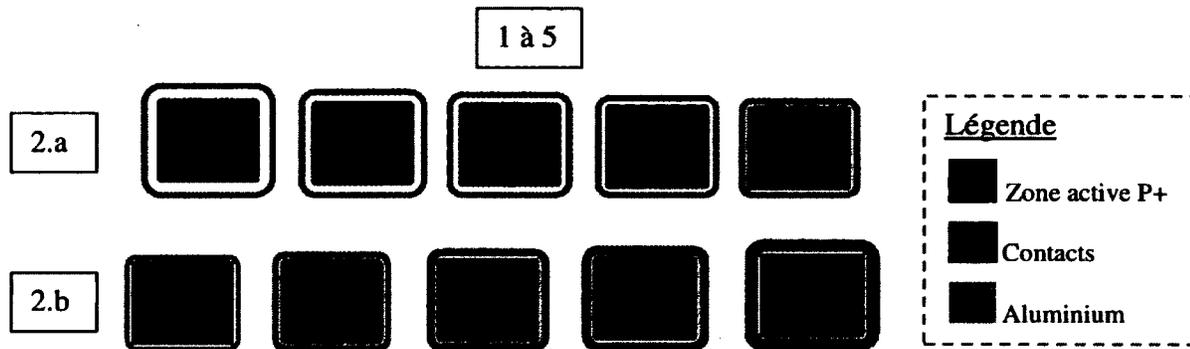


Figure B.3 : Structures pour largeur et espacement d'anneau de garde.

Troisième série : structures pour la passivation

Des structures ont été élaborées afin de déterminer l'effet du matériau de passivation de la région active sur le courant de fuite de la diode.

Les caractéristiques de base de cette série sont les suivantes :

- Forme de la région active : carrée avec coins arrondis (2 mm^2).
- Largeur de l'anneau de garde : $50 \mu\text{m}$.
- Espacement de l'anneau de garde : $75 \mu\text{m}$.

Les différents paramètres géométriques évalués sont détaillés au Tableau B.2 et illustrés à la Figure B.4.

Tableau B.2 : Structures pour la passivation.

#	Description	Passivation de la région active	Passivation de l'anneau de garde
3.a	Géométrie : Région active entièrement recouverte d'aluminium. Anneau de garde de forme régulière.	Aluminium	Aluminium
3.b	Géométrie : Région active entièrement recouverte d'aluminium. Aucun anneau de garde.	Aluminium	-
3.c	Géométrie : Contact placé au centre et en retrait. Anneau de garde de forme régulière.	SiO ₂	Aluminium
3.d	Géométrie : Contact au centre et en retrait. Aucun anneau de garde.	SiO ₂	-
3.e	Géométrie : Contact au centre et en retrait. Anneau de garde de forme régulière.	SiO ₂ + Aluminium	Aluminium
3.f	Géométrie : Contact au centre et en retrait. Aucun anneau de garde.	SiO ₂ + Aluminium	-

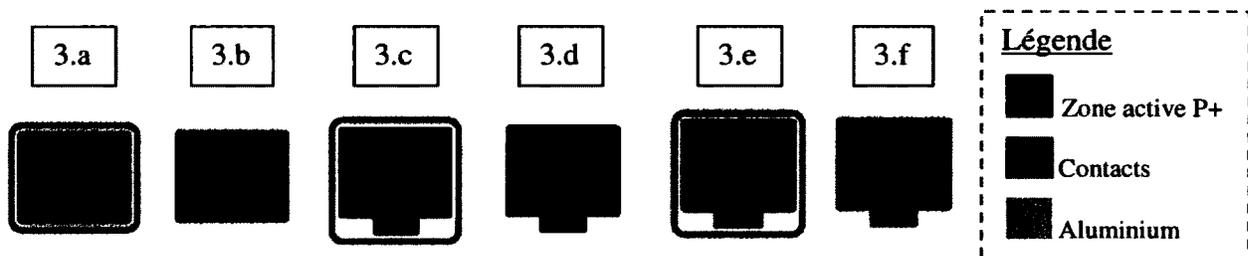


Figure B.4 : Structures pour la passivation.

Quatrième série : structures pour les contacts électriques

Des structures ont été élaborées afin de déterminer l'influence de la position de la géométrie du contact électrique sur le courant de fuite de la diode.

Les caractéristiques de base de cette série sont les suivantes :

- Forme de la région active : carrée avec coins arrondis (2 mm²).
- Aucun anneau de garde.
- Passivation : SiO₂

Les différents paramètres géométriques évalués sont détaillés au Tableau B.3 et illustrés à la Figure B.5.

Tableau B.3 : Structures pour les contacts électriques.

#	Description
4.a	Géométrie : Contact correspondant à deux carrés placés au centre et en retrait de la région active.
4.b	Géométrie : Contact placé au centre et en retrait de la région active.
4.c	Géométrie : Anneau de contact entourant la région active.
4.d	Géométrie : Contact intégré à la région active.
4.e	Géométrie : Contact correspondant à deux carrés intégré à la région active.
4.f	Géométrie : Contact rectangulaire intégré à la région active.

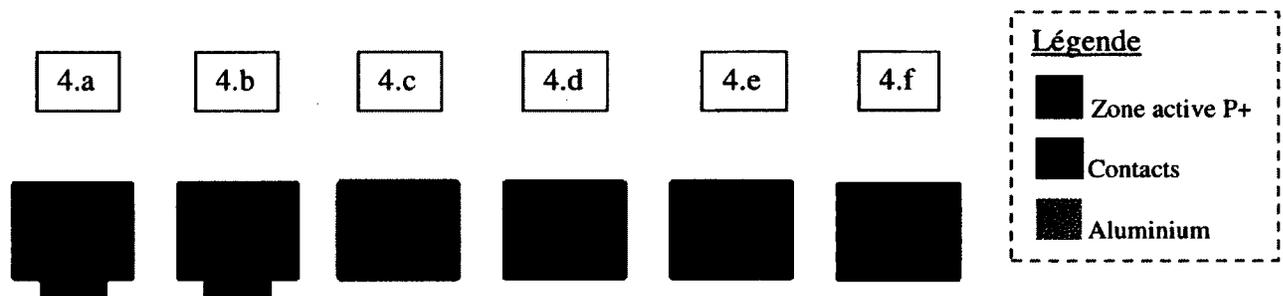


Figure B.5 : Structures pour les contacts électriques.

Cinquième série : autres structures de test

Les structures rondes utilisées lors du premier procédé de fabrication au CRN² ont été ajoutées aux photomasques à des fins de comparaison. De plus, des structures ont été élaborées afin de tester différents paramètres électriques (résistance de couche, limites géométriques du procédé, proportion du courant de fuite en surface).

Les différents paramètres géométriques évalués sont détaillés au Tableau B.4 et illustrés à la Figure B.6.

Tableau B.4 : Autres structures de test.

#	Description
5.a	Géométrie : Ronde ($3,1 \text{ mm}^2$). Anneau de garde entourant la région active (Largeur : $200 \mu\text{m}$ et espacement : $75 \mu\text{m}$). Passivation de la région active : SiO_2 . Passivation de l'anneau de garde : SiO_2 + aluminium. Contact intégré à la région active et en retrait de l'anneau.
5.b	Géométrie : Ronde ($0,79 \text{ mm}^2$). Anneau de garde entourant la région active (Largeur : $200 \mu\text{m}$ et espacement : $75 \mu\text{m}$). Passivation de la région active : SiO_2 . Passivation de l'anneau de garde : SiO_2 + aluminium. Contact intégré à la région active et en retrait de l'anneau.
5.c	Géométrie : Ronde ($0,79 \text{ mm}^2$). Sans anneau de garde. Passivation de la région active : SiO_2 . Contact intégré à la région active.
5.d	Géométrie : Zone P+ rectangulaire pour la mesure de la résistance de couche.
5.e	Géométrie : Structures de test pour les limites de la photolithographie.
5.f	Géométrie : Diodes à grille contrôlée (<i>Gate-Controlled Diode</i>) pour la proportion de courant de fuite en surface.

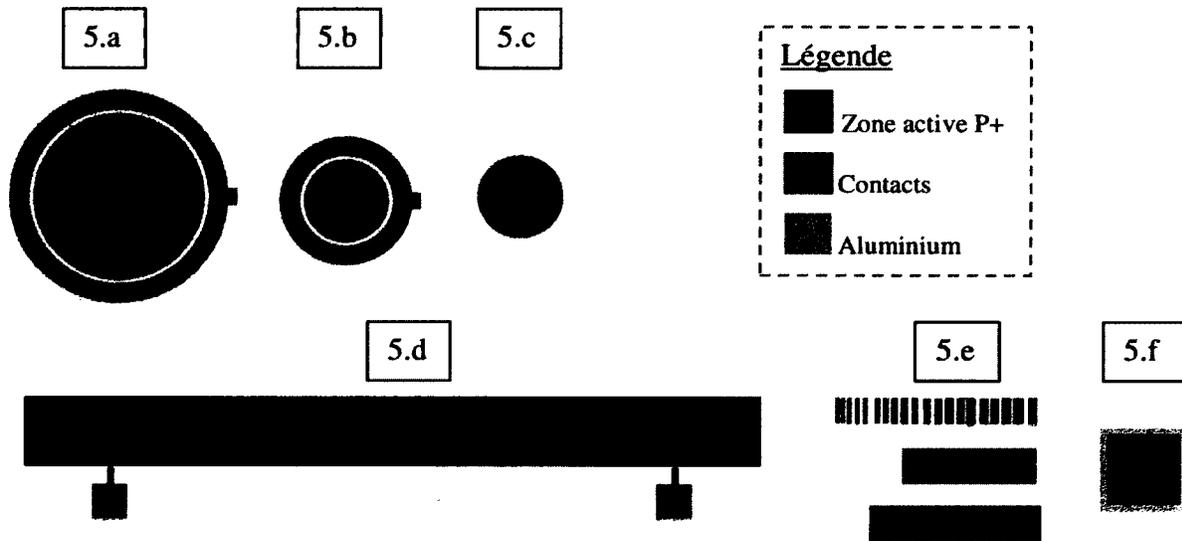


Figure B.6 : Autres structures de test.

Photomasques

Les photomasques ont été divisés en quatre sections de manière à pouvoir couper la gaufre en quatre et effectuer une comparaison au niveau des quarts de gaufre. Pour se faire, plusieurs structures sont répétées sur les quatre sections. Les structures utilisées sont détaillées au Tableau B.5 et les photomasques correspondants sont représentés à la Figure B.7.

Tableau B.5 : Structures répétées sur tous les quarts de gaufre.

#	Description
1	Structures adaptées à l'intégration aux microcanaux
2	Structures pour largeur et espacement d'anneau de garde
3	Structures pour la passivation
4	Structures pour les contacts électriques
5	Structures rondes
6	Zone p+ rectangulaire
7	Structures de test de photolithographie
8	Diodes à grille contrôlée

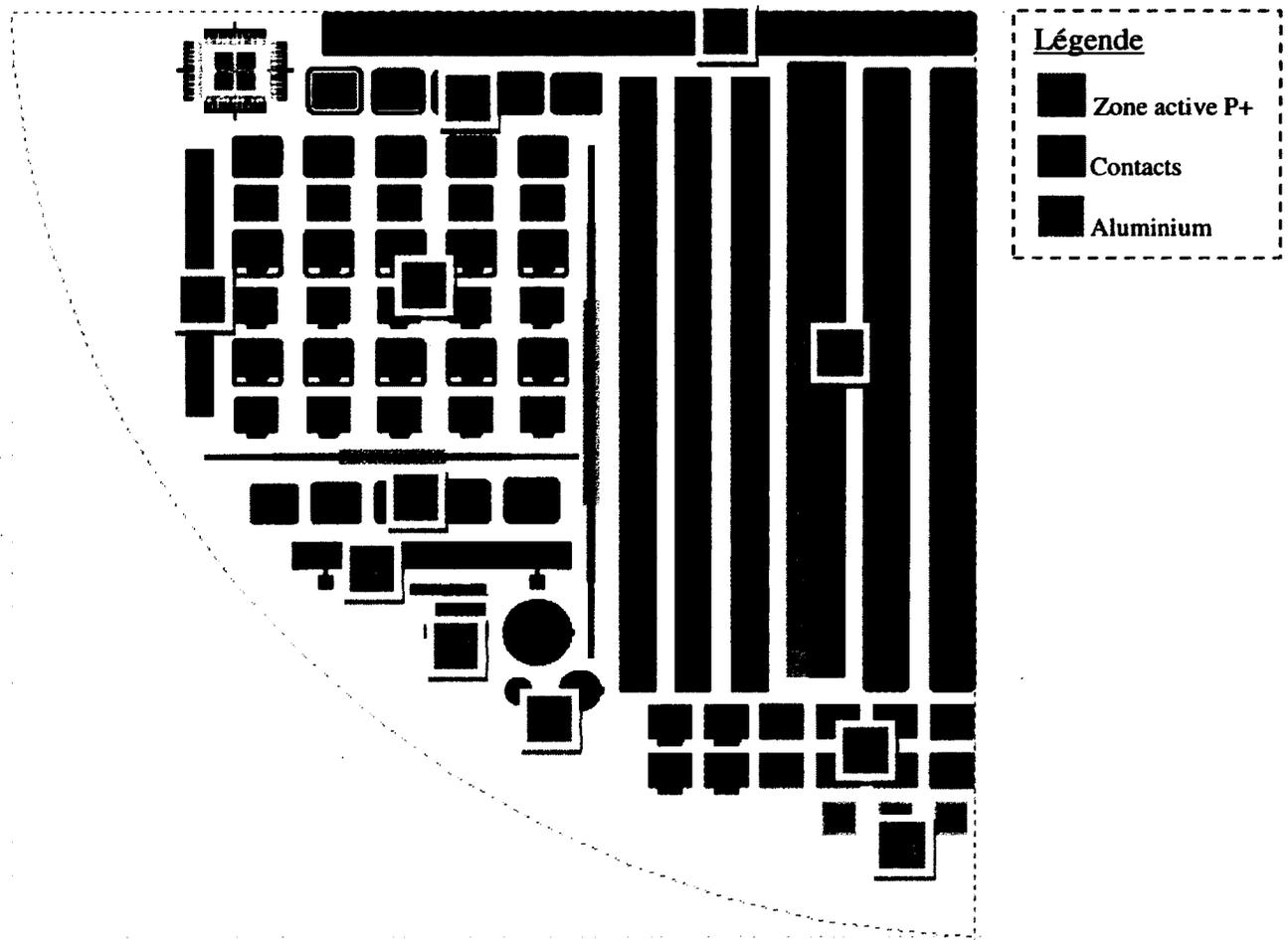


Figure B.7 : Photomasques de la première itération.

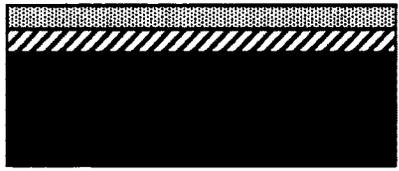
ANNEXE C - PROCÉDÉ DE FABRICATION DES PHOTODIODES

2^E ITÉRATION

1. Dégraissage et nettoyage du substrat

Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Marquage					
2. Nettoyage chimique RCA	Bancs humides Bain à ultrasons	Opticlear, Acétone, IPA Rinçage Eau DI	5 min 2 min		 <p>Dans bassin de quartz de 2l dédié et thermomètre dédié /plaque chauffante. Le mélange 100:4:1 évite les défauts de surface et est aussi efficace que 5:1:1.</p> <p>Transférer rapidement les gaufres de la cascade au bain de quartz du SC-2.</p>
		H ₂ O ₂ :H ₂ SO ₄ (1:1) Rinçage Cascade eau DI	15 min 2/3 min	Contenant de verre dans l'évier	
		HF:H ₂ O 1:10 Rinçage Cascade eau DI	15 s 1/0 min	Contenant de plastique	
		H ₂ O:H ₂ O ₂ :NH ₄ OH (100:4:1) Rinçage Cascade eau DI	10 min 1/1 min	65 °C	
		HF:H ₂ O / 1:50 Rinçage Cascade eau DI	15 s 30/0 s		
		H ₂ O:HCl:H ₂ O ₂ (6:1:1) Rinçage Cascade eau DI Semitool : rinçage/séchage	10 min 2/3 min 2/3 min	65 °C	

2. Croissance et gravure de l'oxyde de champ

Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Oxydation thermique humide	Four Tempress	1050 °C	67 min <111> 77 min <100>	0,6 µm Couche d'arrêt pour gravure polySi, masque dopage au bore et oxyde de champ	
2. Mesure épaisseur	Ellipsomètre				
3. Déshydratation	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
4. HMDS	Étaleuse	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s		
5. Étalement de résine S1813 sur la face avant	Étaleuse	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 µm Masque de la face avant pour gravure de la face arrière au BOE	
6. Cuisson forte	Étuve	125 °C	30 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
7. Gravure chimique de l'oxyde sur la face arrière	Bancs humides	HF:NH ₄ F (1:6) (BHF) Rinçage Cascade eau DI Semitool : rinçage/séchage Inspection	2/2 min 2/3 min	110 nm/min, 26 °C Contenant de plastique dans un bain-marie	

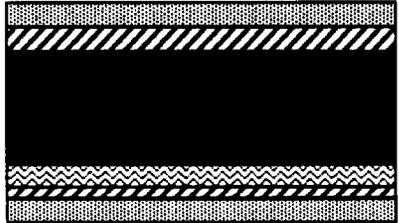
				Gravure jusqu'à couleur uniforme	
8. Décapage de résine	Bancs humides	Acétone + US IPA + US Rincage eau DI Séchage azote	5 min 5 min	2 bains d'acétone Ultra-son	

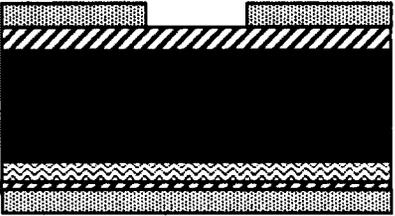
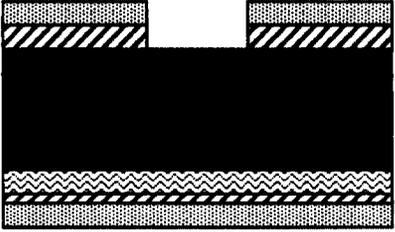
3. Dépôt de polysilicium sur la face arrière (facultatif)

Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Nettoyage	Bancs humides	H ₂ O ₂ :H ₂ SO ₄ (1:1) Rinçage Cascade eau DI HF:H ₂ O 1:50 Rinçage Cascade eau DI Semitool, rinçage/séchage	15 min 2/3 min 30s 2/3 min 2/3 min	Contenant de verre dans l'évier Contenant de plastique	Requis pour éviter les impuretés et pour retirer l'oxyde natif avant le dépôt. À faire peu de temps avant l'étape d'après.
2. Dépôt PolySi LPCVD	Four Tempress	650 °C		0.4 µm	
3. Déshydratation	Étuve	125 °C	30 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
4. HMDS	Étaleuse Polos	Prog #14 (500/5000rpm)			
5. Étalement de résine S1813	Étaleuse	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 µm Masque pour gravure du polySi	
6. Cuisson forte	Étuve	125 °C	30 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
7. Gravure humide du polySi sur la face avant		HNO ₃ :HF:H ₂ O (40:1:50) Rinçage Cascade eau DI Semitool, rinçage/séchage		Contenant de plastique Gravure jusqu'à disparition du polysilicium	

8. Décapage de résine	Bancs humides	Acétone + US IPA + US Rinçage Cascade eau DI Semitool, rinçage/séchage	5 min 5 min 2/3 min	2 bains d'acétone Ultra-son	
9. Nettoyage	Bancs humides	$H_2O_2:H_2SO_4$ (1:1) Rinçage Cascade eau DI Semitool, rinçage/séchage	15 min 2/3 min 2/3 min	Contenant de verre dans l'évier	Requis pour éviter les impuretés.
10. Dépôt oxyde PECVD sur face arrière	Four			80 nm Rercouvrement du polySi pour protection contre l'oxydation	

4. Photolithographie et gravure des jonctions

Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Déshydratation	Étuve	125 °C	30 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
2. HMDS	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s		
3. Étalement de résine S1813	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 µm Masque pour gravure de SiO ₂ au HF	
4. Cuisson douce	Plaque chauffante	115 °C	1 min		
5. Étalement de résine S1813	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 µm Masque pour gravure de SiO ₂ au HF	
6. Cuisson douce	Étuve	100 °C	7 min		
7. Exposition	Aligneuse : OAI	20 mW/cm ² Alignement : Oui Mode de contact : Dur Force : 15 mA	12 s	Masque 1 : Zones d'implantation	

8. Développement	Développeuse	MF319	30 s	Utiliser la machine développeuse plutôt que les bains (grandes zones de résine à soulever, nécessite pulvérisation)	
9. Cuisson forte	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min Avant gravure humide	
10. Descum	Plasmaline	75 W	1 min		
11. Gravure chimique de l'oxyde	Bancs humides	HF:NH ₄ F (1:6) (BHF) Rinçage Cascade eau DI Semitool : rinçage/séchage Inspection	2/2 min 2/3 min	110 nm/min, 26 °C Contenant de plastique dans un bain-marie (21,7 °C) Gravure jusqu'à couleur uniforme	
12. Décapage de résine	Bancs humides	Acétone + US IPA + US Rinçage eau DI Séchage azote	5 min 5 min	2 bains d'acétone	

5. Dopage et recuit d'activation

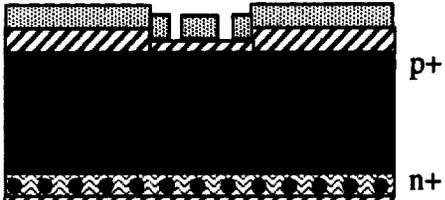
Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Nettoyage chimique RCA	Bancs humides Bain à ultrasons	H ₂ O ₂ :H ₂ SO ₄ (1:1) Rinçage Cascade eau DI H ₂ O:H ₂ O ₂ :NH ₄ OH (100:4:1) Rinçage Cascade eau DI HF:H ₂ O / 1:50 Rinçage Cascade eau DI H ₂ O:HCl:H ₂ O ₂ (6:1:1) Rinçage Cascade eau DI Semitool : rinçage/séchage	15 min 2/3 min 10 min 1/1 min 15 s 30/0 s 10 min 2/3 min 2/3 min	Contenant de verre dans l'évier 65 °C 65 °C	Dans bassin de quartz de 2l dédié et thermomètre dédié /plaque chauffante. Le mélange 100:4:1 évite les défauts de surface et est aussi efficace que 5:1:1. Transférer rapidement les gaufres de la cascade au bain de quartz du SC-2.
2. Oxydation sèche		1100 °C	46 min <111> 61 min <100>	0,1 µm Protection contre défauts lors de l'implantation	
3. Dopage au Phosphore, face arrière	Implanteur ionique	$5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 140 KeV			
4. Dopage au Bore, face avant	Implanteur ionique	$5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 40 KeV			
5. Activation des dopants	Four Tempress	A. 950 °C, N ² B. 900 °C, N ² C. 900 °C, N ²	A. 30 min B. 2h		

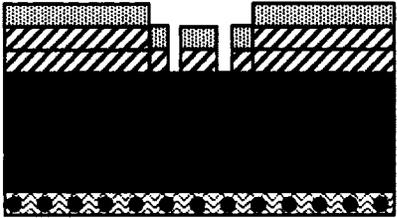
		D. 900 °C, N ²	C. 4h D. 12h		
--	--	---------------------------	-----------------	--	--

6. Découpage des gaufres

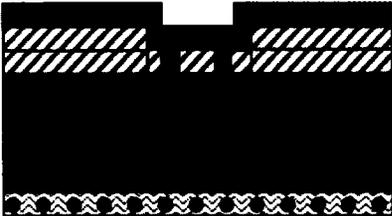
Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Déshydratation	Étuve	125 °C	30 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
2. HMDS	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s		
3. Étalement de résine S1813	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 µm Protection contre la contamination	
4. Cuisson forte	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
5. Collage	Papier bleu				
6. Découpage					
7. Décapage de résine	Bancs humides	Acétone + US IPA + US Rincage eau DI, Séchage azote	5 min 5 min	2 bains d'acétone	

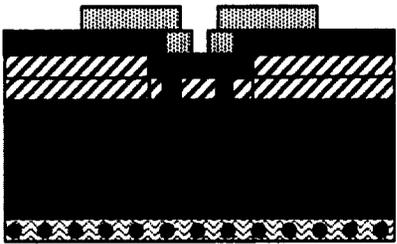
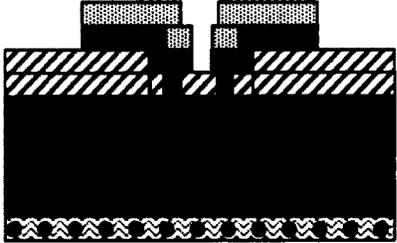
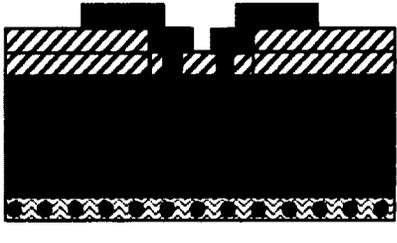
7. Ouverture des contacts

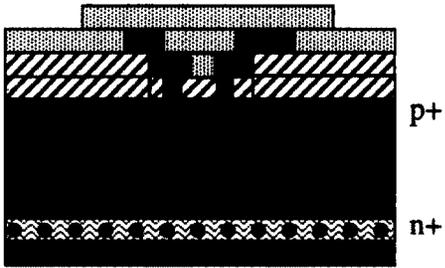
Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Déshydratation	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
2. HMDS	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s		
3. Étalement de résine S1813	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 µm Masque pour gravure de SiO ₂	
4. Cuisson douce	Étuve	115 °C	1 min		
5. Exposition	Aligneuse : OAI	20 mW/cm ² Alignement : Oui Mode de contact : Dur Force : 15 mA	12 s	Masque 2 : Ouverture des contacts	
6. Développement	Développeuse	MF319	30 s		
7. Cuisson forte	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
8. Descum	Plasmaline	75 W	1 min		

<p>9. Gravure chimique de l'oxyde</p>	<p>Bancs humides</p>	<p>HF:NH₄F (1:6) (BHF) Rinçage Cascade eau DI Semitool : rinçage/séchage Inspection</p>	<p>5 min 2/2 min 2/3 min</p>	<p>110 nm/min, 26 °C Contenant de plastique dans un bain-marie Faire attention, ajouter seulement 10 s au temps calculé</p>	 <p>p+ n+</p>
<p>10. Décapage de résine</p>	<p>Bancs humides</p>	<p>Acétone + US IPA + US Rincage eau DI Séchage azote</p>	<p>5 min 5 min</p>	<p>2 bains d'acétone</p>	 <p>p+ n+</p>

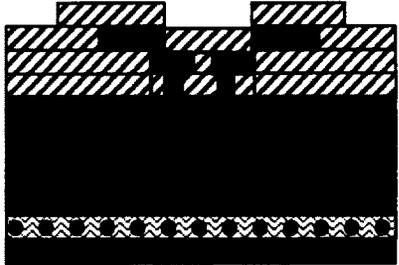
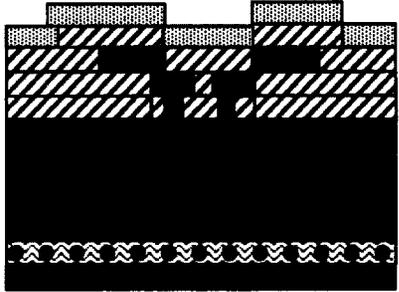
8. Métallisation

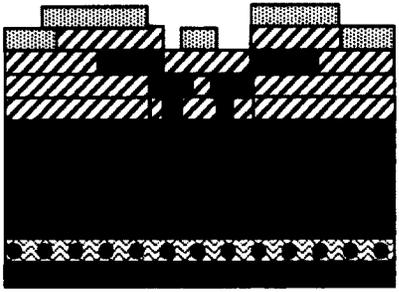
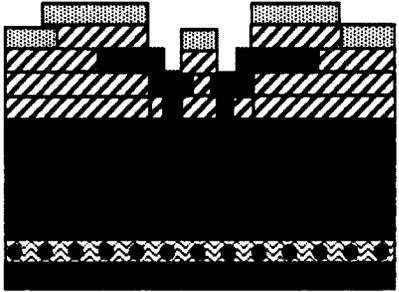
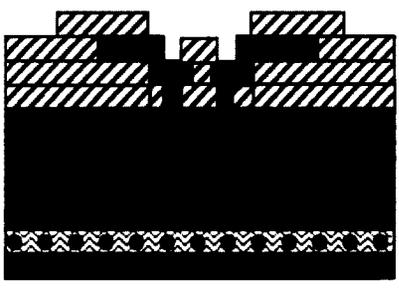
Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Nettoyage chimique	Bancs humides	H ₂ O ₂ :H ₂ SO ₄ (1:1) Rinçage Cascade eau DI HF:H ₂ O / 1:50 Rinçage Cascade eau DI Semitool, rinçage/séchage	15 min 2/3 min 15 s 2/3 min 2/3 min	Contenant de verre dans l'évier Contenant de plastique	
2. Dépôt Aluminium sur la face avant	Évaporateur Edwards			0,25 µm	 p+ n+
3. Déshydratation	Étuve	125°C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
4. HMDS	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s		
5. Étalement de résine S1813 face avant	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 µm Masque pour gravure Alu au H ₃ PO ₄	 p+ n+
6. Cuisson douce	Étuve	115 °C	1 min		
7. Exposition	Aligneuse : OAI	20 mW/cm ² Alignement : Oui Mode de contact : Dur	12 s	Masque 3 : Métallisation	

		Force : 15 mA			
8. Développement	Développeuse	MF319			 p+ n+
9. Cuisson forte	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
10. Gravure chimique de l'aluminium	Bancs humides	H ₃ PO ₄ : IPA CH ₃ CO ₂ HCH ₃ (3:1) Rinçage Cascade eau DI Séchage azote	~1 min + 10 sec. 2/2 min	4 nm/s, 55 °C sur plaque chauffante avec agitation On verse l'acide dans l'IPA Inspection	 p+ n+
11. Décapage de résine	Bancs humides	1 ^{er} bain : Acétone + US 2 ^e bain : Acétone + US 3 ^e bain : IPA + US Rinçage Cascade eau DI Séchage azote Semitool, rinçage/séchage	2 min 2min 3 min 2/3 min		 p+ n+
12. Étalement de résine S1813 face avant	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 µm Protection pour l'évaporateur	 p+ n+

13. Cuisson forte	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
14. Gravure de l'oxyde natif	Bancs humides	HF:H ₂ O / 1:50 Rinçage Cascade eau DI Séchage azote	15 s 2/2 min	Ou jusqu'à hydrophobie À faire juste avant l'étape suivante	
15. Dépôt Aluminium sur la face arrière	Évaporateur Edwards			0,25 µm	
16. Décapage de résine	Bancs humides	1 ^{er} bain : Acétone + US 2 ^e bain : Acétone + US 3 ^e bain : IPA + US Rinçage Cascade eau DI Séchage azote Semitool, rinçage/séchage	2 min 2min 3 min 2/3 min		
17. Recuit d'alliage Al-Si	Four trempé	450 °C 80% N ₂ , 20% H ₂	30 min		

9. Passivation finale

Type	Équipement	Détail	Durée	Note	Illustration
1. Dépôt Nitrure PECVD	STS	Procédé plasma à fréquence mixte		0,1 μm	
2. Déshydratation	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
3. HMDS	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s		
4. Étalement de résine S1813	Étaleuse Laurell	Prog #14 (500/5000rpm)	3 s 30 s	1,2 μm Masque pour gravure de SiO_2	
5. Cuisson douce	Étuve	115 °C	1 min		
6. Exposition	Aligneuse : OAI	20 mW/cm^2 Alignement : Oui Mode de contact : Dur Force : 15 mA	12 s	Masque 4 : Ouverture de la passivation	

7. Développement	Développeuse	MF319	30 s		 <p>A cross-sectional diagram of a semiconductor device after the development step. It shows a substrate with an n+ layer at the bottom and a p+ layer above it. A photoresist layer is present on top, with some areas removed to reveal the underlying p+ layer. The p+ layer is shown with diagonal hatching, and the n+ layer is shown with a wavy pattern.</p>
8. Cuisson forte	Étuve	125 °C	15 min	Refroidissement air ambiant 5 min	
9. Gravure AOE du nitride	AOE				 <p>A cross-sectional diagram of a semiconductor device after the AOE nitride etching step. The photoresist layer has been removed, and the nitride layer has been etched away in the exposed areas, revealing the p+ layer. The p+ layer is shown with diagonal hatching, and the n+ layer is shown with a wavy pattern.</p>
10. Décapage de résine	Bancs humides	Acétone + US IPA + US Rincage eau DI Séchage azote	5 min 5 min	2 bains d'acétone	 <p>A cross-sectional diagram of a semiconductor device after the resin stripping step. The photoresist layer has been completely removed, leaving a clean surface on the p+ layer. The p+ layer is shown with diagonal hatching, and the n+ layer is shown with a wavy pattern.</p>

ANNEXE D - PHOTOMASQUE 2^E ITÉRATION

Première série : structures adaptées à l'intégration aux microcanaux

Les changements réalisés sur cette série de structures sont les suivants :

- La largeur et les contacts des diodes ont été adaptés au nouveau masque de microcanaux créé pour les diodes Perkin Elmer. Ce masque apparaît à la Figure D.1.
- Des matrices de diodes adaptées à un microcanal ont été ajoutées, avec anneau sur chaque diode ou anneau commun autour de toutes les diodes.
- Des structures avec contacts électriques placés en dehors de l'anneau de garde ont été ajoutées.

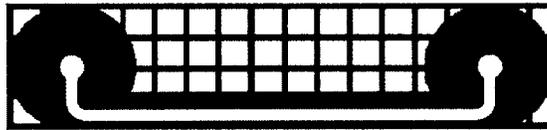


Figure D.1 : Masque de microcanal développé pour les diodes Perkin Elmer.

Les caractéristiques de base de cette série sont les suivantes :

- Forme de la région active : carrée ou rectangulaire avec coins arrondis.
- Largeur de l'anneau de garde : 300µm.
- Espacement de l'anneau de garde : 100µm (sauf pour les formes irrégulières).

Les différents paramètres géométriques évalués sont détaillés au Tableau D.1 et illustrés à la Figure D.2.

Tableau D.1 : Structures adaptées à l'intégration aux microcanaux.

#	Description	Passivation de la région active	Passivation de l'anneau de garde
1.a	<p>Géométrie : Région active parfaitement adaptée au microcanal. Contact éloigné de la région active. Anneau de garde entourant le contact.</p> <p>Particularité : Possibilité d'augmentation du courant de fuite dû à l'éloignement de l'anneau de garde de la région active lorsqu'il contourne le</p>	<ul style="list-style-type: none"> • SiO₂ • Aluminium 	<ul style="list-style-type: none"> • SiO₂ • Aluminium

	contact. Géométrie optimisée pour efficacité de détection.		
1.b	<p>Géométrie : Région active plus large que le microcanal. Contact placé au centre et en retrait de la région active. Anneau de garde entourant le contact.</p> <p>Particularité : Possibilité d'augmentation du courant de fuite dû à la forme irrégulière de l'anneau. Géométrie non-optimisée pour les microcanaux (zone active non-utilisée).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • SiO₂ • Aluminium 	<ul style="list-style-type: none"> • SiO₂ • Aluminium
1.c	<p>Géométrie : Région active plus large que le microcanal. Contact intégré à la région active. Anneau de garde de forme régulière entourant la région active à distance égale sur tout le périmètre.</p> <p>Particularité : Théoriquement, la forme permettant la plus grande efficacité de l'anneau de garde. Géométrie non-optimisée pour les microcanaux (zone active non-utilisée).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • SiO₂ • Aluminium 	<ul style="list-style-type: none"> • SiO₂ • Aluminium
1.d	<p>Géométrie : Matrice de diodes. Région active plus large que le microcanal et espace non-utilisé entre chaque diode (940µm). Anneau de garde pour chaque diode. Éloignement constant entre chaque diode. Contact intégré à la région active. Anneau de garde de forme régulière entourant la région active à distance égale sur tout le périmètre.</p> <p>Particularité : Théoriquement la forme permettant la plus grande efficacité de l'anneau de garde pour chaque diode. Géométrie non-optimisée pour les microcanaux (beaucoup de perte d'espace entre chaque diode et zone active non-utilisée).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • SiO₂ • Aluminium 	<ul style="list-style-type: none"> • SiO₂ • Aluminium
1.e	<p>Géométrie : Matrice de diodes. Région active plus large que le microcanal et espace non-utilisé entre chaque diode (140µm). Un seul anneau de garde</p>	<ul style="list-style-type: none"> • SiO₂ • Aluminium 	<ul style="list-style-type: none"> • SiO₂ • Aluminium

	<p>entourant la matrice. Éloignement constant entre chaque diode. Contact intégré à la région active. Anneau de garde de forme régulière.</p> <p>Particularité : Géométrie non-optimisée pour les microcanaux (perte d'espace entre chaque diode et région active plus large).</p>		
1.f	<p>Géométrie : Matrice de diodes. Région active plus large que le microcanal et espace non-utilisé entre chaque diode (140µm). Un seul anneau de garde entourant la matrice. Éloignement constant entre chaque diode. Contact placé au centre et en retrait de la région active. Anneau de garde de forme régulière.</p> <p>Particularité : Géométrie non-optimisée pour les microcanaux (perte d'espace entre chaque diode et région active plus large). Possibilité d'augmentation du courant de fuite dû à l'éloignement de l'anneau de garde de la région active lorsqu'il contourne le contact.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • SiO₂ • Aluminium 	<ul style="list-style-type: none"> • SiO₂ • Aluminium
1.g	<p>Géométrie : Matrice de diodes. Région active plus large que le microcanal et espace non-utilisé entre chaque diode (940µm). Anneau de garde pour chaque diode. Éloignement constant entre chaque diode. Contact placé au centre et en retrait de la région active. Anneau de garde de forme irrégulière.</p> <p>Particularité : Géométrie non-optimisée pour les microcanaux (beaucoup de perte d'espace entre chaque diode et région active plus large). Possibilité d'augmentation du courant de fuite dû à la forme irrégulière de l'anneau de garde.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • SiO₂ • Aluminium 	<ul style="list-style-type: none"> • SiO₂ • Aluminium
1.h	<p>Géométrie : Matrice de diodes. Région active optimisée en largeur pour le microcanal, mais</p>	Aluminium	SiO ₂

	<p>espace non-utilisé entre chaque diode (940µm). Anneau de garde pour chaque diode. Éloignement constant entre chaque diode. Contact éloigné de la région active et relié par une ligne de métal passant au-dessus de l'anneau de garde (isolé par 100nm d'oxyde de silicium). Anneau de garde de forme régulière.</p> <p>Particularité : Géométrie semi-optimisée pour les microcanaux (beaucoup de perte d'espace entre chaque diode, mais région active entièrement utile). Possibilité d'augmentation du courant de fuite dû à la capacité parasite entre le contact et la région active et l'anneau de garde.</p>		
1.i	<p>Géométrie : Région active parfaitement adaptée au microcanal. Anneau de garde de forme régulière entourant la région active à distance égale sur tout le périmètre. Contact éloigné de la région active et relié par une ligne de métal passant au-dessus de l'anneau de garde (isolé par 100nm d'oxyde de silicium).</p> <p>Particularité : Géométrie optimisée pour efficacité de détection. Théoriquement la forme permettant la plus grande efficacité de l'anneau de garde. Possibilité d'augmentation du courant de fuite dû à la capacité parasite entre le contact et la région active et l'anneau de garde.</p>	Aluminium	SiO ₂
1.j	<p>Géométrie : Matrice de diodes. Région active optimisée en largeur pour le microcanal, mais espace non-utilisé entre chaque diode (140µm). Éloignement constant entre chaque diode. Un seul anneau de garde entourant la matrice, de forme régulière entourant la région active à distance égale sur tout le périmètre. Contact éloigné de la région</p>	Aluminium	SiO ₂

	<p>active et relié par une ligne de métal passant au-dessus de l'anneau de garde (isolé par 100nm d'oxyde de silicium).</p> <p>Particularité : Géométrie semi-optimisée pour les microcanaux (perte d'espace entre chaque diode, mais région active entièrement utile). Possibilité d'augmentation du courant de fuite dû à la capacité parasite entre le contact et la région active et l'anneau de garde.</p>		
--	--	--	--

Légende

- Zone active P+
- Contacts
- Aluminium

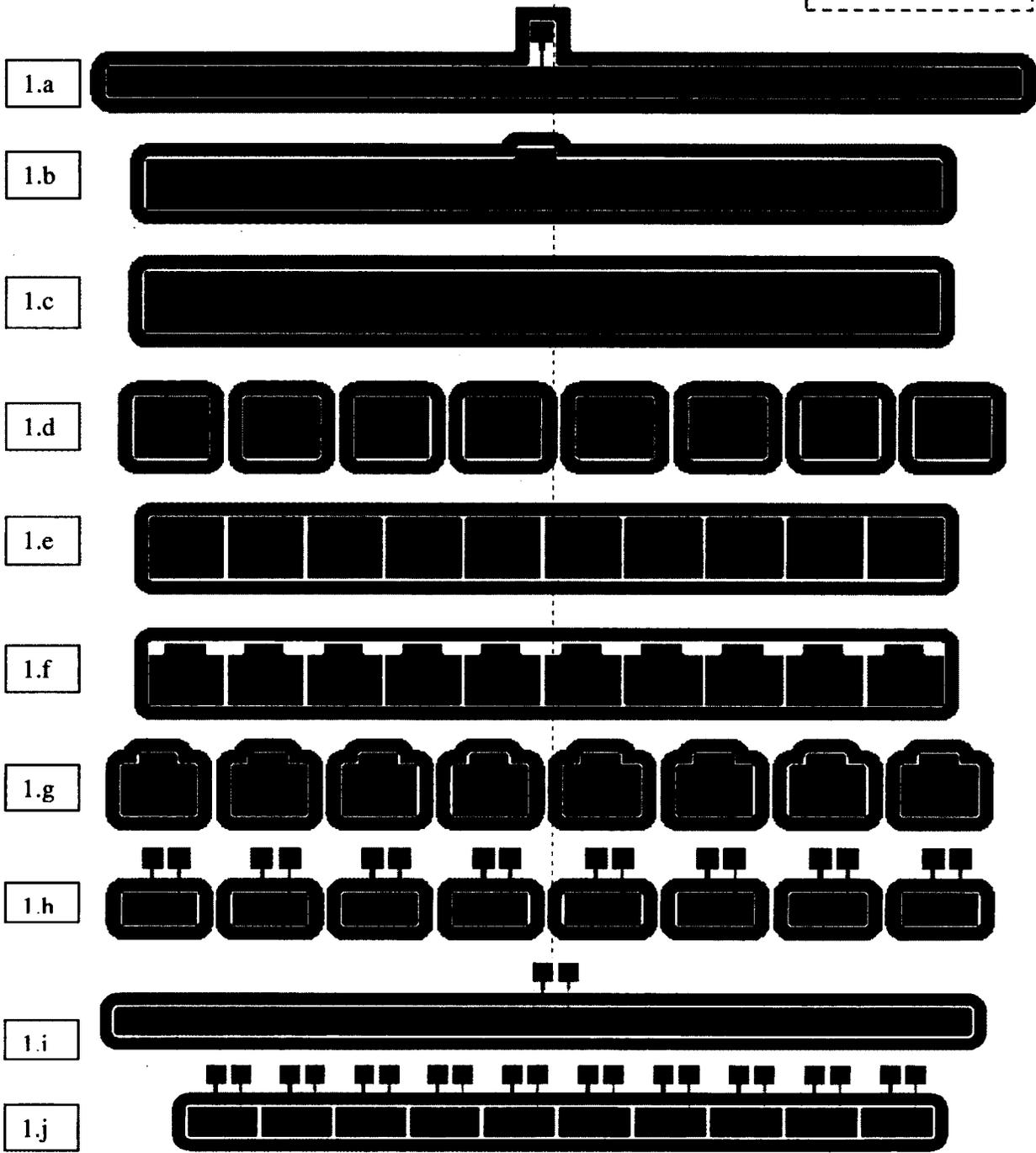


Figure D.2 : Structures adaptées à l'intégration aux microcanaux.

Deuxième série : structures pour largeur et espacement d'anneau de garde

Les changements réalisés sur cette série de structures sont les suivants :

- Les anciennes structures comportaient un anneau de largeur entre 25 et 100 μm et éloigné de la région active d'une distance d'entre 75 et 200 μm . Selon les recommandations faites à la section **D.2.4 Comparaison des divers procédés et structures**, des anneaux plus larges et plus proches de la région active sont potentiellement bénéfiques. Ainsi, les variations ont été modifiées pour des variations entre 100 et 300 μm au niveau de la largeur de l'anneau et entre 25 et 100 μm au niveau de l'espacement.

Les caractéristiques de base de cette série sont les suivantes :

- Forme de la région active : carrée avec coins arrondis.
- Contact : intégré à la région active.
- Forme de l'anneau de garde : régulière entourant la région active à distance égale sur tout le périmètre.
- Largeur de l'anneau de garde : 300-250-200-150-100 μm (respectivement, 2.x1 à x5).
- Espacement de l'anneau de garde : 100-75-50-25 μm (respectivement, 2.ax à dx)
- Passivation de la région active: SiO₂.
- Passivation de l'anneau de garde : Aluminium.

Les différents paramètres géométriques évalués sont illustrés à la Figure D.3.

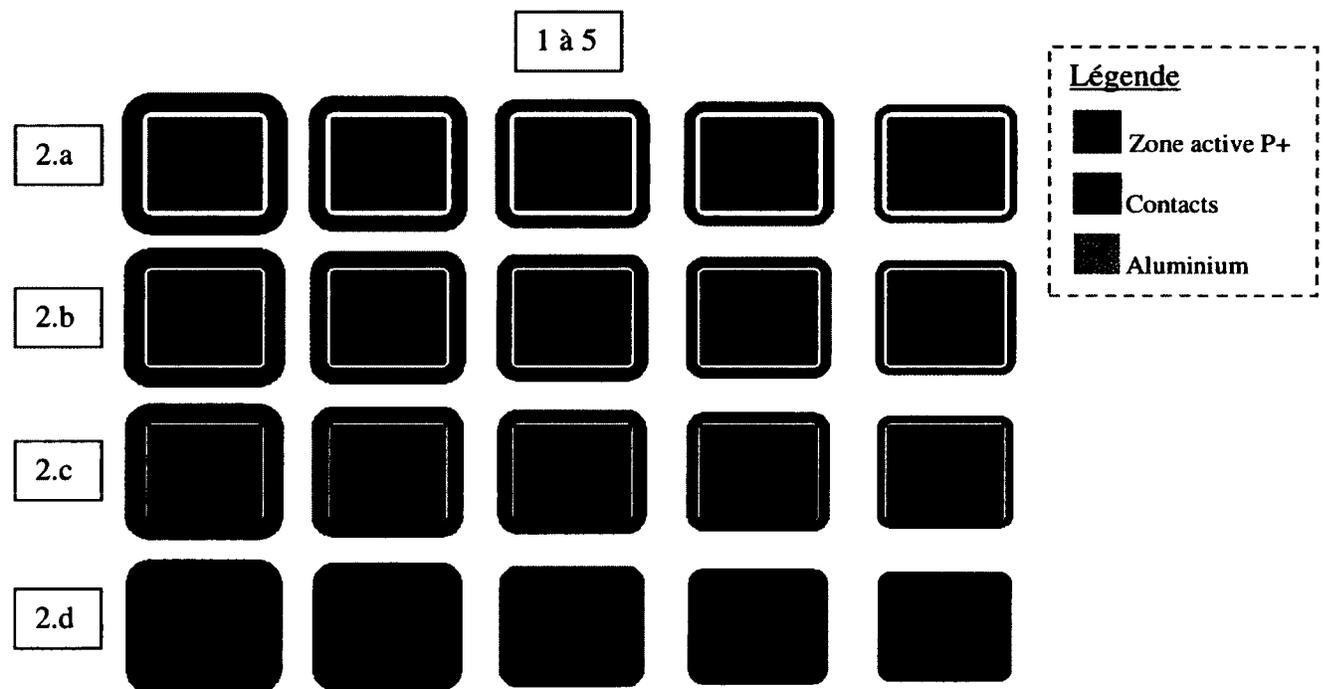


Figure D.3 : Structures pour largeur et espacement d'anneau de garde.

Troisième série : structures pour la passivation

Les changements réalisés sur cette série de structures sont les suivants :

- Les anciennes structures destinées à évaluer l'influence de la passivation ne réalisait la comparaison qu'au niveau de la région active. Tous les anneaux de garde étaient recouverts d'aluminium. Dans cette nouvelle série, une passivation au SiO₂ est également testée sur l'anneau de garde.

Les caractéristiques de base de cette série sont les suivantes :

- Largeur de l'anneau de garde : 50µm
- Espacement entre la région active et l'anneau de garde : 75µm

Les différents paramètres géométriques évalués sont détaillés au Tableau D.2 et illustrés à la Figure D.4.

Tableau D.2 : Structures pour la passivation.

#	Description	Passivation de la région active	Passivation de l'anneau de garde
3.a	Géométrie : Contact placé au centre et en retrait. Anneau de garde de forme régulière.	SiO ₂ + Aluminium	Aluminium
3.b	Géométrie : Contact placé au centre et en retrait. Anneau de garde de forme régulière. Contact à l'anneau de garde placé au centre et en retrait.	SiO ₂ + Aluminium	SiO ₂
3.c	Géométrie : Contact placé au centre et en retrait. Anneau de garde de forme régulière.	SiO ₂	Aluminium
3.d	Géométrie : Contact placé au centre et en retrait. Anneau de garde de forme régulière. Contact à l'anneau de garde placé au centre et en retrait.	SiO ₂	SiO ₂
3.e	Géométrie : Région active entièrement recouverte d'aluminium. Anneau de garde de forme régulière.	Aluminium	Aluminium
3.f	Géométrie : Région active entièrement recouverte d'aluminium. Anneau de garde de forme régulière. Contact ajouté à l'anneau de garde placé au centre et en retrait.	Aluminium	SiO ₂

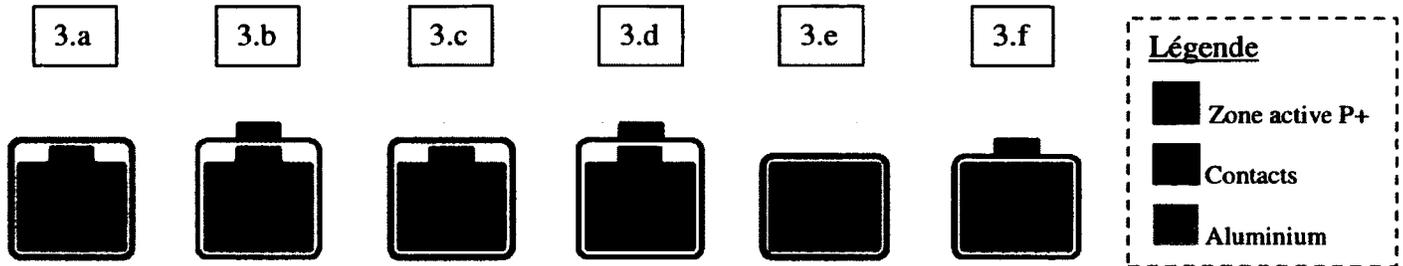


Figure D.4 : Structures pour passivation.

Quatrième série : autres structures de test

Les changements réalisés sur cette série de structures sont les suivants :

- Une passivation supplémentaire à l'aluminium sur les structures rondes utilisées lors du premier procédé de fabrication au CRN² a été ajoutée aux photomasques à des fins de comparaison.

Les différents paramètres géométriques évalués sont détaillés au Tableau D.3 et illustrés à la Figure D.5.

Tableau D.3 : Autres structures de test.

#	Description	Passivation de la région active	Passivation de l'anneau de garde
5.a	Géométrie : Ronde (0,79 mm ²). Anneau de garde entourant la région active (Largeur : 200 µm et espacement : 75 µm). Contact intégré à la région active et en retrait de l'anneau.	Aluminium	Aluminium
5.b	Géométrie : Ronde (3,1 mm ²). Anneau de garde entourant la région active (Largeur : 200 µm et espacement : 75 µm). Contact intégré à la région active et en retrait de l'anneau.	Aluminium	Aluminium
5.c	Géométrie : Ronde (3,1 mm ²). Anneau de garde entourant la région active (Largeur : 200 µm et espacement : 75 µm). Contact intégré à la région active et en retrait de l'anneau.	SiO ₂	Aluminium

5.d	Géométrie : Ronde ($0,79 \text{ mm}^2$). Anneau de garde entourant la région active (Largeur : $200 \text{ }\mu\text{m}$ et espacement : $75 \text{ }\mu\text{m}$). Contact intégré à la région active et en retrait de l'anneau.	SiO ₂	Aluminium
5.e	Géométrie : Zone P+ rectangulaire pour la mesure de la résistance de couche.	-	-
5.f	Géométrie : Structures de test pour les limites de la photolithographie.	-	-
5.g	Géométrie : Diodes à grille contrôlée (<i>Gate-Controlled Diode</i>) pour la proportion de courant de fuite en surface.	-	-

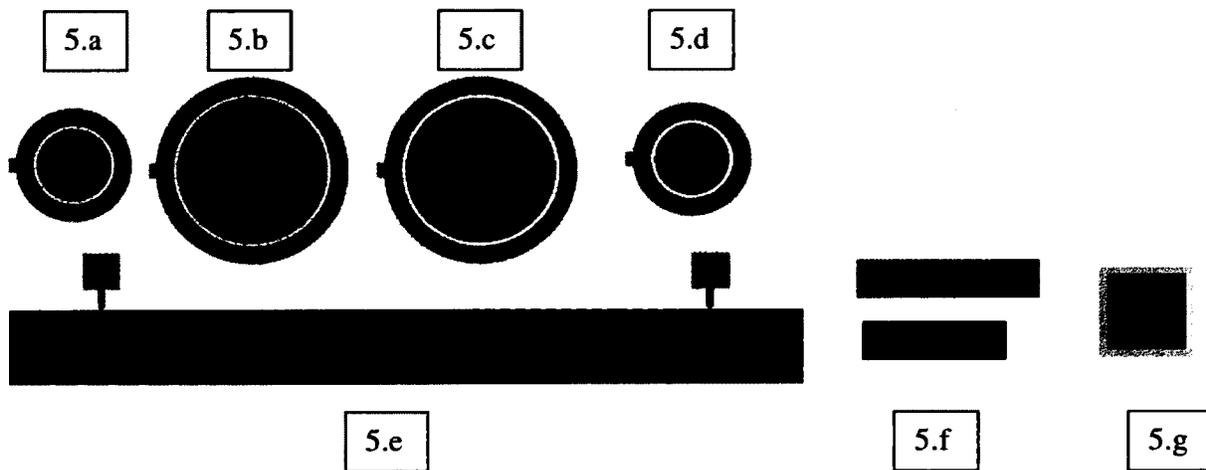


Figure D.5 : Autres structures de test.

Nouveaux photomasques

Les photomasques ont été divisés en quatre sections de manière à pouvoir couper la gaufre en quatre et effectuer une comparaison au niveau des quarts de gaufre. Pour se faire, plusieurs structures sont répétées sur les quatre sections. Les structures destinées à être intégrées à un microcanal ont été placées au centre de la gaufre pour permettre la fabrication des microcanaux. Étant donné le nombre trop importants de structures, elles n'ont pu être répétées quatre fois et se

retrouvent en exemplaire unique sur un des quarts de gaufre (sauf les structures 1.h, 1.i et 1.j qui sont répétées une fois).

À noter : un masque a été ajouté afin d'ouvrir uniquement les contacts lors de la deuxième passivation au nitrure.

Les structures utilisées sont détaillées au Tableau D.4 et les photomasques correspondants sont représentés à la Figure D.6.

Tableau D.4 : Séries de structures présentes sur les photomasques.

#	Description	Identique à la première série de photomasque
1	Structures pour largeur et espacement d'anneau de garde	
2	Structures pour la passivation	
3	Structures rondes	
4	Zone P+ rectangulaire	x
5	Structures de test de photolithographie	x
6	Diodes à grille contrôlée	x
7	Structures adaptées à l'intégration aux microcanaux passivées au SiO ₂ .	
8	Structures adaptées à l'intégration aux microcanaux passivées à l'aluminium.	
9	Structures adaptées à l'intégration aux microcanaux passivées à l'aluminium avec contact éloigné en dehors de l'anneau.	

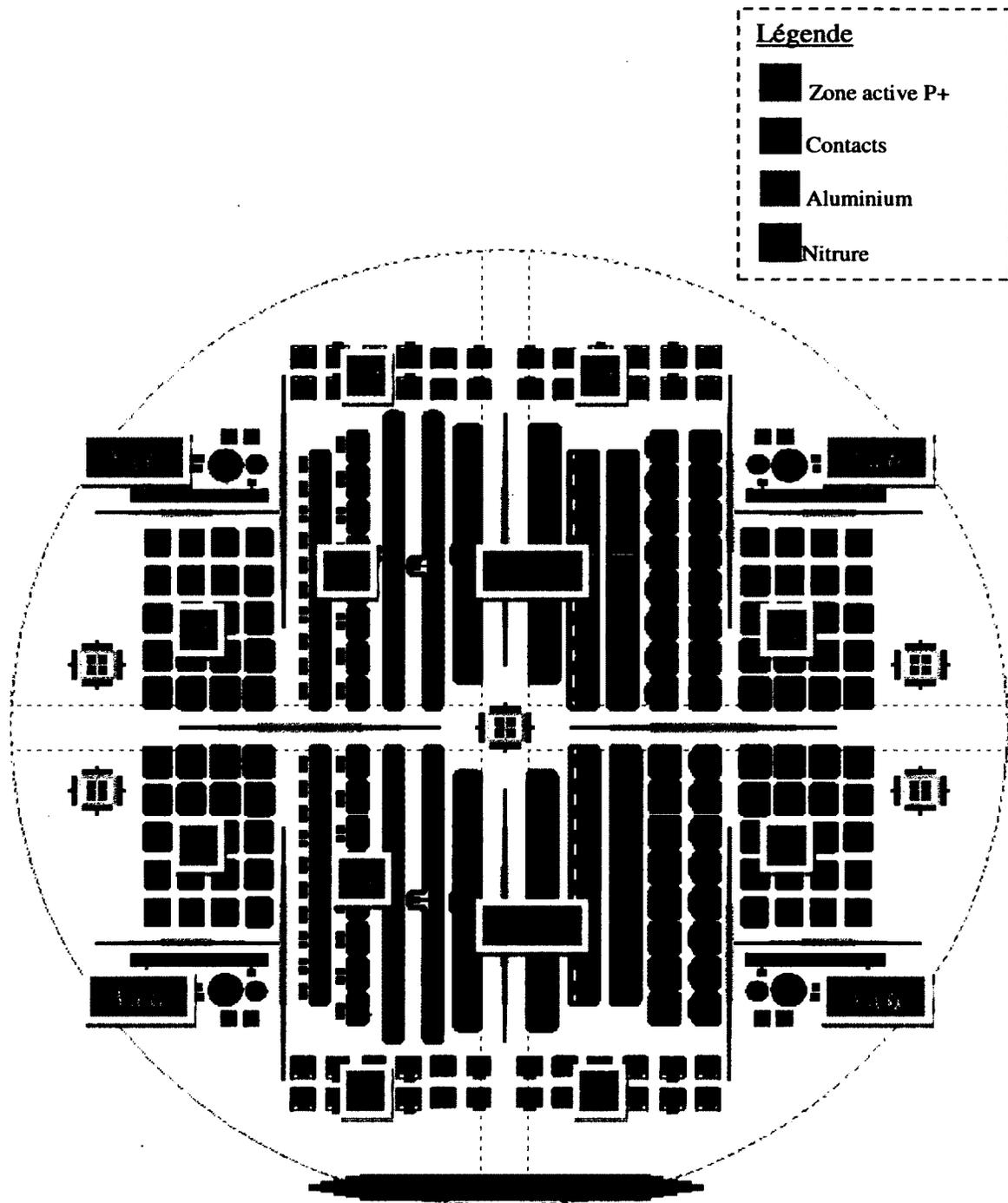


Figure D.6 : Photomasques pour la deuxième itération.

ANNEXE E - PROCÉDÉ DE FABRICATION DES CANAUX MICROFLUIDIQUES

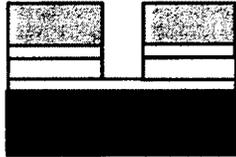
1. Fabrication des microcanaux sur substrat de silicium

Étape	Note	Illustration
1. Dépôt d'une couche de KMPR1005 par rotation	4 μm (6000 rpm)	
2. Recuit (plaque chauffante)	100°C, 10 min	
3. Exposition avec filtre <i>I-Line</i>		
4. Recuit (étuve)	180°C, 1h	
5. Dépôt d'une couche de KMPR1025 par rotation	25 μm (3000 rpm) EBR (<i>Edge Bead Removal</i> , suppression des effets de bord)	
6. Recuit (étuve)	100°C, 20 min	
7. Exposition avec filtre <i>I-Line</i>		
8. Recuit (étuve)	100°C, 5 min	
9. Développement		
10. Photolithographie		

2. Prétraitement des lamelles de verre

Étape	Note	Illustration
1. Déposition d'une couche de KMPR1025 sur la face avant et sur la face arrière	25µm	
2. Photolithographie		
3. Gravure humide des trous et décapage de la résine		
4. Déposition d'une couche de KMPR1005	4 µm (6000 rpm)	
5. Recuit (plaque chauffante)	100°C, 30s	

3. Collage de la lamelle de verre sur la gaufre de silicium

Étape	Note	Illustration
1. Alignement manuel des substrats		
2. Collage sous pression (étuve)	75°C, 8 hPa, 15 min	
3. Exposition avec filtre <i>I-Line</i>	30s	
4. Collage sous pression (étuve)	75°C, 8 hPa, 15 min	
5. Collage des nanoports (four)	170°C, 1h	

ANNEXE F - PROCÉDÉ D'ENCAPSULATION DE LA PUCE MICROFLUIDIQUE

1. Préparation et gravure du circuit imprimé sur plaquette de cuivre

Étape	Équipement	Note
1. Nettoyage de la plaquette de cuivre à l'acétone + IPA.	Banc humide	
2. Nettoyage des traces résistantes avec une laine d'acier.	Banc humide	
3. Nettoyage en salle blanche (acide nitrique 5% 15 secondes).	Banc humide (salle blanche)	
4. Dépôt d'or 200nm.	Évaporateur	Pour améliorer l'adhésion des microfils d'or sur la plaquette
5. Gravure des circuits sur la plaquette.	Département de génie électrique	

2. Collage de la puce microfluidique sur la plaquette de cuivre

Étape	Équipement	Note
1. Mesure IV-CV des diodes sous le canal avant soudure sur le circuit.	Station sous pointe	Noter le courant d'obscurité pour chacune des diodes.
2. Déshydratation de la puce microfluidique à 125°C (30min).	Étuve	
3. Collage de la puce microfluidique avec de l'époxy conductrice (ex. H20E).	Banc humide	Garder le mélange d'époxy pour les étapes subséquentes
4. Recuit pour l'époxy (comme indiqué sur le produit).	Étuve	
5. Isoler le bord de la gaufre à découvert avec de l'époxy isolante électriquement (ex. H70E).	Binoculaire	Garder le mélange d'époxy pour les étapes subséquentes
6. Recuit pour l'époxy (comme indiqué sur le produit).	Étuve	

3. Microsoudure

Étape	Équipement	Note
1. Optimiser les paramètres sur un échantillon test.	Microsoudeuse	Paramètres utilisés précédemment: <ul style="list-style-type: none"> • Fil 1.5 mil d'or (standard) • Boule 8 • Étape 1 : Force 5, Puissance 5, Temps 4 • Étape 2 : Force 9, Puissance 9, Temps 4
2. Souder un contact d'une diode sous le canal à un espace défini sur la plaquette de cuivre.	Microsoudeuse	Laisser une bonne longueur de fil pour qu'il ne touche pas le bord de la gaufre.
3. Relever le fil à l'aide d'une pince pour ne pas qu'il touche le bord de la gaufre.	Microsoudeuse	
4. Couvrir le contact du circuit imprimé avec de l'époxy conductrice pour solidifier le contact.		Utiliser le mélange d'époxy précédent.
5. Recuit pour l'époxy (comme indiqué sur le produit).	Étuve	
6. Mesurer le courant d'obscurité suite à la soudure et comparer avec la valeur initiale mesurée sur la station sous pointe.	Keithley 2400 avec boîte noire	Conserver la soudure si le courant est près de la valeur initiale, sinon couper ou arracher le fil.
7. Refaire les étapes 2-7 pour le reste des diodes.		
8. Couvrir les contacts sur la puce microfluidique d'époxy isolante pour solidifier mécaniquement les soudures.		

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Boër, K.W. (2002). *Survey of Semiconductor Physics*, 2^e édition. John Wiley and Sons, 1292 p.
- Cherry, S.R., Sorenson, J.A. et Phelps, M.E. (2003). *Physics in Nuclear Medicine*, 3^e édition, Saunders, Philadelphia, États-Unis, 525 p.
- Convert, L. (2006). *Compteur sanguin μ volumétrique pour l'imagerie moléculaire chez le petit animal*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 135 p.
- Convert, L. (2007). *Système microfluidique d'analyse sanguine en temps réel pour l'imagerie moléculaire chez le petit animal* (Définition de projet de recherche). Département de génie électrique et de génie informatique, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada, 41 p.
- Convert, L., Aimez, V., Charette, P. et Lecomte, R. (2008). Rapide prototyping of integrated microfluidic devices for combined radiation detection and plasma separation. Dans *Microsystems and Nanoelectronics Research Conference, 2008*. MNRC 2008, Ottawa, Canada, p. 105-108.
- Convert, L., Morin-Brassard, G., Cadorette, J., Rouleau, D., Croteau, E., Archambault, M., Fontaine, R. et Lecomte, R. (2007). A new tool for molecular imaging: the microvolumetric beta blood counter. *Journal of nuclear medicine*, volume 48, numéro 7), p.1197-1207.
- Drakos, N. (1997). Éléments théoriques sur le bruit dans les circuits électroniques. *Computer Based Learning Unit, University of Leeds*. http://perso.telecom-paristech.fr/~porte/oceane/doc/documents/elem_theoriques/bruit/bruit.html#SECTION00014000000000000000 [Page consultée le 4 août 2010].
- Franssila, S. (2004). *Introduction to microfabrication*, 1^{ère} édition. J. W. and Sons, 401 p.
- Hamamatsu Photonics K.K. (2011a). S2744/S3588-08,-09. Dans Solid State Division, *Hamamatsu Corporation*. http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/s2744-08_etc_kpin1049e06.pdf [Page consultée le 22 novembre 2011].
- Hamamatsu Photonics K.K. (2011b). Si Photodiodes. Dans Opto-semiconductor handbook, *Hamamatsu Corporation*. http://jp.hamamatsu.com/resources/products/ssd/pdf/handbook_en/chapter02_si%20photodiodes.pdf [Page consultée le 22 novembre 2011].
- Han, D., Wang, C., Wang, G., Du S. et Xie, F. (2002). Reduction of the leakage current of radiation detectors by a simple cap implantation. *Nuclear Instruments and Methods in*

- Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, volume 195, numéro 3, p. 339-343.
- Holland, S. (1989a). An IC-Compatible Detector. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, volume 36, numéro 1, p. 283-289.
- Holland, S. (1989b). Fabrication of detectors and transistors on high-resistivity silicon. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, volume 275, numéro 3, p. 537-541.
- Holland, S.E., Wang, N.W. et Moses, W.W. (1997). Development of low noise, back-side illuminated silicon photodiode arrays. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, volume 44, numéro 3, p. 443-447.
- Kang, J.S. and Schroder, D.K. (1989). Gettering in silicon. *Journal of Applied Physics*, volume 65, numéro 8, p. 2974-2985.
- Kemmer, J. (1984). Improvement of detector fabrication by the planar process. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, volume 226, numéro 1, p. 89-93.
- Kim, J.-Y., Seo, J.-H., Lim, H.-W., Ban, C.-H., Kim, K.-C., Park, J.-G., Jeon, S.-C., Kim, B.-H., Jin, S.-O., et Hu, Y. (2008). Effect of a Guard-Ring on the Leakage Current in a Si-PIN X-Ray. *IEICE Transactions*, volume 91-C, numéro 5, p. 703-707.
- Knoll, G.F. (1999). *Radiation Detection and Measurement*, 3^e édition. John Wiley and Sons, 816 p.
- Krizaj, D., Resnik, D., Vrtancnik, D., Uljancic, U., Amon, S. et Cindro, V. (1998). Design, processing and operation of a large area pin diode radiation detector. *Electrotechnical Conference, 1998*, volume 1. MELECON, Tel-Aviv , Israël, p. 321-325.
- Langner, J. (2003). *Development of a Parallel Computing Optimized Head Movement Correction Method in Positron Emission Tomography*. Mémoire de maîtrise, University of Applied Sciences Dresden and Research Center Dresden-Rossendorf, Dresden, Allemagne, 112 p. http://www.jens-langner.de/ftp/langner_mscthesis.pdf
- Levin, C.S. et Hoffman, E.J. (1999). Calculation of positron range and its effect on the fundamental limit of positron emission tomography system spatial resolution. *Physics in Medicine and Biology*, volume 44, numéro 3, p. 781-799.
- Madou, M.J. (2002). *Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization*, 2^e édition, CRC Press, 723 p.

- NIST (2011). *Stopping-Power and Range Tables for Electrons*.
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html> [Page consultée le 21 novembre 2011].
- Nam, H.G., Shin, M.S., Cha, K.H. and Cho, N.I. (2006). Fabrication of a silicon PIN diode for radiation detection. *Journal of the Korean Physical Society*, 48(6), pp.1514-1519.
- Ogushi, S., Sadamitsu, S., Marsden, K., Koike, Yasuo and Sano, M. (1997). Gettering characteristics of heavy metal impurities in silicon wafers with polysilicon back seal and internal gettering. *Journal of Applied Physics*, volume 16, numéro 11, p.6601-6606.
- Palviainen, T., Tuuva, T. and Leinonen, K. (2007) Minimizing guard ring dead space in silicon detectors with an n-type guard ring at the edge of the detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, volume 573, numéro 1-2, p. 277-279.
- Pochet, T. (2005). Détecteurs nucléaire: Principes physiques de fonctionnement. *Techniques de l'Ingénieur. Génie nucléaire*, Référence BN3480, 13 p.
- Pramanik, D. et Saxena, A.N. (1983). VLSI Metallization using Al and its alloys. *Solid State Technology*, volume 26, numéro 3, p. 131-138.
- Spieler, H. (2005). *Semiconductor Detector Systems*, 1^{ère} édition. Oxford University Press, 489 p.
- Streetman, B.G. (2005). *Solid State Electronic Devices*, 6^e édition. Prentice Hall, 581 p.
- Sze, S.M. et NG, K.K., 2006. *Physics of Semiconductor Device*, 3^e édition. John Wiley and Sons, 832 p.
- EG&G VACTEC (1997). *Optoelectronics Data Book: Silicon Photodiodes*, 1^{ère} édition. EG&G VACTEC, p.87.
- Wikipedia contributors (2011). *Wikipedia, The Free Encyclopedia: P-n junction*.
http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=P-n_junction&oldid=459731710 [Page consultée le 21 novembre 2011].
- Zhou, C. et Warbuton W.K. (1996). Comparison of silicon pin diode detector fabrication processes using ion implantation and thermal doping. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, volume 378, numéro 3, p. 529-530.