



HAL
open science

Modélisation et réalisation de terminaisons de jonctions haute tension compatibles avec la technologie planar : les anneaux polarisés et la spirale de SIPOS

Corinne Mingues

► **To cite this version:**

Corinne Mingues. Modélisation et réalisation de terminaisons de jonctions haute tension compatibles avec la technologie planar : les anneaux polarisés et la spirale de SIPOS. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1997. Français. NNT : . tel-00139694

HAL Id: tel-00139694

<https://theses.hal.science/tel-00139694>

Submitted on 3 Apr 2007

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

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

N° d'ordre : 2877 - Année 1997

THESE

*présentée au Laboratoire d'Analyse et
d'Architecture des Systèmes du C.N.R.S.
en vue de l'obtention du grade de DOCTEUR de
l'Université Paul Sabatier de Toulouse*

Spécialité : Electronique : Microélectronique

par **Corinne MINGUES**

Maître ès-Sciences

MODELISATION ET REALISATION DE TERMINAISONS DE JONCTIONS HAUTE TENSION COMPATIBLES AVEC LA TECHNOLOGIE PLANAR : LES ANNEAUX POLARISES ET LA SPIRALE DE SIPOS

soutenue le 15 Décembre 1997 devant le jury composé de :

MM.	J. GRAFFEUIL	<i>Président</i>
	G. CHARITAT	<i>Directeur de Thèse</i>
	M. LE HELLEY	<i>Rapporteur</i>
	J. BUXO	<i>Rapporteur</i>
	D. JAUME	<i>Examineur</i>
	A. RUSU	<i>Examineur</i>

Rapport LAAS N° : 97510

Thèse préparée au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS
7, Avenue du Colonel Roche
31 077 TOULOUSE Cedex 4, France

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein du groupe "Composants et Intégration de Puissance" (C.I.P) du Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) du Centre National de la Recherche Scientifique (C.N.R.S.).

Nous remercions Monsieur A. COSTES, Directeur du L.A.A.S et Monsieur J.C. LAPRIE qui lui a succédé, pour nous avoir accueillis au sein de son laboratoire.

Nous tenons à remercier Monsieur G. CHARITAT, Chargé de Recherche au C.N.R.S., pour la confiance qu'il nous a témoigné en acceptant la direction scientifique de nos travaux. Nous lui sommes reconnaissants de nous avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa grande compétence et de son dynamisme.

Nous sommes très honorés de la présence à notre jury de thèse et nous tenons à remercier :

Monsieur J. GRAFFEUIL, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider notre jury de thèse,

Monsieur J. BUXO, Ingénieur à Motorola Semiconducteurs Phoenix (USA) pour sa participation à notre jury de thèse en qualité de rapporteur de notre travail,

Monsieur M. LE HELLEY, Professeur à l'école Centrale de Lyon, qui nous a fait l'honneur d'examiner notre travail en tant que rapporteur,

Monsieur A. RUSU, Professeur à l'école Polytechnique de Bucarest (Roumanie), pour sa présence à notre jury de thèse et pour ses nombreuses suggestions,

Monsieur D. JAUME, Ingénieur à MOTOROLA Semiconducteurs Toulouse, pour l'intérêt qu'il a porté à nos travaux et pour sa présence à notre jury de thèse.

L'élaboration de ces travaux n'aurait pas été possible sans l'aide précieuse de plusieurs personnes que je tiens à remercier tout particulièrement :

Monsieur G. SARRABAYROUSE, Directeur de Recherche au LAAS, pour sa contribution active lors de l'irradiation des composants ainsi que M. COULIBALY pour son amitié et pour sa disponibilité lors de mes mesures.

Monsieur R. FONTANIERES de MOTOROLA pour le premier dépôt de SIPOS et Monsieur M. BAIRANZADE pour les mesures en dynamique.

Messieurs E. SCHEID et P. TEMPLE-BOYER, Chargés de Recherche au LAAS, pour leur aide lors du dépôt de SIPOS.

Messieurs N. NOLHIER (Maître de Conférence à l'UPS), E. STEFANOV, H. TRANDUC pour leur grande disponibilité lors des simulations et des problèmes informatiques.

Mes plus sincères remerciements vont également à tout le personnel de la Centrale de Technologie Mesdames M. BENOIT, V. CONEDERA, M. DILHAN, Messieurs N. FABRE, P. FADEL, H. GRANIER, B. ROUSSET, T. DO CONTO, J.C. MARROT, G. LACOSTE, C. SOLANO, pour leurs compétences techniques, leur disponibilité et la bonne humeur dont ils ont toujours fait preuve, ainsi qu'à Monsieur J. BAUDET pour la réalisation informatique des masques.

Nous remercions particulièrement F. ROSSEL pour sa disponibilité, ses compétences et sa bonne humeur, qui nous a permis de nous initier rapidement au travail en salle blanche.

A titre plus personnel, je remercie toutes les personnes que j'ai eu le plaisir de côtoyer durant ces trois années de thèse en particulier mes collègues de bureau où il a régné une excellente ambiance : O. BERRAÏES, L. CORNIBERT, C. DELAGE, S. ROUX.

Je remercie également H. BELLAJ, K. BELLIL, R. BERRIANE, T. BORDIGNON, M. BREIL, N. CEZAC, O. CAUSSE, D. DRAGOMIRESCU, P. DUPUY, C. FURIO, O. GUILLEMET (C'est une fille ou un garçon?), P. KOUAKOU, M. MARMOUGET, F. MORANCHO, Y. PATEL, P. VALES, D. ZERROUK, M. ZITOUNI ainsi que les autres membres du groupe CIP et ainsi que : B. VAN HARREN, S. DESGREZ, M. GAYRAL, T. CEOLIN, D. PRIETO, L. LE GRATIET, C. BRICOUT, M. DUROS, C. VERGNENEGRE...

Merci enfin à nos secrétaires dévouées, D. DAURAT et B. DUCROCQ et à tout le personnel technique et service édition-documentation : A. BERGEZ, M. POWELL, J.CATALA, A. EVRARD, D. DAURAT, et C. BERTY pour la réalisation matérielle de ce mémoire, sans oublier le personnel du magasin : C. MARROT, A. POUIL et P. PICHON.

Merci (et pardon) à tous ceux que j'ai sûrement oubliés dans cette petite liste.

Une pensée affectueuse est destinée à ma famille et à mes amis, et plus particulièrement à mon ami, Patrick, pour son soutien permanent, sa gaieté et tout son amour.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES SYMBOLES	1
INTRODUCTION GENERALE	3
CHAPITRE 1 : LES TECHNIQUES DE GARDE DES COMPOSANTS PLANAR HAUTE TENSION.....	9
INTRODUCTION.....	11
1-LES ANNEAUX FLOTTANTS	13
1-1 : Principe des anneaux flottants	13
1-2 : Paramètres influençant la tenue en tension	16
1-2-a : Distance Optimale	16
1-2-b : Nombre d'anneaux	17
1-2-c : Charges d'interface	18
1-3 : Avantages et inconvénients de cette technique.....	18
2-LES JONCTIONS IMPLANTEES.....	19
2-1 : Principe de la jonction implantée	19
2-2 : Paramètres influençant la tenue en tension	20
2-2-a : La dose implantée	20
2-2-b : La largeur de la zone implantée.....	20
2-2-c : Les charges d'interface	21
2-3 : Avantages et inconvénients de cette technique	22
3-LES PLAQUES DE CHAMPS.....	23
3-1 : Principe de l'électrode de champ	23
3-2 : Paramètres influençant la tenue en tension	24
3-3 : Avantages et inconvénients de cette structure	27
4-LES COUCHES SEMI-RESISTIVES	28
4-1 : Principe des couches semi-résistives.....	28
4-2 : Paramètres influençant la tenue en tension	29
4-3 : Avantages et inconvénients de la structure	30

5-LA TECHNIQUE DU RESURF.....	33
5-1 : Principe de la méthode.....	33
5-2 : Paramètres influençant la tenue en tension	34
5-3 : Avantages et inconvénients du RESURF.....	34
6-LES ANNEAUX POLARISES	35
6-1 : Principe des anneaux polarisés	35
6-2 : Calcul de la résistance de la spirale.....	36
6-3 : Avantages de cette technique.....	38
CONCLUSION.....	39
CHAPITRE 2 : ETUDE NUMERIQUE BIDIMENSIONNELLE DE LA TENUE EN TENSION DE LA TECHNIQUE DES ANNEAUX POLARISES	43
INTRODUCTION.....	45
1-PRESENTATION DU LOGICIEL MIXEDMODE.....	46
2-ETUDE QUALITATIVE DE LA STRUCTURE A ANNEAUX POLARISES.....	47
2-1 : Fonctionnement de la structure	47
2-2 : Effet perçage.....	47
3-ETUDE NUMERIQUE	50
3-1 : Influence de la distance constante entre les anneaux	50
3-2 : Etude de l'influence de l'épaisseur de l'épithaxie	52
3-3 : Etude du passage en direct des anneaux	54
3-4 : Etude d'un modèle analytique de la mise en direct	58
3-5 : Influence de la distance variable entre les anneaux.....	61
3-6 : Etude de l'influence des charges d'interface	62
3-7 : Etude dynamique	66
3-7-1 : Etude d'une jonction cylindrique en dV/dt.....	66
3-7-2 : Etude d'une structure à anneaux polarisés	67
3-7-3 : Variation de la tension de claquage en fonction du dV/dt.....	69
CONCLUSION.....	73

CHAPITRE 3 : REALISATION TECHNOLOGIQUE DES COMPOSANTS TESTS	75
INTRODUCTION.....	77
1-CONCEPTION DES MASQUES ET DESCRIPTION DU PROCESSUS TECHNOLOGIQUE.....	78
2-DISPOSITIFS A ECARTEMENT CONSTANT ET DIFFUSIONS COMMUNE ANODE/ANNEAUX	84
2-1 : Tenue en tension.....	84
2-2 : Mesure de la résistance de la spirale.....	87
2-3 : Etude du passage en direct	87
3-DISPOSITIFS A ECARTEMENT CONSTANT ET DIFFUSIONS ANODE/ANNEAUX SEPARÉES	89
3-1 : Tenue en tension.....	92
3-2 : Etude du courant de fuite	93
3-3 : Etude de l'influence des charges d'interface	94
3-4 : Etude en dynamique.....	96
4-DISPOSITIFS A ECARTEMENT VARIABLE ET DIFFUSIONS ANODE/ANNEAUX SEPARÉES	100
4-1 : Tenue en tension.....	101
4-1-1 : Dispositifs en non limitation de charge d'espace	102
4-1-2 : Dispositifs en limitation de charge d'espace	105
4-2 : Résistance de spirale	107
CONCLUSION.....	108
CHAPITRE 4 : LA SPIRALE DE SIPOS	111
INTRODUCTION.....	113
1-PRESENTATION DE LA STRUCTURE.....	114
2-RESULTATS DE MODELISATION.....	116

3-REALISATIONS TECHNOLOGIQUES.....	117
3-1 : Description du processus technologique.....	117
3-2 : Tenue en tension.....	119
3-3 : Courant de fuite.....	122
3-4 : Etude de l'influence des charges d'interface	123
3-5 : Influence des charges d'interface : comparaison avec d'autres techniques.....	125
3-6 : Etude dynamique	127
 CONCLUSION.....	 130
 CONCLUSION GENERALE.....	 131
 ANNEXE 1 : LE LOGICIEL POWER2D	 139
1 : Introduction.....	139
2 : Méthode numérique et calcul de la tension de claquage	139
3 : Exemple de fichier d'entrée.....	141
4 : Résultats de simulation.....	143
 BIBLIOGRAPHIE.....	 147
Introduction	149
Chapitre 1 : Les techniques de garde	149
Chapitre 2 : Etude numérique bidimensionnelle de la tenue en tension de la technique des anneaux polarisés.....	153
Chapitre 3 : Réalisation technologique des composants tests.....	154
Chapitre 4 : La spirale de SIPOS	154
Annexe 1 : Le logiciel POWER2D.....	155

Liste des symboles

BV	Tension de claquage d'un dispositif (" <i>Breakdown Voltage</i> ") (V)
BV _c	Tension de claquage d'une jonction cylindrique
BV _p	Tension de claquage théorique de la jonction plane
C _{epi}	Concentration de l'épitaxie (cm ⁻³)
d	Distance entre deux anneaux de garde périphériques
d _{opt}	Distance optimale entre deux anneaux de garde périphériques
e _{ox}	Epaisseur de la couche d'oxyde en surface
F	Longueur de plaque de champ au-delà de la jonction (en microns)
ΔL	Distance entre la haute tension et la basse tension
$\frac{dV}{dt}$	Signal dynamique en tension provoqué dans le substrat (V/μs) par la commutation du transistor de puissance
E _{max}	Champ électrique maximal d'une jonction (V/cm)
E _x	Composante longitudinale du champ électrique
E _y	Composante transversale du champ électrique
E _{crit}	Champ électrique critique dans le semiconducteur
N	Dopage de type donneur (cm ⁻³)
N _{eff}	Dopage effectif en surface du modèle analytique de BRIEGER
P	Dopage de type accepteur
q	Charge électrique élémentaire (1.6 10 ⁻¹⁹ C)
V _a	Tension appliquée sur le substrat d'une jonction
V _i	Tension appliquée sur l'anneau de garde n° i
W	Extension de charge d'espace (cm)
W _{epi}	Epaisseur de l'épitaxie totale
W _n	Epaisseur de l'épitaxie sous la jonction
X _j	Profondeur de jonction
ε ₀	Permittivité absolue du vide (8.85 10 ⁻¹⁴ F/cm)
ε _{Si}	Permittivité relative du silicium (11.9)
i	Indice de l'anneau ou de la plaque
n	Nombre total d'anneaux
V _i	Tension appliquée sur l'anneau i
R _{sh}	Resistance par carré
L _{spirale}	Logueur totale de la spirale
μ	Mobilité
w	Largeur de diffusion de spirale

L_{cd}	Distance canal/drain
F	Longueur de la plaque de champ (en microns)
Q_{ss}	Charges contenues à la surface de l'oxyde
L	Largeur de la zone implantée
W_p	Extension de la jonction plane
a	Rayon d'anode
W'	Extension maximale de la charge d'espace
E_{mi}	Champ maximal sur l'anneau i

INTRODUCTION GENERALE

Le domaine des composants semiconducteurs de puissance connaît aujourd'hui une forte expansion. Ce qui distingue ces composants c'est leur fonction, qui est idéalement celle d'un interrupteur, ainsi que les ordres de grandeur de tension et de courant commutables. Ces composants sont en pleine évolution ; leurs caractéristiques deviennent de plus en plus performantes et leurs applications s'étendent de jour en jour : alimentations à découpage, allumage électronique, déflexion pour la télévision, éclairage des tubes fluorescents au néon etc.

Une caractéristique importante d'un composant de puissance est la tension blocable. Les niveaux de tension blocable généralement utilisés varient selon les applications : de quelques dizaines de volts (alimentation par batteries) à plusieurs kilovolts (réseaux de traction ferroviaire). Pour ces niveaux de tension, la jonction bloquante du semiconducteur doit comporter une région large et peu dopée, afin de permettre à la charge d'espace de se développer. Cette région correspond à la zone centrale des diodes. Quelques ordres de grandeur : une épaisseur de 10 μm et une concentration d'impuretés de 10^{15} cm^{-3} sont nécessaires pour quelques centaines de volts tandis qu'une épaisseur de 800 μm et une concentration de 10^{13} cm^{-3} sont nécessaires pour 8000 V.

La technologie PLANAR a permis la réalisation de composants de qualité et a permis une grande densité d'intégration. Mais cette technologie est limitée à cause de l'existence d'un fort champ électrique à la courbure de la jonction. Dans le but d'obtenir une tenue en tension proche de la tenue en tension plane, plusieurs techniques ont été développées telles que : biseau mécanique (figure 1.a), gravure chimique de la jonction (mesa) (figure 1.b), anneau de garde flottant (figure 1.c), électrode de champ (figure 1.d), terminaison de jonction implantée (figure 1.e), SIPOS (figure 1.f) et RESURF(figure 1.g).

Les tensions obtenues sont comprises entre 60% et 100% de la tension théorique idéale. Certaines de ces techniques de garde ne permettent pas une grande intégration de composants sur une même plaquette de silicium (biseau), ou sont sensibles à la qualité de la passivation à la surface du silicium (mesa).

Une technique de garde originale, basée sur le principe d'anneaux polarisés, a été étudiée pour la première fois au LAAS en 1992 par Macary [1] (figure 1.h). Un certain nombre d'avantages ont été mis en avant, faisant de cette solution un candidat potentiel très intéressant dans la panoplie des techniques de garde de jonction. Nous pouvons citer en particulier une réalisation technologique aisée, compatible Planar, une grande tolérance vis-à-vis des variations de paramètres physiques ou géométriques et une bonne efficacité. Ces travaux sont toutefois restés au stade théorique préliminaire.

L'ensemble des travaux présentés dans ce mémoire concerne la **modélisation et réalisation de terminaisons de jonctions compatibles avec la technologie Planar : les anneaux polarisés et la spirale de SIPOS.**

Dans un premier chapitre, nous rappellerons le principe de fonctionnement des principales techniques de garde PLANAR utilisées dans l'industrie des semiconducteurs :

- les anneaux de garde flottants,
- la jonction implantée,
- les plaques de champs,
- le SIPOS et les plaques de polysilicium résistives,
- la technique du RESURF,
- les anneaux polarisés.

Dans le deuxième chapitre, nous analyserons le comportement électrique de la technique des anneaux polarisés par une modélisation numérique à deux dimensions. Nous commencerons par une analyse qualitative du comportement des anneaux polarisés puis nous regarderons l'influence de plusieurs paramètres (distance anode-anneau et anneau-anneau, mise en court-circuit possible de deux régions d'anneau, influence des charges d'interface, comportement dynamique) afin d'établir à partir de ces résultats des règles de conception.

Le troisième chapitre est consacré à la réalisation des composants tests et plus particulièrement à l'étude de la tenue en tension de la structure à anneaux polarisés. Nous vérifierons le bien fondé de notre approche théorique en étudiant la tenue en tension de tels dispositifs. Les résultats expérimentaux seront présentés et discutés en fonction de certains paramètres technologiques. Le processus technologique permettant de réaliser ce type de dispositif sera optimisé.

Le quatrième et dernier chapitre est consacré à l'étude d'une autre technique de garde périphérique : la spirale de SIPOS. Une comparaison avec la technique des couches semi-résistives de SIPOS est exposée. Cette technique est étudiée numériquement et deux réalisations technologiques compléteront cette étude.

Nous concluons enfin en dressant le bilan de nos résultats théoriques et expérimentaux obtenus sur ces deux techniques de garde : les anneaux polarisés et la spirale de SIPOS et en donnant notre sentiment quant à leurs perspectives d'évolution.

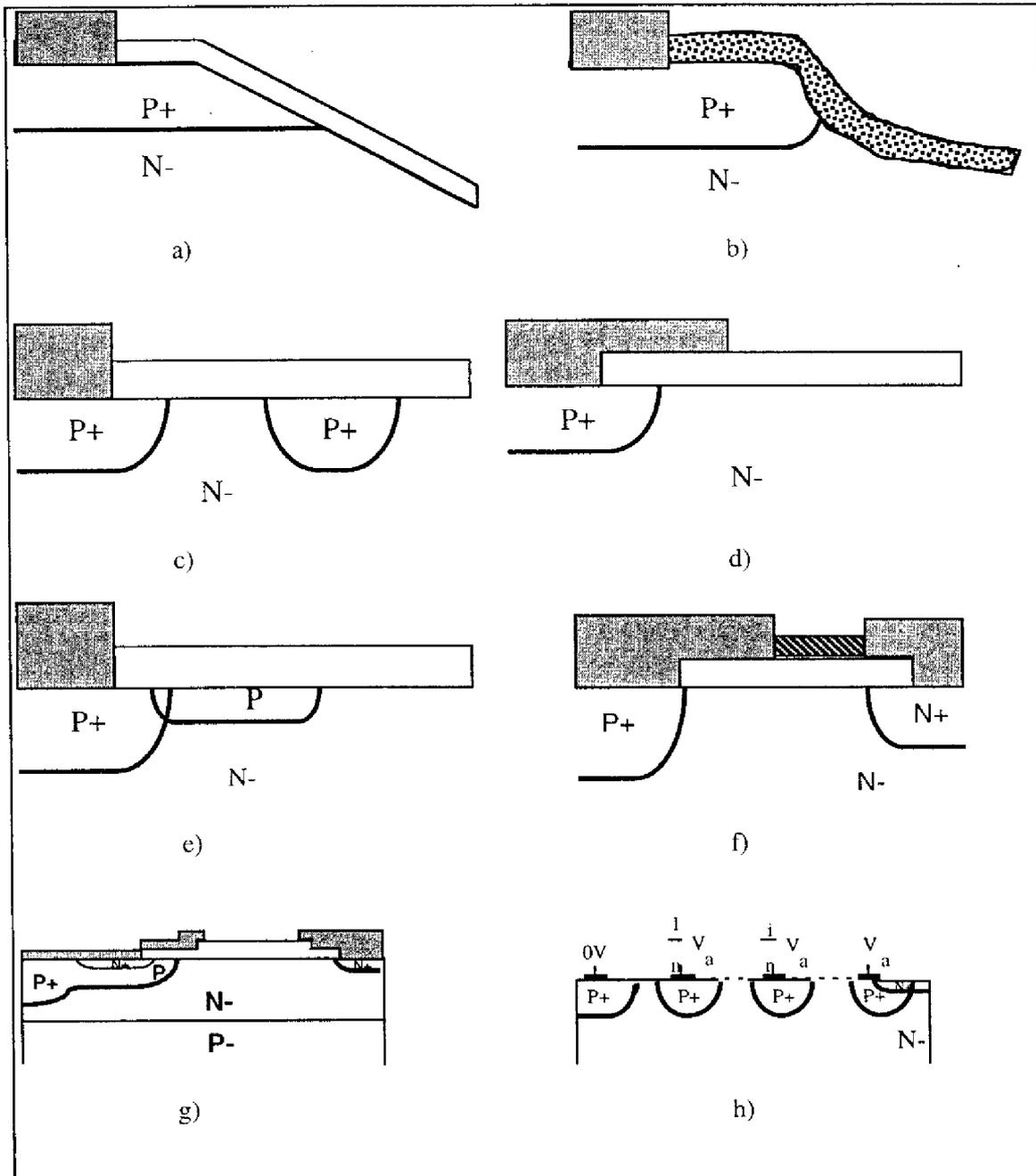


Figure 1 : Les différentes techniques de garde en haute tension.

- a) Biseau.
- b) Mesa.
- c) Anneau flottant.
- d) Electrode de champ.
- e) Jonction implantée.
- f) SIPOS.
- g) RESURF.
- h) Anneaux polarisés

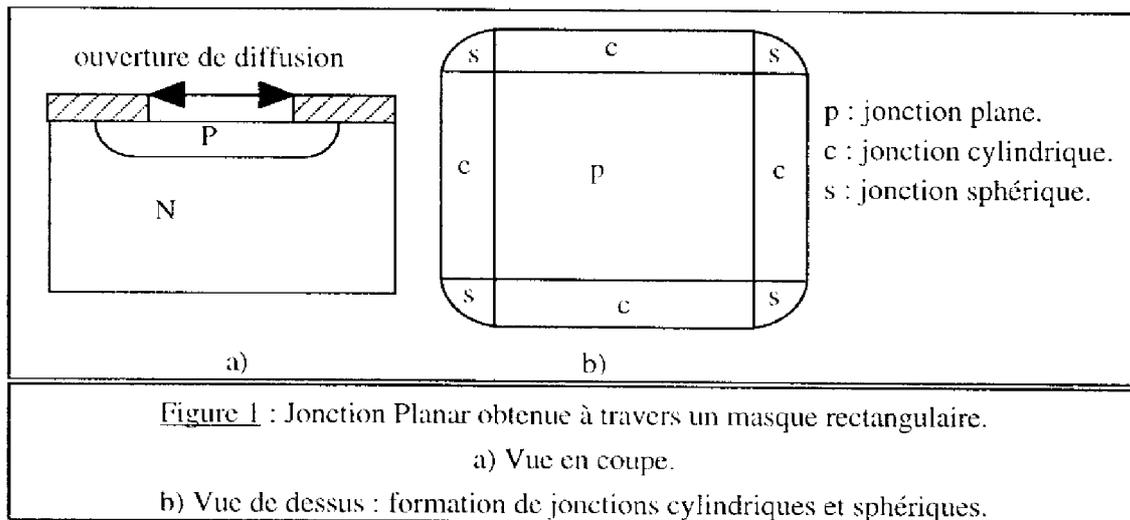


**CHAPITRE 1 : LES TECHNIQUES DE GARDE DES
COMPOSANTS PLANAR HAUTE TENSION**

INTRODUCTION

La réalisation de circuits intégrés en technologie Planar [1], [2], [3] fait apparaître trois types de géométrie de jonctions (Figure 1) :

- planes : correspond à l'ouverture de diffusion sur masque,
- cylindriques : le côté de cette ouverture,
- sphériques : le coin de cette ouverture.



Si dans le cas de circuits intégrés ces géométries de jonctions n'ont que peu de conséquences sur le fonctionnement électrique des composants, elles sont par contre prépondérantes dans les composants de puissance et les circuits intégrés haute tension. En effet, la tenue en tension des composants Planar haute tension est essentiellement limitée par les effets de courbure de la jonction P/N à la périphérie.

Lorsqu'une telle jonction est polarisée en inverse, la courbure de sa géométrie induit un champ électrique élevé responsable du claquage prématuré (par rapport à celui idéal de la jonction plane) de la jonction.

Pour améliorer la tenue en tension de ces jonctions, plusieurs solutions ont été proposées ; leur but est d'étaler la charge d'espace de la jonction principale pour répartir le potentiel sur la plus grande surface possible de silicium afin de diminuer le champ électrique ; on peut ainsi se rapprocher de la tenue en tension de la jonction plane [4].

Dans ce chapitre, nous allons décrire dans un premier temps les différentes techniques compatibles avec la technologie Planar ; nous regarderons en particulier le mode de fonctionnement ainsi que les caractéristiques principales des techniques suivantes :

- les anneaux de garde flottants,

- les jonctions implantées,
- les électrodes de champs,
- les couches semi-résistives et les plaques de polysilicium,
- la technique du RESURF,

qui sont les principales techniques Planar utilisées pour protéger un composant de puissance haute tension.

Nous présenterons également une technique de garde plus récente :

- les anneaux polarisés.

qui nous a paru particulièrement intéressante.

La comparaison de ces différentes techniques [4], [5] et le domaine d'application de chacune, feront l'objet de la discussion finale de ce chapitre.

1-LES ANNEAUX FLOTTANTS

1-1 : Principe des anneaux flottants

Cette technique a été proposée par Kao en 1967 [6], son principe est de réduire le champ électrique en surface en utilisant un ou plusieurs anneaux entourant la jonction principale (Figure 2).

Les anneaux sont réalisés en même temps que la diffusion de l'anode. L'anneau apparaît comme un diviseur de tension en surface.

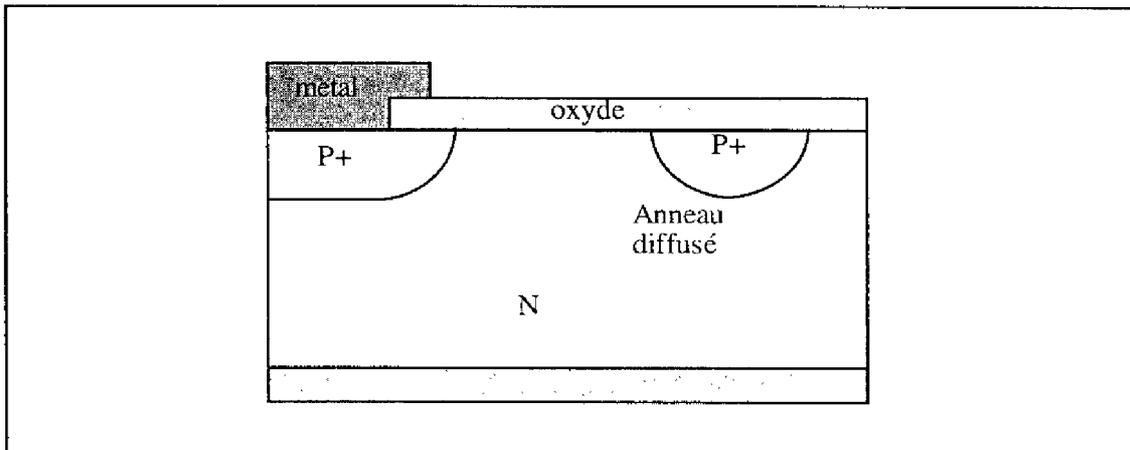
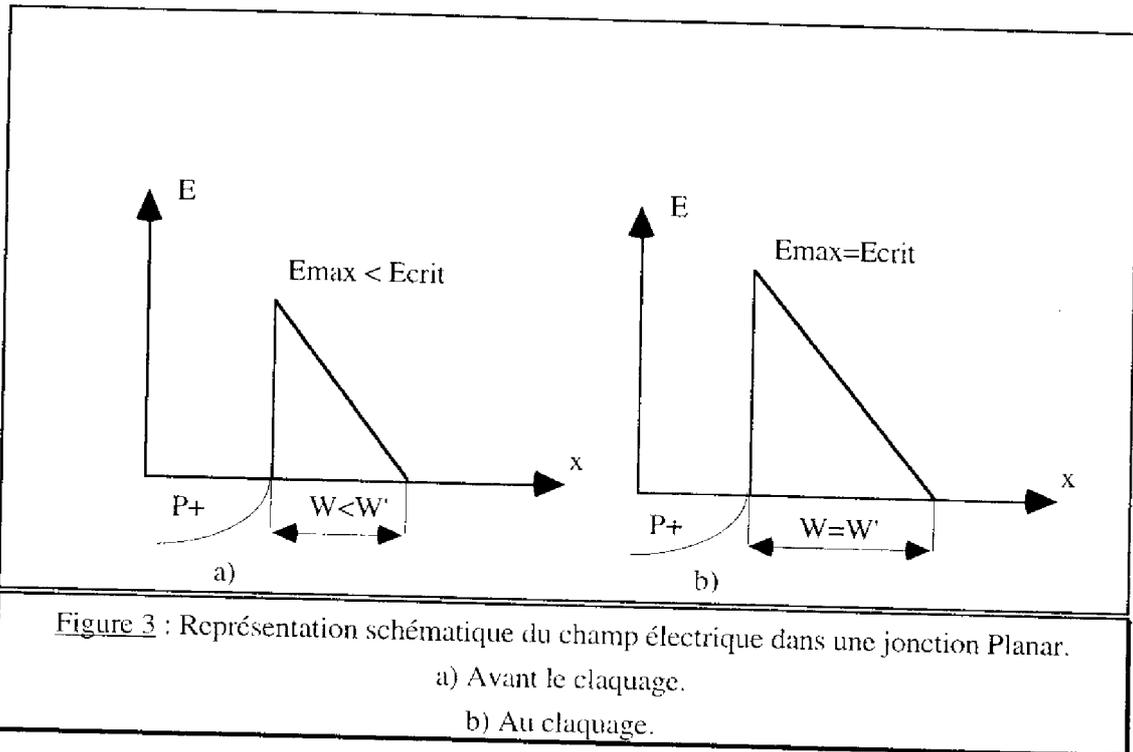


Figure 2 : Structure comportant 1 anneau flottant diffusé en même temps que la jonction principale.

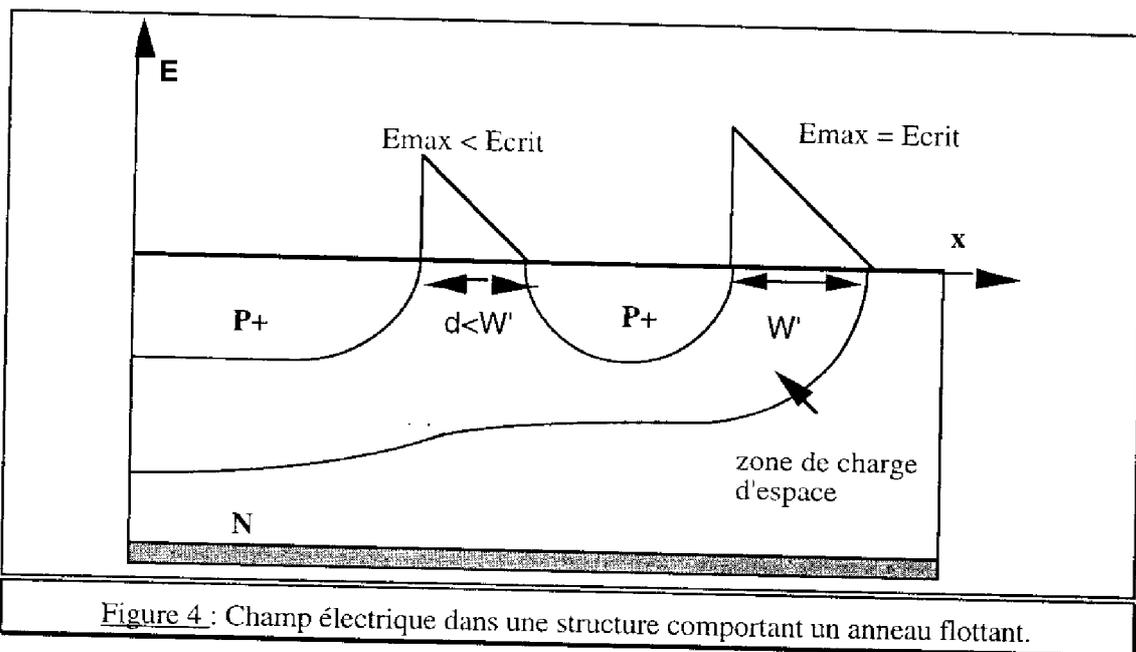
Kao [6] a montré que le champ électrique maximum se situait en surface au bord de la jonction polarisée en inverse. Lorsque la tension croît, la charge d'espace de la jonction P⁺/N s'étend en même temps que le champ maximal augmente. Le claquage a lieu lorsque le champ électrique atteint une valeur critique E_{crit} pour une extension latérale maximale de la charge d'espace notée W' .

On peut représenter le champ électrique par un triangle dont la plus grande partie se situe dans la région la moins dopée (Figure 3).



Lorsque la charge d'espace rencontre une zone de diffusion fortement dopée, un anneau, avant que le champ électrique ait atteint sa valeur critique, la distribution des équipotentielles est modifiée de sorte qu'elles contournent la zone d'anneau. De cette manière, on allonge la courbure des lignes équipotentielles, ce qui a pour effet de retarder le claquage.

Le potentiel de l'anneau est fixé par la distribution de potentiel de la jonction principale.



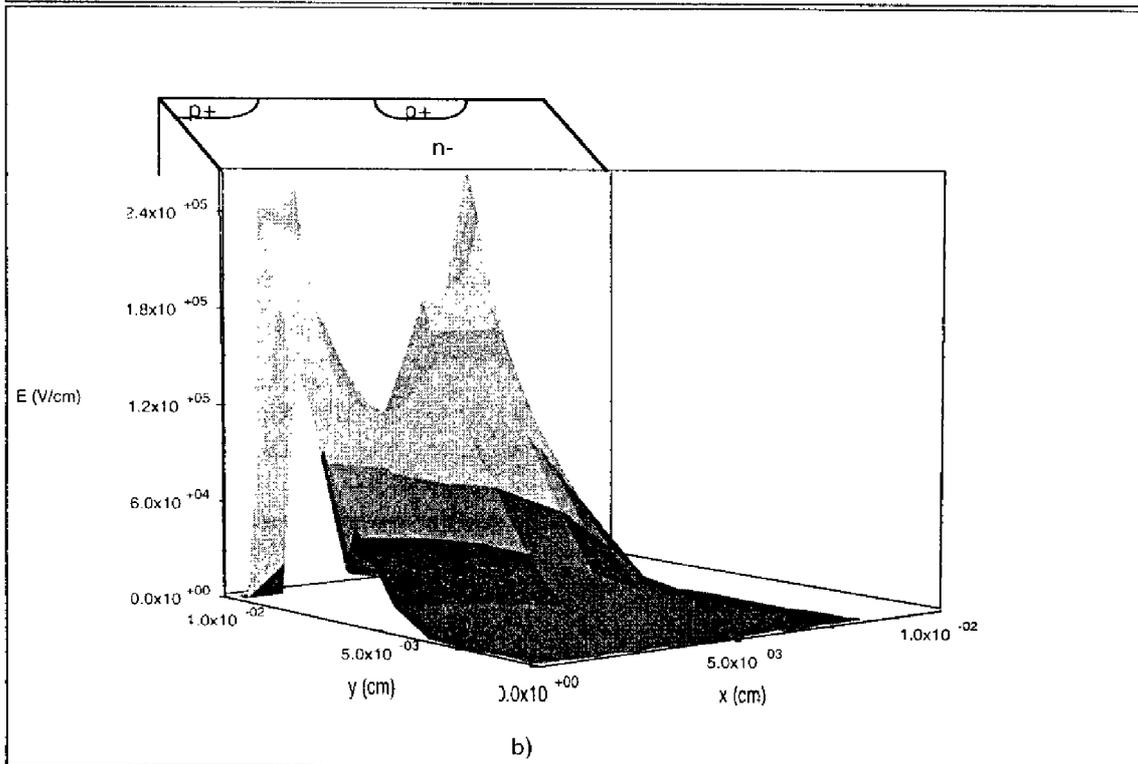
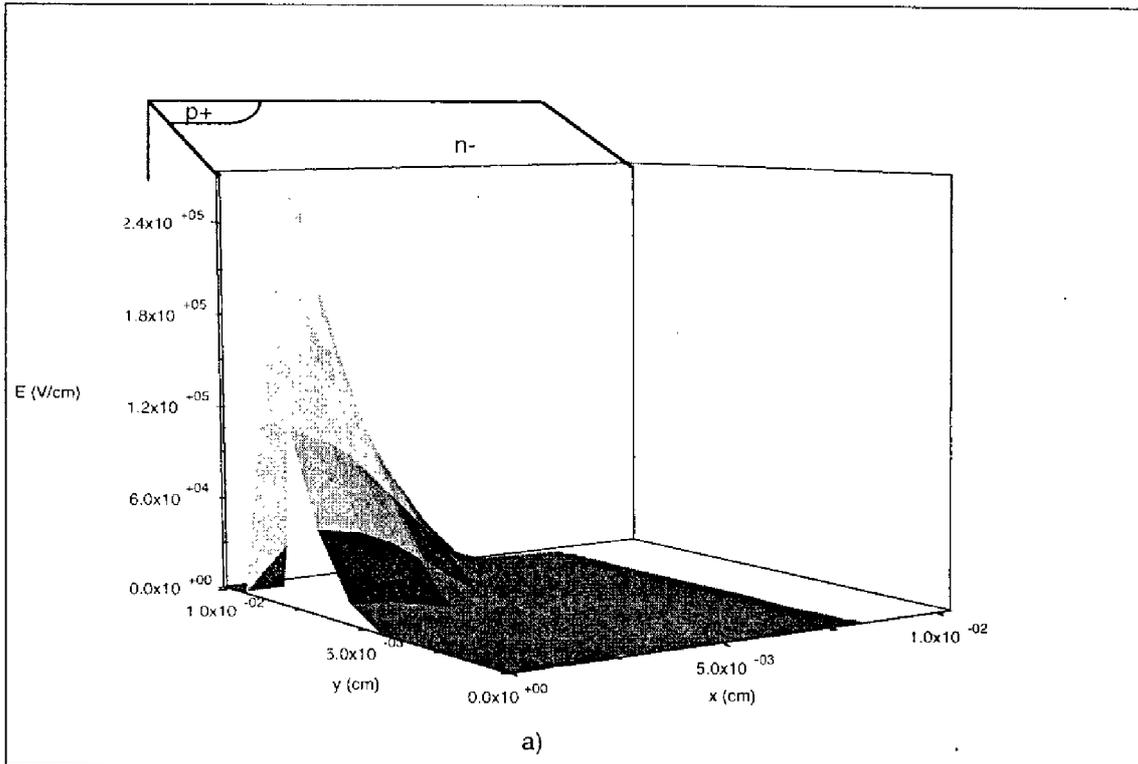


Figure 5 : Champ électrique dans :
a) une jonction cylindrique,
b) une structure avec un anneau flottant .

La figure 4 représente le champ électrique d'une structure avec un anneau. La tension de claquage de la structure est la tension pour laquelle la valeur du champ critique est atteinte au bord du dernier anneau si la structure est parfaitement optimisée.

A titre illustratif, la figure 5 représente le champ électrique dans une jonction cylindrique (a) et dans une structure avec un anneau flottant (b) au claquage. Ces simulations ont été réalisées par le logiciel Power2D, qui sera décrit plus loin, pour des jonctions P⁺ de 13 μm de profondeur sur un substrat n dopé à 2.10¹⁴ cm⁻³. La tenue en tension de la jonction cylindrique est de 388 V tandis que celle de la diode avec un anneau est de 548 V. Lors de la présence de l'anneau et pour une même tension, le champ électrique aux bornes de la jonction cylindrique est inférieur à la valeur qu'il aurait lorsque la jonction n'est pas protégée.

La présence de l'anneau diffusé permet donc de limiter le champ électrique en surface à une valeur inférieure au champ électrique critique, à condition que la distance entre la jonction et l'anneau soit correctement choisie.

1-2 : Paramètres influençant la tenue en tension

1-2-a : Distance Optimale

La distance entre les anneaux doit être parfaitement optimisée pour avoir un rendement maximum. En première approximation, on peut dire que l'anneau doit se situer à une distance inférieure à l'extension maximale de charge d'espace de la jonction cylindrique. Plusieurs auteurs [7], [8], [9], [10] ont analysé l'influence de certains paramètres sur la distance optimale jonction-anneau. Le tableau 1 regroupe les différentes valeurs de la distance optimale jonction-anneau obtenues par un calcul numérique [8], [10].

Dopage épitaxie C _{epi} (cm ⁻³)	Épaisseur épitaxie sous la jonction W _n (μm)	Profondeur de la jonction x _j (μm)	Distance optimale jonction-anneau d _{opt} (μm)
6 10 ¹³	120	50	69
6.3 10 ¹³	60	8	17
		13	21
		20	27
		25	32
6.7 10 ¹³	20	13	16
	40		19
	60		21
	80		22
	100		"
8.10 ¹³	120	50	64
10 ¹⁴	120	50	56
1.3 10 ¹⁴	120	50	47
1.6 10 ¹⁴	120	50	39

Tableau 1 : Quelques valeurs de distance jonction-anneau pour différents dopages de structure

Nous remarquons que :

- La distance optimale augmente avec le rayon de courbure x_j de la jonction.
- La distance optimale croît avec l'épaisseur de l'épitaxie W_n jusqu'à une valeur qui correspond au cas de non limitation de charge d'espace.
- La distance optimale diminue quand le dopage C_{epi} de l'épitaxie augmente.

1-2-b : Nombre d'anneaux

Pour une structure à plusieurs anneaux, si on prend des distances constantes entre tous les anneaux, Gharbi [11] a montré que cette structure n'est pas parfaitement optimisée (la chute de tension peut être de 20%) : il faut donc adopter un système à distances variables entre tous les anneaux. Le critère d'optimisation est le suivant [10] :

Les distances optimales sont celles pour lesquelles le claquage se produit simultanément à la jonction principale et sur tous les anneaux.

Plusieurs auteurs [7], [8], [12], [13] ont montré que :

- Les distances optimales entre les anneaux sont croissantes de l'anneau intérieur vers l'anneau extérieur (Tableau 2).
- La distance optimale entre deux derniers anneaux diminue lorsque le nombre d'anneaux croît.
- La tension de claquage augmente à chaque fois que l'on rajoute des anneaux. L'accroissement est rapide au début et sature lorsque le nombre d'anneaux est supérieur à deux.

nombre d'anneaux	d1(μm)	d2 (μm)	d3 (μm)	d4 (μm)	BV(V)
0					806
1	52				1092
2	43	49			1260
3	39	44	49		1380
4	33	35	39	48	1420

Tableau 2 : Influence du nombre d'anneaux sur un substrat n dopé à $7.81 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $W_{epi}=80 \mu\text{m}$ et $x_j=13 \mu\text{m}$ d'après [8].

Cette distance optimale pour les dispositifs haute tension est très importante : elle détermine aussi la taille de la puce.

1-2-c : Charges d'interface

Cette structure est très sensible aux charges d'interface. En effet, celles-ci modifient fortement l'extension de charge d'espace près de la surface d'autant plus que le substrat est très résistif [14]. Yilmaz [15] a montré que lorsque la densité de charges varie de $5 \cdot 10^{10}$ à $5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, la tension de claquage chute de 30%. Il propose d'utiliser des plaques de champ de dimensions optimales associées à chaque anneau. La plaque de champ va étaler le potentiel sur une plus grande surface, réduisant le potentiel supporté par l'anneau, et diminuant donc le champ électrique. Cette structure optimisée subit une perte de 2.5% lors de la présence de charges à l'interface.

1-3 : Avantages et inconvénients de cette technique

La technique des anneaux flottants permet de minimiser les effets de courbures de jonctions à la périphérie de la jonction Planar. Elle est simple à réaliser puisque l'on effectue les diffusions des anneaux en même temps que celle de la jonction principale. De plus, elle n'introduit pas d'étape technologique supplémentaire : elle est donc peu coûteuse.

L'inconvénient de cette méthode est la difficulté de l'optimisation (le nombre d'anneaux et les distances entre les anneaux sont critiques). Gharbi [11] a proposé un modèle pour déterminer le nombre d'anneaux et leur distance, mais il a montré que sa structure n'était pas parfaitement optimisée (à 30% près). Brieger [12] a lui aussi proposé une méthode qui détermine le nombre et la position des anneaux, toutefois il s'est limité au cas d'une structure en non limitation de charge d'espace, ce qui n'est pas le cas des dispositifs de puissance. En fait, seule la simulation 2D peut déterminer précisément les distances optimales ainsi que le nombre d'anneaux. Cependant, même avec des outils de simulations performants et bien adaptés au problème, tel que Power2D, la définition des règles de conception d'une terminaison de jonction par anneaux flottants est longue en temps de calcul. La précision sur les distances entre anneaux et les profondeurs de jonctions doit être de l'ordre du micron.

D'autre part, cette technique consomme une surface de silicium importante influençant sensiblement le coût du composant (une structure n dopée à $7.81 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ comportant quatre anneaux occupe une surface de $260 \mu\text{m}$ pour une tenue en tension de 1400 V). Enfin, nous avons vu que cette structure est sensible aux charges d'interface silicium-oxyde.

Cette technique est utilisée pour des moyennes tensions (jusqu'à 1000 V) et permet d'atteindre généralement une efficacité de 80% (rapport de la tenue en tension obtenue par rapport à la tenue en tension d'une jonction plané idéale). Au-delà, il faut beaucoup trop d'anneaux. Par exemple, Clark [16] a réalisé une structure comportant 30 anneaux répartis sur une largeur d'environ $650 \mu\text{m}$ pour tenir une tension de 3000 V.

2-LES JONCTIONS IMPLANTEES

2-1 : Principe de la jonction implantée

Cette technique appelée "Junction Termination Extension" (JTE) a été proposée en 1977 par Temple [17]. Elle consiste à faire une implantation P⁺ faiblement dopée en surface autour de la jonction principale (Figure 6a).

Cette implantation peut être suivie d'une diffusion à haute température pour que la zone P soit très peu dopée et très profonde (notée Π) ; on parle alors de structure de type P⁺-Π-N-N⁺ [18], [19], [20] (Figure 6b).

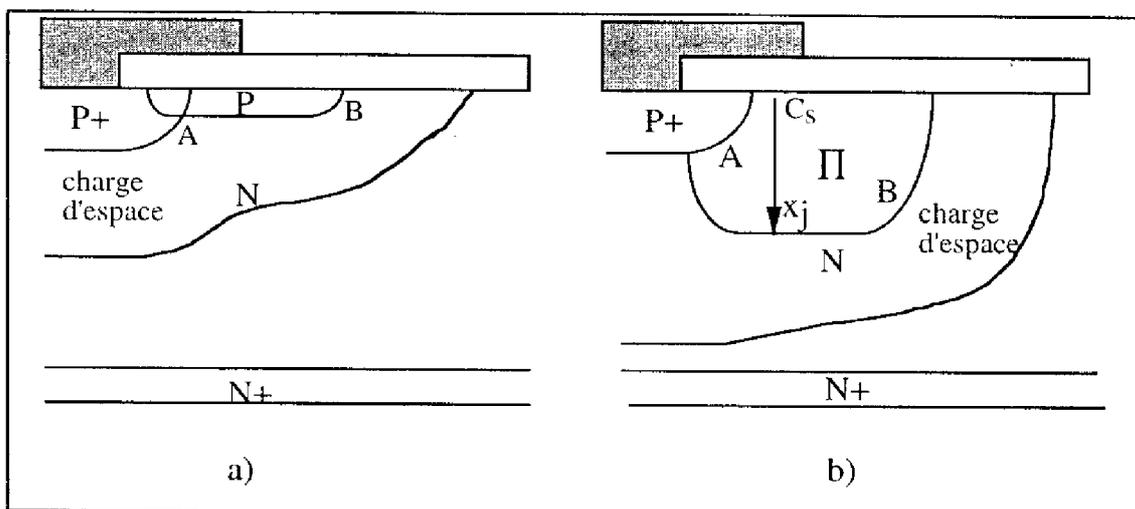


Figure 6 : Extension de la charge d'espace dans :

- a) une jonction implantée.
- b) la structure P⁺-Π-N-N⁺.

La charge d'espace va s'étendre dans le silicium (Figure 6a et 6b) sous la jonction implantée et la structure P⁺-Π-N-N⁺. La région P⁺ va modifier la forme et la profondeur de la charge d'espace et donc la distribution du champ électrique. La figure 7 représente la répartition du champ électrique au claquage pour une structure JTE. La tension de claquage d'une simple diode est toujours de 388 V tandis que celle de la diode avec implantation est de 666 V. On observe deux pics de champ électrique : le premier se situe à la courbure de la jonction principale et le second à la courbure de la jonction implantée. L'optimisation de cette structure consiste à obtenir un claquage dans les deux régions simultanément.

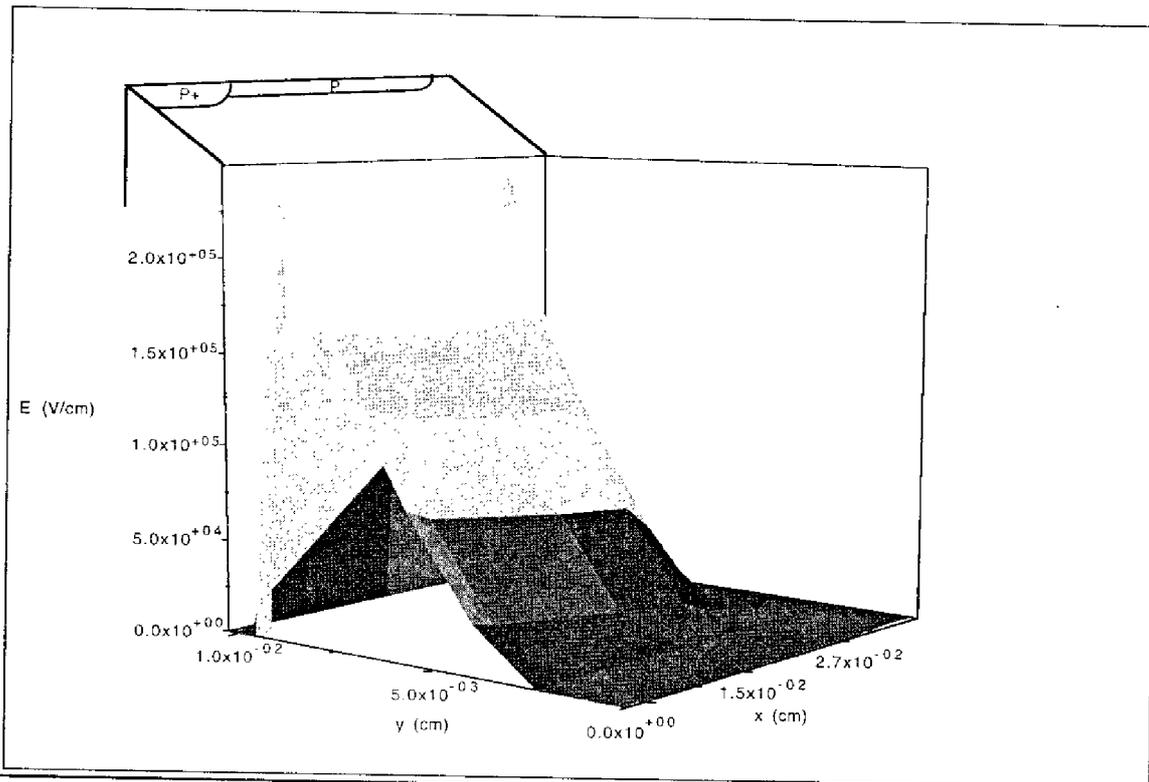


Figure 7 : Répartition du champ électrique dans une structure JTE au claquage.

2-2 : Paramètres influençant la tenue en tension

Trois principaux paramètres agissent sur l'efficacité de cette structure.

2-2-a : La dose implantée

La dose de la zone P⁻ doit être précisément ajustée pour que cette technique soit efficace. En effet, si la concentration dans la zone implantée est trop grande, le claquage sera seulement déplacé de la région A vers la région B (voir Figure 6a). Par contre, si la concentration de cette zone est trop faible, le claquage se produira à la courbure de la jonction principale dans la région A, comme s'il n'y avait pas de terminaison.

Sanchez [21] a étudié la dépendance de la tension de claquage en fonction de la dose implantée sur des diodes réalisées sur un substrat dopé à 10^{14} cm^{-3} .

Cette étude montre que la dose implantée doit être précise car une faible variation de celle-ci entraîne une grande variation de la tension de claquage.

Dans le cas d'une structure en perçage, Austin [22] a montré que la dose était moins critique et que l'on avait un plateau de valeurs optimales.

2-2-b : La largeur de la zone implantée

Sanchez [21], [23] a étudié la variation de la tension de claquage en fonction de l'extension L de la région P⁻, pour un substrat dopé à 10^{14} cm^{-3} et une dose optimale de

$1.3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. La tension de claquage croît avec l'extension L mais cette variation sature au delà de 160 à 200 μm (la région P est suffisamment grande pour supporter une partie de la tension).

2-2-c : Les charges d'interface

Les charges d'interface jouent un rôle important sur la tenue en tension. Plusieurs auteurs ont étudié leur influence : Hwang [18] ainsi que Murray [24] ont montré que lorsque la densité de charges atteint $5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, la tension de claquage chute brutalement. Austin [22] prévoit une chute de la tension de claquage plus faible (14%). Par contre pour des concentrations en surface plus importantes (doses plus importantes), Boisson [19] a montré que les charges n'avaient pas d'influence.

Auteur	Dopage (cm^{-3})	Perçage	Influence de Q_{ss}
Murray	10^{15}	non	<ul style="list-style-type: none"> • $Q_{ss}=2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$: chute de 20% de BV. • $Q_{ss}=5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$: chute de 40% de BV.
Austin	$2 \cdot 10^{14}$	non	<ul style="list-style-type: none"> • $Q_{ss}=2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$: chute de 6% de BV. • $Q_{ss}=5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$: chute de 14% de BV.
		oui	Insensible pour $Q_{ss} < 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.
Hwang	10^{14}	non	<ul style="list-style-type: none"> • $Q_{ss}=10^{11} \text{ cm}^{-2}$: chute de 4% de BV. • $Q_{ss}=5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$: chute de 40% de BV.

Tableau 3 : Influence des charges d'interface.

Murray [24] a montré que les charges en surface sont le facteur majeur contribuant à la baisse de la tension de claquage. En effet, la tension de claquage chute de 40% pour une densité de charges de $5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ (nous remarquons que cet ordre de grandeur est proche de la dose d'implantation optimale, ce qui explique sa forte sensibilité aux charges en surface).

Pour Austin [22], les charges ont une influence à partir de 10^{11} cm^{-2} dans le cas de non perçage. Dans le cas de perçage les charges ont une influence pour une dose plus importante.

Les charges d'interface ont un effet sur la tenue en tension, car celles-ci modifient légèrement la dose de la région implantée. Or, nous avons vu précédemment que l'efficacité de la technique était très dépendante de la dose d'implantation de la région P : cette dose doit être parfaitement optimisée pour une structure en non-perçage. Pour les structures en perçage,

nous avons vu que l'on avait une gamme de valeurs optimales : c'est la raison pour laquelle ces structures sont moins sensibles aux charges d'interface.

2-3 : Avantages et inconvénients de cette technique

La technique des jonctions implantées permet d'obtenir 95% de la tension de claquage de la jonction plane, nécessite un niveau de masquage supplémentaire (impact sur le coût du composant) et consomme peu de surface. Tantraporn [25] a évalué que cette technique consomme seulement 30% de la surface nécessaire à la technique des anneaux flottants. Le courant de fuite en inverse peut être excessif pour ce type de géométrie à cause de la surface de la diode.

Les charges de surface ont un effet important sur la tenue en tension (perte de 25 à 50%). Pour remédier à ce problème, Yilmaz [15] propose une structure avec quatre zones d'extensions de charges d'espace optimisées ; cette structure est très sensible aux charges d'interface mais après optimisation, les charges n'ont plus d'influence sur la tenue en tension. Dans une structure P⁺-II-N-N⁺, Hwang [18] a montré que la décroissance de la tension de claquage n'était pas significative lorsque la densité de charges était inférieure à 10¹¹ cm⁻² mais la tension de claquage décroît brusquement lorsque la densité de charges en surface atteint 5.10¹¹ cm⁻² (perte de 50%). Pour les composants haute tension, la profondeur de la jonction II-N doit être supérieure à 40 μm (obtenue grâce à une diffusion à haute température) induisant une sensibilité aux défauts cristallins.

Temple [26], [27] propose une structure avec deux zones d'extension de charges d'espace, la première permet de contrôler le pic de champ en volume, la seconde contrôle le champ en surface (la dose dans la zone implantée décroît dans les différentes zones d'extensions).

Stengl [28], Mitlehner [29] ont récemment proposé une nouvelle technique : VLD (Variation Lateral Doping). Cette technique consiste à réaliser des implantations en surface à partir d'un masque à plusieurs zones. On diminue latéralement la dose d'implantation ainsi que la profondeur de jonction dans la zone P. Elle permet de réduire le champ électrique en surface et donc de maximiser la tension de claquage. On obtient 90% de la tension de claquage de la jonction plane. Cette structure est peu sensible aux charges d'interface. En effet, pour un substrat n dopé à 7.10¹³ cm⁻³, la tenue en tension est de 1500 V sans charge et de 1450 V pour une densité de charges de 2.10¹¹ cm⁻². Nous constatons que la technique VLD est beaucoup moins sensible aux charges d'interface que la technique des anneaux flottants [28]. En effet, la diminution de tension est de 150 V pour une structure à anneaux flottants dont la tenue en tension est de 1500 V alors que la diminution de tension de la structure VLD est de 50 V.

3-LES PLAQUES DE CHAMPS

3-1 : Principe de l'électrode de champ

Cette technique proposée en 1967 par Grove [30], consiste à utiliser une électrode métallique placée au-dessus de la jonction cylindrique et séparée du semiconducteur par une couche d'oxyde (Figure 8). Pour éviter une électrode supplémentaire, on rallonge la métallisation qui polarise la jonction. Le rôle de l'électrode de champ est de diminuer les effets de courbure de la jonction [31], [32]. On applique une tension négative sur cette électrode par rapport au substrat (type N), l'extension de charge d'espace sera modifiée (l'électrode repoussera les électrons). Dans le cas d'un substrat P, il faudra appliquer une tension positive sur la plaque de champ par rapport au substrat pour améliorer la tenue en tension d'une jonction N⁺P.

La charge d'espace va s'étaler jusqu'au bout de la plaque de champ. On diminue ainsi le champ près de la jonction et il en résulte une meilleure tenue en tension.

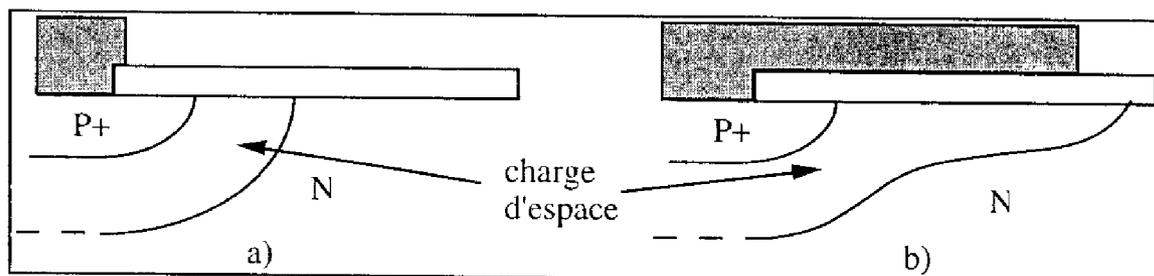


Figure 8 : Extension de la zone de charge d'espace dans une jonction cylindrique sans plaque de champ (a) et avec plaque de champ (b).

La figure 9 représente une répartition du champ électrique dans une structure comportant une plaque de champ. Dans le cas d'une diode seule (Figure 5), nous avons remarqué que le champ électrique diminue rapidement près de la jonction tandis que dans le cas de la diode avec une plaque de champ, le champ électrique diminue beaucoup plus lentement près de la jonction : la tenue en tension passe alors de 388 V (jonction cylindrique seule) à 490 V (jonction cylindrique avec plaque de champ).

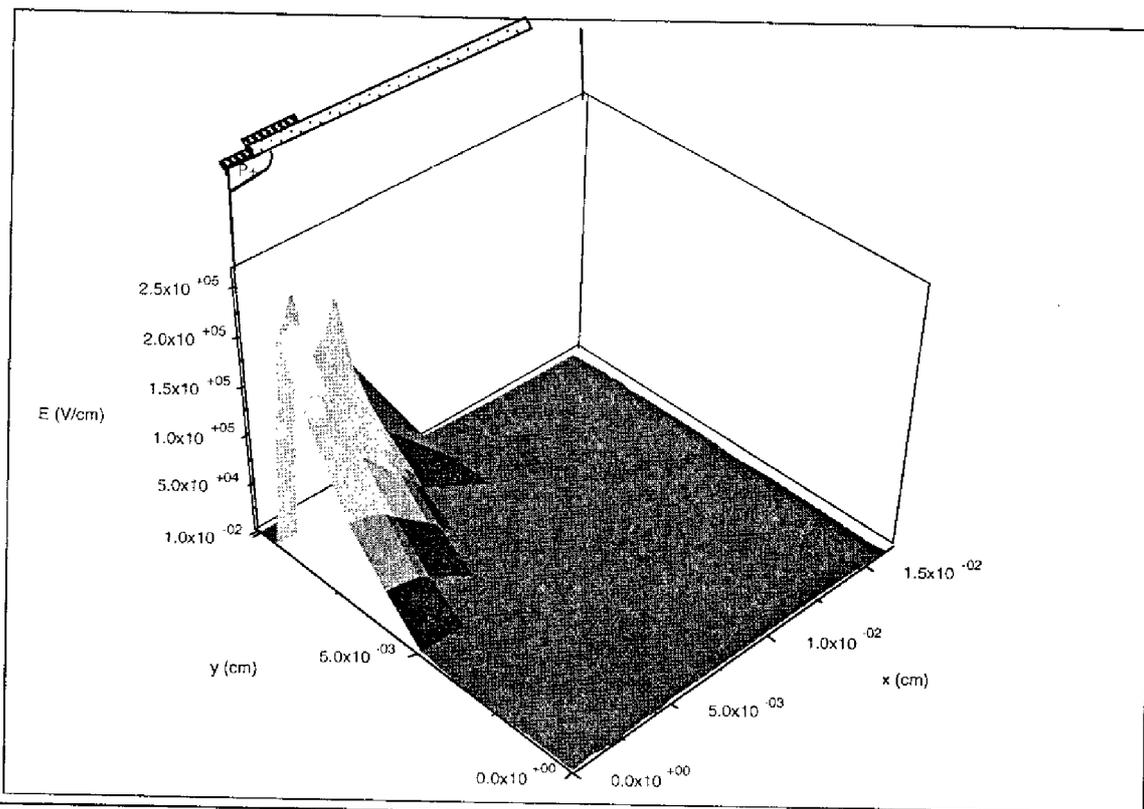


Figure 9 : Répartition du champ électrique dans une structure avec une plaque de champ.

3-2 : Paramètres influençant la tenue en tension

Plusieurs études [30], [31], [33], [34], [35] ont montré que le paramètre qui affecte le plus la tension de claquage est l'épaisseur d'oxyde sous la plaque de champ. En effet, si l'épaisseur d'oxyde est trop importante, l'influence de la plaque de champ sur la jonction sera négligeable. Si par contre elle est trop faible, la courbure de jonction est bien protégée mais le claquage se produira en surface au bout de l'électrode.

Nous avons deux régions de claquage à considérer [31], [32] :

- la région située près de la jonction cylindrique,
- la région située au bord de l'électrode de champ.

L'optimisation de la structure consistera à obtenir un claquage simultané à la jonction cylindrique et au niveau de la plaque de champ.

Pour un dopage d'épitaxie C_{epi} , il existe donc une épaisseur d'oxyde optimale e_{ox} qui permet d'avoir ce claquage simultané. Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de l'épaisseur d'oxyde en fonction de la concentration du substrat. Rusu [33] a déterminé que la condition optimale se traduit par l'équation $e_{ox}/W_p=0.3$ tandis que pour Conti [31] cette condition est $e_{ox}/W_p=0.07$ (W_p étant l'extension de charge d'espace de la jonction plane équivalente). A partir de ces deux valeurs, nous pouvons tracer la courbe (Figure 10) donnant l'épaisseur

d'oxyde minimale en fonction du dopage du substrat. Nous constatons que pour des dopages faibles (c.a.d. des dispositifs haute tension), cette épaisseur d'oxyde est trop importante pour être réalisée technologiquement. Le claquage se produira alors au bord de l'électrode de champ. Nous pouvons utiliser cette technique de garde que pour des dopages relativement élevés (basses et moyennes tensions). Pour Basavana Goud [36], [37], [38], e_{ox}/W_p dépend de plusieurs paramètres :

- L'épaisseur d'oxyde optimale diminue si la structure est en perçage.
- L'épaisseur d'oxyde optimale est fonction du dopage du substrat (Figure 10) : elle décroît lorsque le dopage augmente. Cette épaisseur diminue également avec la profondeur de jonction.

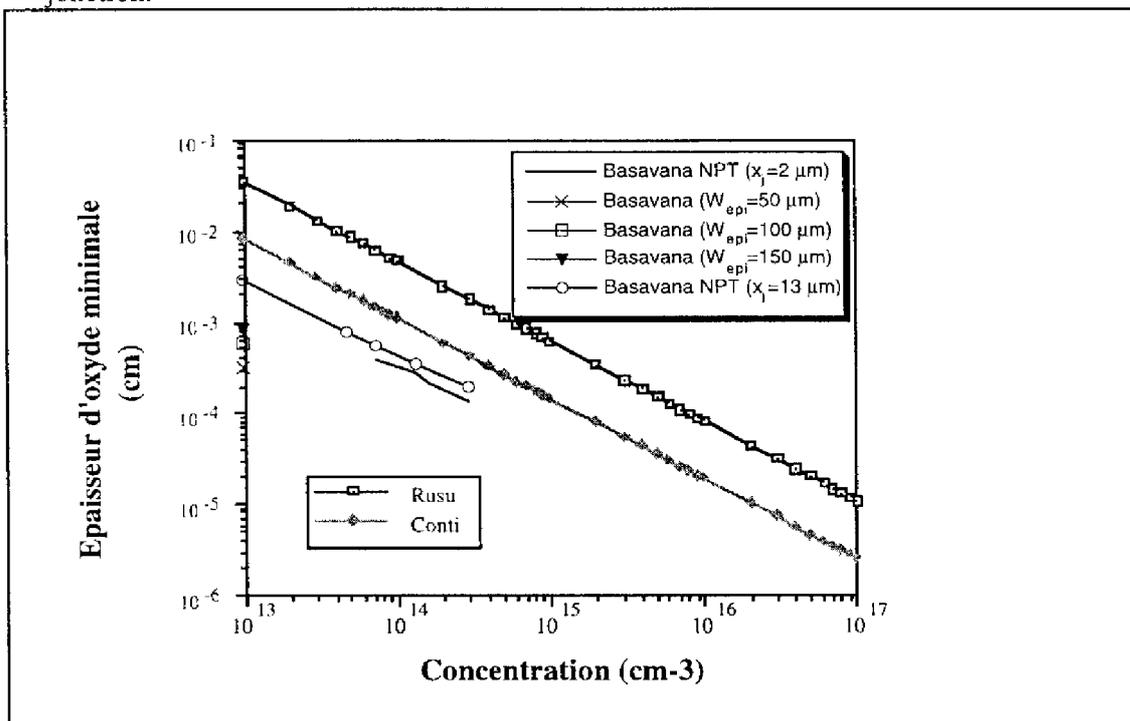


Figure 10 : Epaisseur d'oxyde minimale en fonction de la concentration du substrat pour une efficacité maximale d'après Rusu, Conti et Basavana.

On peut améliorer l'efficacité de la plaque de champ en utilisant deux épaisseurs d'oxyde différentes [31]. Plusieurs auteurs [39], [40], [41] ont étudié une structure avec trois niveaux d'épaisseur d'oxyde différents permettant d'obtenir 90% de la tenue en tension de la jonction plane équivalente pour des calibres en tension de 800 V.

En fait, une structure parfaitement optimisée comporterait un oxyde mince au bord de la jonction puis il augmenterait paraboliquement [42].

Les effets des charges d'interface Q_{ss} sur cette structure sont négligeables [31] du fait que la plaque de champ est chargée négativement et fait écran à Q_{ss} .

Deux autres paramètres importants sont à optimiser : la longueur de la plaque de champ et la distance entre la haute tension (stop-channel) et la basse tension (plaque de champ).

Nous remarquons que (Tableau 4) :

- L'influence de la longueur de la plaque de champ (F) est d'autant plus importante que la tenue en tension plane est élevée. Cette longueur doit être suffisante pour agir sur la répartition des équipotentiels.
- L'influence de la distance entre la haute tension et la basse tension est négligeable pour Boisson [8] sauf pour $\Delta L < 20\mu\text{m}$ tandis que Goud [38] et Zoroglu [32] ont montré que celle-ci avait une influence pour un substrat plus résistif.

Auteur	Dopage (cm^{-3})	BVp(V)	BVmax/BVp	$\partial BV / \partial F$	$\partial BV / \partial \Delta L$
Boisson	$2 \cdot 10^{14}$	580 perçage	0,9	0	0
	$6,3 \cdot 10^{13}$	1200 perçage	0,7	$5,4\text{V}/\mu\text{m}$ $30 < F < 60$ 0 $F > 60$	0
Goud	$1 \cdot 10^{14}$	1786	0,65	$3\text{V}/\mu\text{m}$ $15 < F < 61$ $0,34\text{V}/\mu\text{m}$ $F > 60$	3,2 $\Delta L > 46\mu\text{m}$ $\Delta L < 183\mu\text{m}$
Zoroglu	$1 \cdot 10^{13}$	2200 perçage	0,9	$8,7\text{V}/\mu\text{m}$ $20 < F < 70$	4,3 $\Delta L > 200\mu\text{m}$ $\Delta L < 250\mu\text{m}$

Tableau 4 : Influence des paramètres F et ΔL d'après Boisson Goud et Zoroglu [8], [32], [36].

Basavana Goud [36] a étudié l'influence de l'épaisseur d'épitaxie. Il a démontré que les structures avec plaque de champ en perçage avaient de meilleures performances (efficacité de 88% pour un substrat n dopé à $7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ et $W_n = 100 \mu\text{m}$) que les structures en non perçage (efficacité de 66% pour un substrat n dopé à 10^{14} cm^{-3}) pour des tenues en tension de 1300 V.

3-3 : Avantages et inconvénients de cette structure

La technique de plaque de champ semble plutôt être réservée aux composants basses et moyennes tensions. En effet, pour des structures en non perçage nous remarquons que le rendement est de l'ordre de 90% pour des tensions inférieures à 500V, de l'ordre de 70% pour des moyennes tensions et de 50% pour des structures hautes tensions [8]. Cette efficacité est meilleure pour des structures en perçage [36].

La structure idéale devrait comporter un oxyde d'épaisseur croissante du bord de la jonction à l'électrode de champ, ce qui rend la réalisation technologique plus complexe.

Zoroglu et Clark [32] ont montré qu'il pouvait y avoir des phénomènes de décharges en surface entre les deux métallisations dans le cas de dispositifs haute tension, provoquant un claquage prématuré ; ils proposent d'utiliser une passivation par un diélectrique.

Cette technique s'emploie souvent en association avec d'autres techniques de garde : anneaux flottants [40], [41], couches semi-résistives [46] ainsi que nous allons le voir.

4-LES COUCHES SEMI-RESISTIVES

4-1 : Principe des couches semi-résistives

Cette technique nécessite un contact haute tension en surface (c'est le cas des transistors bipolaires utilisant un "stop channel").

La passivation des systèmes hautes tensions utilisant des couches semi-résistives, pour étaler le champ électrique à la surface de la jonction Planar PN, a été introduite en premier par Clark en 1972 [43]. Il dépose une couche de Polysilicium, sur une couche d'oxyde, qui fait contact avec la jonction principale et avec l'électrode haute tension en surface. Ceci permet de linéariser le potentiel entre ces deux contacts. Même si le champ électrique est fortement réduit, le courant de fuite dû au courant ohmique à travers le polysilicium est trop important.

C'est en 1975 que Matsushita [44] a introduit le SIPOS (semi-insulating polysilicon) qui possède une conductivité plus basse que le polysilicium. La couche de SIPOS peut être disposée soit directement sur le silicium soit en interposant une couche d'oxyde. La première solution présente un courant de fuite de la jonction en inverse important dû à la contamination d'ions en surface et des caractéristiques dynamiques dégradées à cause du temps de relaxation des charges dans le SIPOS.

Le SIPOS, de formule chimique S_iO_x ($0 < x < 2$), est un matériau semi-isolant. Il est obtenu par décomposition du silane S_iH_4 et du protoxyde d'azote N_2O par LPCVD. On obtient un polysilicium dopé oxygène dont la conductivité est fonction du pourcentage en oxygène. Matsushita [44] a montré que le film de SIPOS devait avoir une concentration en oxygène entre 15 et 35% pour avoir les propriétés optimales (faible courant de fuite).

Lorsque le SIPOS est directement déposé sur le silicium, deux inconvénients apparaissent :

- augmentation du courant de fuite.
- apparition de charges à l'interface.

Pour éliminer ces inconvénients, le film de SIPOS sera déposé sur une couche d'oxyde thermique. Un avantage majeur du SIPOS sur l'oxyde est sa faible conductivité [45] qui palie à l'apparition de charges en surface.

Jaume [46], [47] a proposé récemment une structure avec deux couches de SIPOS déposées sur de l'oxyde. La première couche dopée à 12% (de 3200Å) permet de linéariser le potentiel entre le bord de la plaque de champ et le contact "stop channel", la seconde plus résistive, dopée à 30% (de 3200Å) d'oxygène est une protection contre le claquage diélectrique de la première couche et contre la contamination d'ions.

4-2 : Paramètres influençant la tenue en tension

La structure proposée par Jaume [46], [47] est représentée Figure 11.

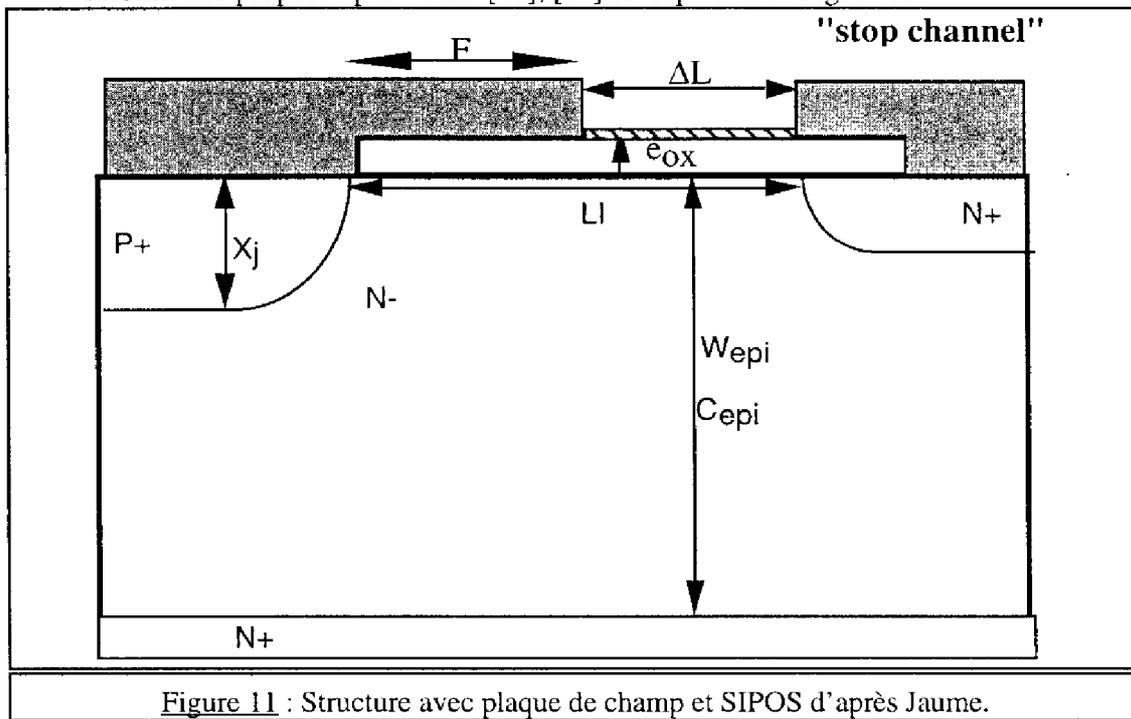


Figure 11 : Structure avec plaque de champ et SIPOS d'après Jaume.

On remarque que la métallisation de base s'étend au delà de la jonction principale : c'est donc une plaque de champ qui va étaler le potentiel à droite de la jonction. Le SIPOS va lui imposer une linéarisation du potentiel depuis cette plaque de champ jusqu'au semiconducteur. La plaque de champ agit sur le champ électrique de la jonction diffusée alors que la couche de SIPOS évite un champ élevé près du bord de la plaque de champ. Ces techniques sont donc complémentaires.

La figure 12 représente la répartition de potentiel à la surface du silicium pour une structure avec et sans SIPOS. Nous remarquons que le potentiel en surface de la structure avec SIPOS est linéaire alors qu'il est parabolique pour une structure sans SIPOS. La tenue en tension d'une structure avec SIPOS est plus importante que la tenue en tension d'une structure sans SIPOS. La tension de claquage passe de 388 V (jonction cylindrique seule) à 600 V (diode avec SIPOS).

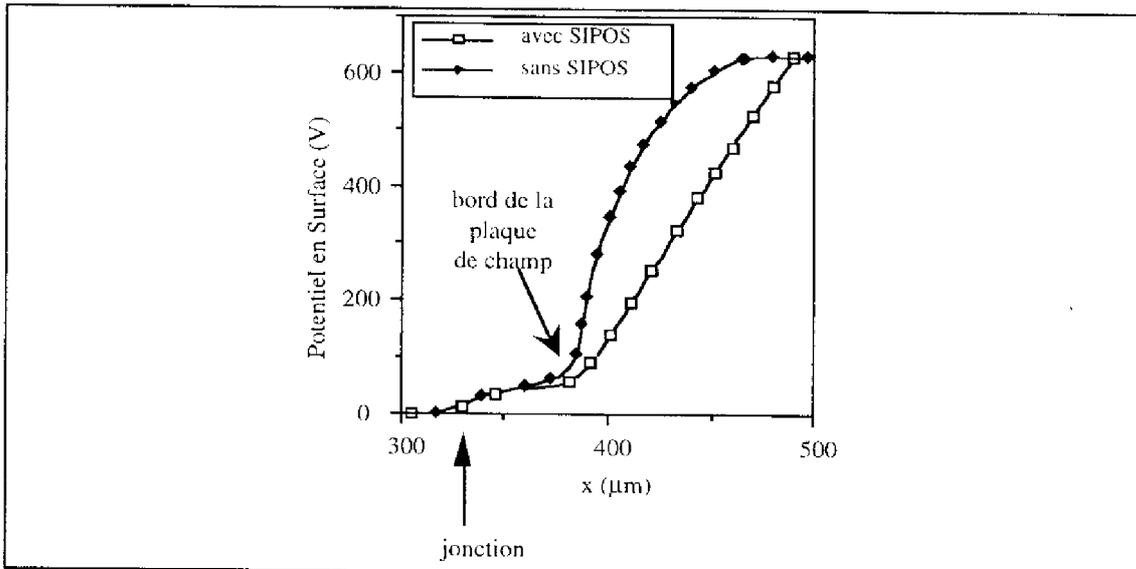


Figure 12 : Répartition du potentiel à la surface pour une structure avec et sans SIPOS.

Plusieurs paramètres influencent la tenue en tension :

- L'épaisseur d'oxyde sous la plaque de champ (e_{ox}) : c'est un paramètre de second ordre grâce au dépôt de SIPOS.
- La longueur de la plaque de champ (F) doit, suivant le dopage de l'épitaxie, avoir une plus petite longueur possible pour minimiser la surface du composant.
- La distance entre la fin de la plaque de champ et le stop channel (ΔL) doit être suffisante pour ne pas dégrader la tension de claquage mais sera bien sûr fixée elle aussi à sa valeur minimale.

Le tableau 5 représente les paramètres d'optimisation pour des structures avec SIPOS qui peuvent tenir des tensions de l'ordre de 1000V et 1500V, selon Jaume [46], obtenus à partir de simulations bidimensionnelles et de réalisations technologiques.

Tension	C_{epi} (cm^{-3})	W_{epi} (μm)	e_{ox} (μm)	F (μm)	ΔL (μm)
1000 V	$7.2 \cdot 10^{13}$	75	1,25	40	100
1500 V	$5.5 \cdot 10^{13}$	150	1,25	75	150

Tableau 5 : Valeurs optimales des paramètres pour des structures 1000V et 1500V.

4-3 : Avantages et inconvénients de la structure

La technique du SIPOS consomme moins de silicium que la technique des anneaux flottants qui est aussi utilisée dans ces gammes de tension. La technique du SIPOS est

complémentaire à d'autres techniques, en particulier à la technique des plaques de champ [47] (elle possède les avantages de la plaque de champ tout en évitant le fort champ en bout de métallisation). Saitoh [48] a proposé une technique comportant des anneaux de champs flottants avec plaques de champ et une couche semi-résistive sur le bord de la terminaison permettant d'obtenir des tenues en tension élevées (2000 V). Stockmeier [49] a combiné la méthode VLD (Variation lateral Doping) avec le SIPOS permettant d'obtenir des dispositifs très haute tension (6000 V) mais le SIPOS étant déposé sur le silicium, la résistance de la couche de SIPOS doit être parfaitement ajustée afin d'obtenir un courant de fuite convenable.

Le SIPOS a une forte résistivité, il introduit une résistance par carré de $10^8 \Omega/\square$ entre la haute tension (le stop channel) et la basse tension (la jonction principale). Cette forte impédance linéarise le potentiel.

De plus, cette technique est insensible aux charges d'interface et permet d'obtenir un rendement de 85% par rapport à la tenue en tension plane théorique.

Jaume [47] a étudié le comportement électrique de cette terminaison de jonction lorsqu'elle est soumise à des variations de tension rapides. Il a appliqué des dV/dt de l'ordre de $7500 \text{ V}/\mu\text{s}$ sur les structures entre le collecteur et l'émetteur avec l'aide d'un circuit inductif sans noter de dégradation mais notons qu'il a appliqué des tensions très inférieures à la tension de claquage par avalanche.

Cependant cette technique nécessite un masque supplémentaire et une technologie de dépôt complexe (LPCVD).

Quelques variantes de cette technique : la technique MFFP (Multiple Floating Field Plate) [50], [51], [52] ou la technique récente proposée par Endo [53] (représentée Figure 13) sous l'appellation SRFP (Scrool Shaped Resistive Field Plate). Elle est construite à partir d'un dépôt de polysilicium sur oxyde s'enroulant en spirale autour de l'anode. Ce dépôt possède une certaine résistance qui se trouve répartie sur les tours de la spirale.

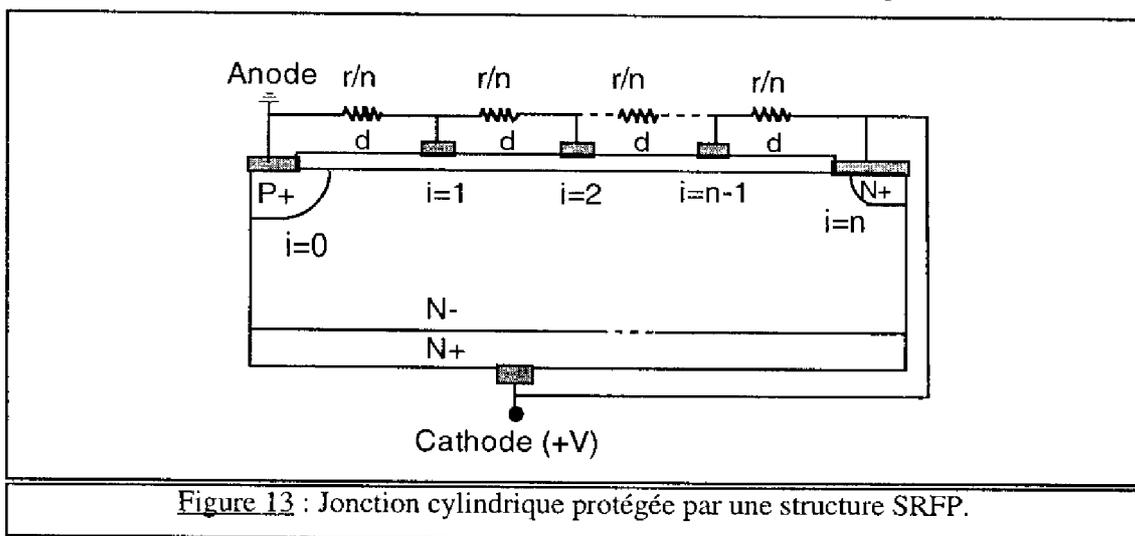


Figure 13 : Jonction cylindrique protégée par une structure SRFP.

Cette spirale est connectée à deux électrodes. Ceci est équivalent à un pont résistif polarisé entre la masse (contact sur la jonction principale) et la haute tension ("stop-channel").

Cette technique équivalente à la technique SIPOS et plaque de champ, est totalement compatible avec la technologie Planar. Le courant de fuite est déterminé par la résistivité du polysilicium qui est de $10^3 \Omega.cm$ à comparer aux 10^9 à $10^{11} \Omega.cm$ du SIPOS.

5-LA TECHNIQUE DU RESURF

5-1 : Principe de la méthode

La technique de RESURF [54] (REduced SURface Field) s'applique particulièrement aux composants latéraux : le transistor MOS latéral ou LDMOS. La figure 14 donne une coupe schématique d'un transistor LDMOS conventionnel et d'un transistor LDMOS RESURF.

Considérons un LDMOST conventionnel, c'est à dire bâti sur un substrat N/N⁺ (Figure 14). Quand la tension de drain augmente, la haute tension est essentiellement supportée par la jonction P(canal)/N⁻(épitaxie) et le claquage du dispositif correspond à celui de la jonction cylindrique. Si l'on remplace le substrat N⁻/N⁺ par un substrat N⁻/P⁺ et que l'on polarise la face arrière du dispositif à une tension inférieure à la tension de drain pour que la jonction N⁻/P⁺ soit polarisée en inverse, on a réalisé un transistor LDMOS RESURF). En choisissant correctement les dopages et la géométrie du dispositif, la jonction P(canal)/N⁻(épitaxie) sera complètement dépeuplée avant d'atteindre la tension critique. On obtient donc le claquage de la jonction N⁻(épi)/P⁺(substrat) qui est une jonction plane. Cette technique offre une efficacité de 100% par rapport au claquage d'une jonction plane en perçage.

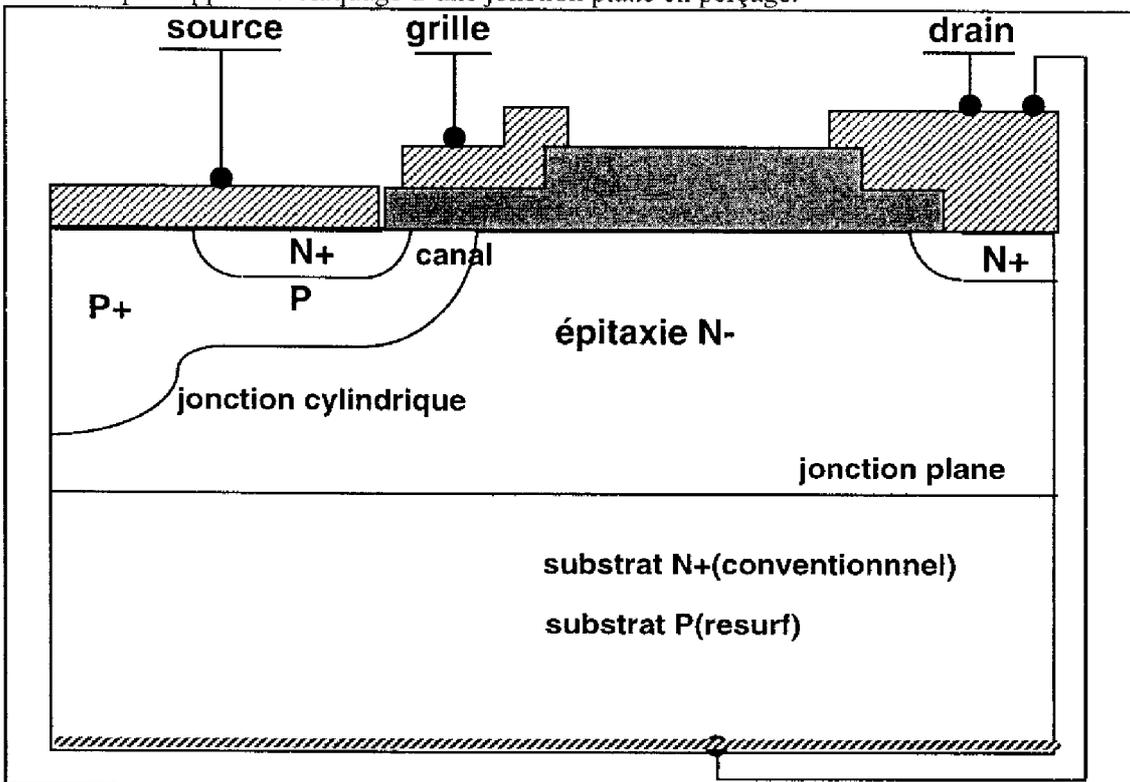


Figure 14 : Schéma d'un LDMOST conventionnel et d'un LDMOST RESURF.

5-2 : Paramètres influençant la tenue en tension

Pour que l'effet RESURF fonctionne correctement, il faut éviter que le claquage par avalanche de la jonction P(canal)/N(épitaxie) n'ait lieu. Il faut donc que cette région soit totalement dépeuplée avant que la tension cylindrique soit atteinte. Plusieurs paramètres doivent être optimisés pour que l'effet RESURF soit obtenu. Nous rappellerons ici les principaux résultats. Cette optimisation a été largement développée dans [55].

L'épaisseur et le dopage de l'épitaxie :

Lorsque l'épaisseur de l'épitaxie est faible, la jonction plane $P^-/N^-/N^+$ est en limitation de charge d'espace. La tenue en tension obtenue sera celle d'une jonction plane (caractérisant l'effet RESURF) en limitation de charge d'espace. Cette tenue en tension peut être optimisée en augmentant l'épaisseur d'épitaxie. Par contre, lorsque cette épaisseur est trop grande, on n'a plus d'effet RESURF : le claquage se produira en premier au niveau de la jonction cylindrique P(canal)/N(épitaxie).

La distance canal-drain L_{cd} :

La distance entre les deux diffusions N^+ et P^+ doit être suffisamment grande pour que la charge d'espace (au niveau de la jonction P^+N^-) puisse s'étendre librement latéralement [54], [55], [56]. La tension de claquage augmente jusqu'à une valeur seuil puis elle reste constante : cette valeur est optimale.

5-3 : Avantages et inconvénients du RESURF

Cette méthode est particulièrement intéressante par sa simplicité de conception (elle ne nécessite pas d'étape technologique supplémentaire) et son efficacité (on obtient 100% de la tension de claquage de la jonction plane) pour des moyennes tensions. Cependant, cette technique est très sensible aux paramètres technologiques (épaisseur d'épitaxie, distance canal-drain L_{cd}). Ce composant latéral ne permet pas d'obtenir une tenue en tension très élevée pour une valeur acceptable de la résistance passante.

Pour élargir la tolérance sur les caractéristiques technologiques de l'épitaxie, on peut aussi déposer une couche semi-résistive de SIPOS à la surface entre le canal et la métallisation de drain, ce qui permet de linéariser le potentiel à la surface et de diminuer R_{on} . Charitat [57], [58] a montré que l'on pouvait obtenir une baisse de 66% de R_{on} tout en gardant la même tension de claquage de 400 V.

6-LES ANNEAUX POLARISÉS

6-1 : Principe des anneaux polarisés

Cette technique a été proposée par Macary [60] en 1992. Son principe est de réduire le champ électrique en surface en utilisant une diffusion en forme de spirale. Considérons la structure d'une jonction cylindrique protégée par n anneaux polarisés (voir Figure 15). Les anneaux seront réalisés à partir d'une seule diffusion en forme de spirale. Ceci est équivalent à un pont résistif polarisé entre la masse (l'anode de la jonction principale) et la haute tension (diffusion externe N⁺ qui est au potentiel du substrat : le "stop-channel").

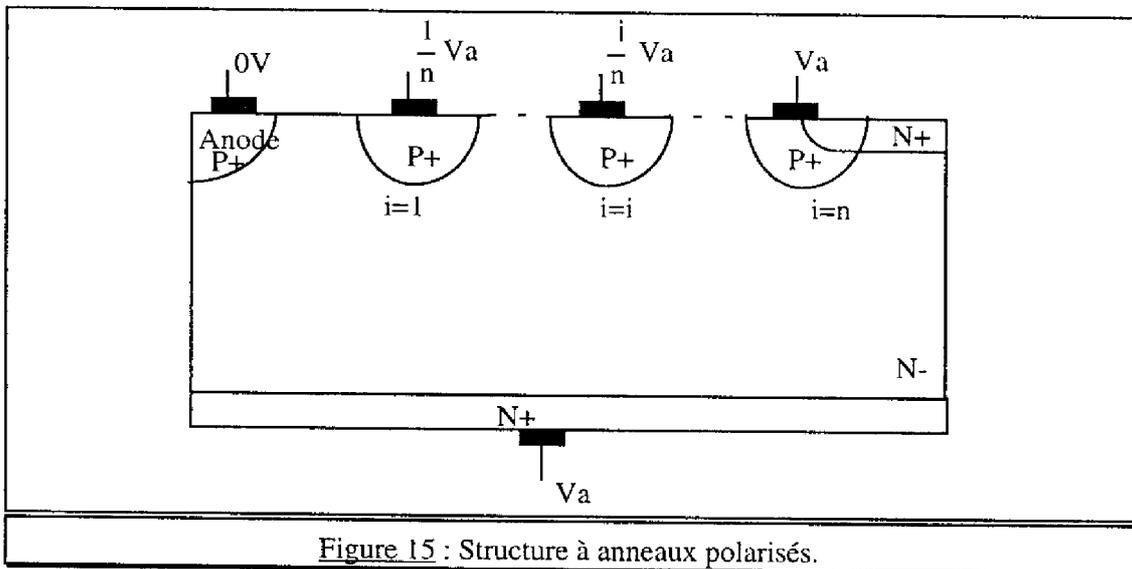


Figure 15 : Structure à anneaux polarisés.

La tension appliquée à chaque anneau est donnée par :

$$V_i = \frac{i}{n} V_a \quad (1.1)$$

i : indice de l'anneau. On indicera la jonction principale 0,

n : nombre total d'anneaux (ou de tours de spirale),

V_i : tension de l'anneau i ,

V_a : tension appliquée au substrat.

La relation (1.1) montre que la tension se trouve répartie entre la masse et la tension de substrat. La tension soutenue par chaque anneau dépend de la tension V_a appliquée et du nombre d'anneaux. Les différences de potentiel anneau-substrat sont progressivement décroissantes de la jonction vers le dernier anneau et sont égales à :

$$V_a - V_i = \frac{(n-i)}{n} \cdot V_a \quad (1.2)$$

La jonction i soutiendra plus de tension que la jonction $i+1$.

Un modèle analytique simple [59], [61] permet d'approcher correctement les valeurs des paramètres de la structure, tels que le dopage de l'épitaxie, le nombre d'anneaux et les distances qui les séparent.

6-2 : Calcul de la résistance de la spirale

Un inconvénient majeur de cette structure est le courant de fuite traversant la spirale. Ce courant est imposé par le potentiel et la résistivité des anneaux. Ceux-ci sont réalisés à partir d'une seule diffusion en forme de spirale. Cette diffusion P possède une résistance qui est répartie sur n tours de spirale (entre la jonction principale et la haute tension). Le nombre minimum d'anneaux est défini par cette résistance. Pour limiter le courant consommé par la structure, Macary [59] propose une résistance totale de $1 \text{ M}\Omega$ pour une structure 1000 V , conduisant à un courant de fuite de 1 mA . Ce courant est imposé par le potentiel des anneaux fixé et dépend des caractéristiques de la largeur de la spirale.

La résistance totale de l'anneau est donnée par :

$$R_{\text{spirale}} = R_{\text{sh}} \frac{L_{\text{spirale}}}{w} \quad (1.3)$$

où R_{sh} est la résistance par carré de la spirale diffusée, w est la largeur de l'anneau et L_{spirale} est la longueur totale de la spirale.

La résistance par carré est donnée par :

$$R_{\text{sh}} = \frac{1}{q\mu N x_j} \quad (1.4)$$

où μ est la mobilité, N le dopage de l'anneau (que nous considérerons uniforme pour simplifier l'expression), et x_j la profondeur de jonction.

La longueur totale de la spirale, lorsque la distance entre les tours de spirale est constante est donnée par [62] :

$$L_{\text{spirale}} = \frac{\pi}{b} (r_{\text{max}}^2 - a^2) \quad (1.5)$$

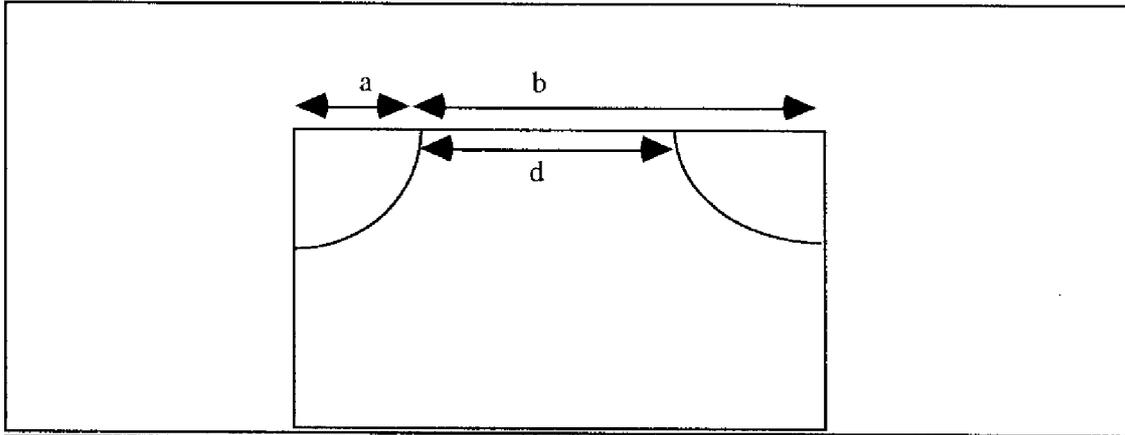


Figure 16 : Vue en coupe d'une structure avec un anneau polarisé.

La figure 16 représente une vue en coupe de la structure définissant les différents paramètres intervenant dans le calcul de la longueur de la spirale.

le rayon maximale r_{\max} est donné par :

$$r_{\max} = a + bn_{\max} \quad (1.6)$$

où a est le rayon de l'anode, n_{\max} est le nombre de tours de spirale (nombre d'anneaux) et $b = d + w/2$.

Donc la résistance de la spirale est donnée par la relation suivante :

$$R_{\text{spirale}} = \frac{1}{q\mu N x_j} \cdot \frac{\pi \left[(a + bn_{\max})^2 - a^2 \right]}{bw} \quad (1.7)$$

Prenons par exemple une structure comportant 4 tours de spirale ($n_{\max} = 4$), une profondeur de jonction de $13 \mu\text{m}$ (x_j), un rayon de $2500 \mu\text{m}$ (a) et une largeur de diffusion de spirale (avec les deux diffusions latérales) de $30 \mu\text{m}$ (w). Le tableau suivant donne les valeurs des résistances pour différentes valeurs de Nx_j .

Nx_j en cm^{-2}	$2 \cdot 10^{15}$	10^{15}	10^{14}	10^{13}
Résistance de la spirale.	150 K Ω	400 K Ω	1.5 M Ω	8 M Ω

Tableau 6 : Valeurs de la résistance de la spirale en fonction de la dose moyenne d'implantation.

Pour avoir une résistance de la spirale satisfaisante, il est nécessaire d'avoir une dose faible. Or pour la jonction principale, il faut impérativement avoir une dose importante ($> 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) pour obtenir une diffusion très dopée en surface (bon contact ohmique). La solution consiste à séparer les implantations de la spirale et de l'anode : une dose plus faible sera utilisée pour la spirale.

6-3 : Avantages de cette technique

Macary [59],[60] a montré que la technique des anneaux polarisés avait la même efficacité sur la tenue en tension que la technique des anneaux flottants. Elle a également montré que la technique des anneaux polarisés avait les avantages suivants :

- Lorsque l'on introduit des charges, cette structure est insensible aux charges à l'interface silicium/oxyde. Pour la structure à anneaux flottants, Yilmaz [15] a montré par simulation que lorsque la densité de charges en surface varie de $5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ à $5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, la tension de claquage chute de 30%,
- Cette structure est peu sensible aux variations des paramètres géométriques. En effet, lorsque l'on fait varier la distance entre les anneaux, la tension de claquage varie peu contrairement aux anneaux flottants où la distance doit être parfaitement optimisée [8],
- La place occupée par cette structure est du même ordre de grandeur que celle occupée par la technique des anneaux flottants (une structure dopée à $7.8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $W_{\text{epi}}=80 \mu\text{m}$ et une profondeur de jonction de $13 \mu\text{m}$ occupe une place de $200 \mu\text{m}$ tandis que les anneaux flottants occuperont une place de $260 \mu\text{m}$),
- Cette technique ne devrait pas introduire d'étape technologique supplémentaire. La résistance de la spirale est trop faible si l'on réalise ensemble les diffusions d'anode et de spirale, qui sont donc maintenant des implantations séparées. Ceci complique le procédé dans le cas de notre simple diode, mais ne devrait pas ajouter d'étape dans le cadre d'un procédé plus complexe où l'on peut utiliser des étapes préexistantes d'implantation p+ (pour l'anode) et p- (pour la spirale).

Récemment Krizaj [63], [64] a proposé de laisser la spirale flottante dans cette structure. Une extrémité est connectée à l'anode mais l'autre n'est pas connecté à la cathode. Le potentiel au bout de la spirale n'atteint jamais le potentiel du substrat. La chute de tension entre les tours de spirale est réduite, ce qui permet de diminuer les pics de champ électrique. La tension de claquage de la structure augmentera par rapport à la même structure avec le bout de la spirale connectée à la cathode et atteindra 92% de la tenue en tension d'une jonction plane. Le courant de fuite dans la structure diminue sensiblement puisqu'il s'agit essentiellement du courant de fuite de la jonction spirale / substrat.

CONCLUSION

Dans cette étude bibliographique, nous avons commencé par présenter les différentes techniques de garde permettant l'accroissement de la tenue en tension des diodes planar : les anneaux de garde flottants, les terminaisons par jonction implantée, les plaques de champs, le SIPOS, la technique du RESURF et les anneaux polarisés. Leurs propriétés ont été décrites et leurs inconvénients majeurs ont été exposés.

Le tableau 7 résume les caractéristiques de ces techniques de garde compatibles avec la technologie Planar. Lorsque l'on veut choisir une technique de garde, il faut tenir compte de certaines caractéristiques :

- Surface de Silicium nécessaire.
- Tension désirée.
- Coût du composant.
- Difficulté de conception :
 - simulation numérique 2D.
 - modèle analytique.
- Complexité de réalisation.
- Effets indésirables (charges dans l'oxyde).
- Types de composants.
- Efficacité.
- Contraintes technologiques.

Le tableau 8 représente une comparaison entre différentes techniques de garde pour un même dopage de substrat ($7-8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$). Nous constatons que l'efficacité de ces techniques est supérieure à 80%. En effet l'efficacité est de 80 à 85% pour les techniques des anneaux flottants et polarisés, et de la plaque de champ, 90% pour les techniques SIPOS et JTE. Nous constatons que les techniques JTE, plaque de champ et SIPOS sont plus compactes que les techniques des anneaux. En effet ces techniques (JTE, plaque de champ et SIPOS) occupent seulement 30 à 40% de la surface nécessaire aux techniques des anneaux flottants et polarisés.

Technique	Rendement	Avantages	Inconvénients	Particularités
Anneaux flottants	85% (Boisson)	-Peu coûteuse. -Simple à réaliser -Pas d'étape technologique supplémentaire.	-Surface de Si importante. -Précision entre les distances des anneaux. -Sensible aux charges d'interface	-Conception analytique 2D. -Bipolaire, mosfet, thyristor.
Anneaux polarisés	85% (Macary)	-idem flottants. -Insensible aux charges d'interface. -Insensible aux paramètres géométriques.	-Résistance de la spirale. -Passage en direct des anneaux.	-Conception analytique 2D.
Plaques de champ	BV<500V 90% 500<BV<1200 70% BV>1200 50% (Boisson) perçage-88% (Basavana)	-Insensibles aux charges d'interface. -surface moyenne.	- Mise en oeuvre complexe.	-Conception analytique 2D. -Bipolaire, mosfet, IGBT. -A utiliser avec une autre méthode
jonction implantée	95% (Temple)	-Insensible aux variations du process. -Surface faible.	-Sensible à la technologie. -Sensible aux charges d'interface. -Un masque supplémentaire. -Surface de Si importante.	-Conception 2D. -Tout composant.
Resurf	100% (BV<600V) (Appels)	-Surface très faible. -Mise en oeuvre simple. -Pas d'étape technologique supplémentaire.	-Technique très exigeante (sensible à la technologie : épaisseur d'épitaixie).	-Conception 2D. -Composants latéraux.
Sipos	90% (Jaume)	-Surface faible.	-Réalisation technologique difficile. -Nécessité d'un plot haute tension en surface.	-Conception 2D. -Tout composant. -A utiliser avec plaque de champ ou RESURF.

Tableau 7 : Comparaison des techniques de garde pour la tenue en tension des jonctions 1^{ère} partie.

Technique	Tension	Efficacité	Surface
Anneaux flottants	1400 V	85%	260 μm
Anneaux polarisés	1330 V	85%	200 μm
JTE	1300 V	90%	150 μm
Plaque de champ	1300 V	82%	140 μm
SIPOS	1100 V	90%	140 μm

Tableau 8 : Comparaison des techniques de garde 2^{ème} partie.

Pour la suite de notre étude, nous avons choisi d'étudier le fonctionnement et les règles de conception de deux techniques de linéarisation de potentiel :

- les anneaux polarisés,
- la spirale de SIPOS.

Ces techniques devraient pouvoir amener un certain nombre d'avantages :

- insensibilité aux charges d'interface,
- grande tolérance sur les règles de dessin,
- robustesse vis-à-vis des tolérances technologiques.

Nous commencerons par analyser le fonctionnement de ces techniques, nous évaluerons les différents paramètres critiques de ces structures puis nous réaliserons des structures tests sur silicium afin de valider ces règles de conception.

**CHAPITRE 2 : ETUDE NUMERIQUE
BIDIMENSIONNELLE DE LA TENUE EN TENSION
DE LA TECHNIQUE DES ANNEAUX POLARISES**

INTRODUCTION

Pour comprendre le comportement électrique des semiconducteurs et les mécanismes physiques mis en jeu, nous devons résoudre un certain nombre d'équations. Cette résolution d'équations est possible à l'aide de logiciels de simulation. Ils doivent tenir compte des différents paramètres de la structure tels que les profondeurs de jonctions, les différentes concentrations, le type de substrat et le type de géométrie utilisée. Nous avons choisi d'utiliser le logiciel ATLAS de Silvaco [1] qui résout les équations fondamentales des semiconducteurs à deux dimensions.

Au chapitre 1, nous avons vu que la technique des anneaux polarisés [2] présente des qualités certaines : insensibilité aux charges d'interface, aux variations géométriques, robustesse vis-à-vis des tolérances technologiques.

Ce chapitre s'organise de la façon suivante :

Nous présenterons d'abord le simulateur utilisé : module MIXEDMODE d'ATLAS.

Nous analyserons l'effet des anneaux polarisés sur le claquage par avalanche. Nous regarderons qualitativement le fonctionnement électrique de cette structure.

Nous traiterons de manière quantitative la tenue en tension d'un dispositif avec anneaux de garde polarisés en fonction des paramètres critiques de cette structure (dopage de l'épitaxie, épaisseur d'épitaxie, distance entre les anneaux, influence des charges d'interface, étude en $dV/dt, \dots$). Nous donnerons un modèle analytique permettant de déterminer le passage en direct des anneaux, phénomène parasite que nous analyserons.

1-PRESENTATION DU LOGICIEL MIXEDMODE

MIXEDMODE [1] est un module de ATLAS qui permet de simuler une structure issue de PISCES avec des éléments extérieurs (résistance, capacité, source de tension ...). C'est un simulateur de type SPICE. Cette approche est appelée simulation "MIXEDMODE" puisque certains éléments sont décrits par un modèle compact tandis que d'autres le sont par un modèle physique. Les simulateurs de circuit de type SPICE résolvent un système d'équations qui décrivent le comportement des circuits électriques tandis qu'un simulateur de structure physique résout un système d'équations qui décrivent le comportement physique de la structure. L'information est ensuite transférée pour la simulation du circuit et les caractéristiques électriques sont calculées en utilisant la simulation de la structure physique.

Dans nos simulations MIXEDMODE, la résistance totale de l'anneau est représentée par des résistances extérieures connectées entre chaque anneau (voir Figure 1).

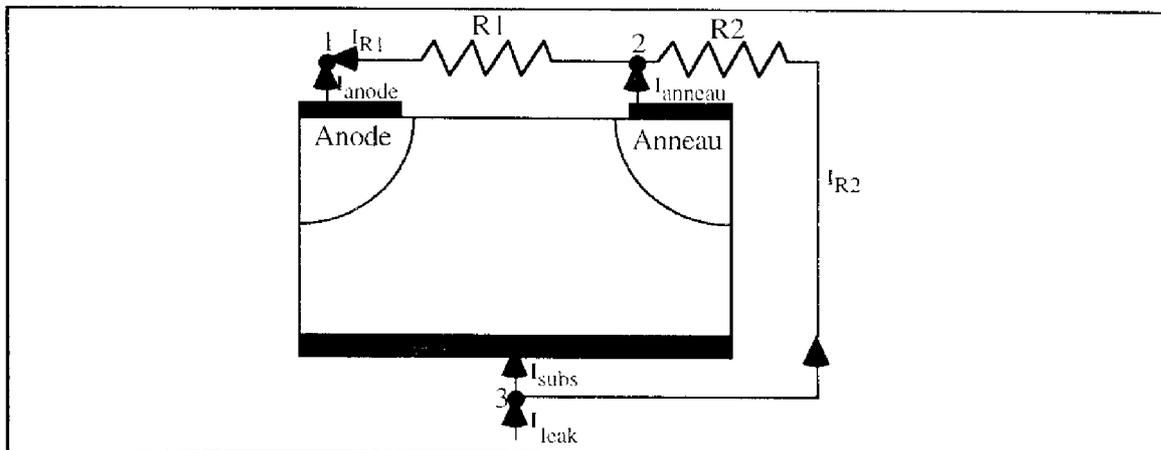


Figure 1 : Structure avec un anneau pour la simulation MIXEDMODE

Ces simulations permettent de prendre en compte la conduction dans la spirale elle-même influençant le potentiel des anneaux. L'effet 3D (dû aux tours de spirale) est pris en compte en introduisant des résistances extérieures entre chaque anneau. Il est à noter que les valeurs des courants dans MIXEDMODE sont différentes du mode "normal" (PISCES) puisqu'elles sont multipliées par la largeur de la structure (troisième dimension) et sont donc données en Ampères. Lorsque la résistance totale de la spirale est de $R = 1 \text{ M}\Omega$, le courant de fuite est limité à 1 mA pour une tension inverse de 1000 V.

2-ETUDE QUALITATIVE DE LA STRUCTURE A ANNEAUX POLARISES

2-1 : Fonctionnement de la structure

On impose une polarisation sur les anneaux par une astuce de conception : au lieu d'utiliser des diffusions concentriques, une seule diffusion est réalisée en forme de spirale. Cette diffusion possédera une résistance de forte valeur, répartie sur les tours de la spirale. Ceci est équivalent à un pont résistif polarisé entre la masse et la haute tension (nommée "stop-channel" au potentiel du substrat).

Chaque jonction étant dès la montée en tension polarisée en inverse, elle développe une charge d'espace de part et d'autre de l'anneau. Pour des faibles tensions de polarisations (2 V), toutes les charges d'espace sont disjointes (Figure 2a) : les jonctions sont polarisées en inverse. Lorsque le potentiel augmente, les zones dépeuplées vont s'élargir et se rencontrer en un point qui se situera plus proche de l'anneau $i+1$ que de l'anneau i . En ce point, le champ électrique sera nul. Ce dernier est tel qu'il change de sens d'une charge d'espace à l'autre et interdit le passage de porteur d'un anneau à l'autre. A 10 V (Figure 2b), l'extension de charge d'espace de la jonction principale et celle du premier anneau se sont rejointes. Au fur et à mesure que la polarisation augmente, les charges d'espace vont se rejoindre : à 20 V (Figure 2c) les trois premières charges d'espace ont atteint le perçage entre anneaux et à 250 V (Figure 2e) toutes les zones dépeuplées sont réunies.

2-2 : Effet perçage

Les extensions de charge d'espace étant fortement dissymétriques, si la distance entre les anneaux est faible, la zone de déplétion d'un anneau peut venir toucher l'anneau suivant. La structure NPN est alors en situation de perçage et l'une des diodes PN, celle de droite, n'est plus polarisée en inverse. On constatera alors une forte augmentation du courant entre les anneaux. Par exemple, à 150 V (Figure 2d), l'extension de charge d'espace du dernier anneau est très inférieure à celle de l'avant-dernier. Le phénomène de perçage se produisant en premier entre les anneaux les plus éloignés de la jonction principale (les plus près du stop-channel) est dû à la faible modulation du champ électrique vertical dans cette zone. Nous reviendrons sur ce phénomène en détail au §3-3.

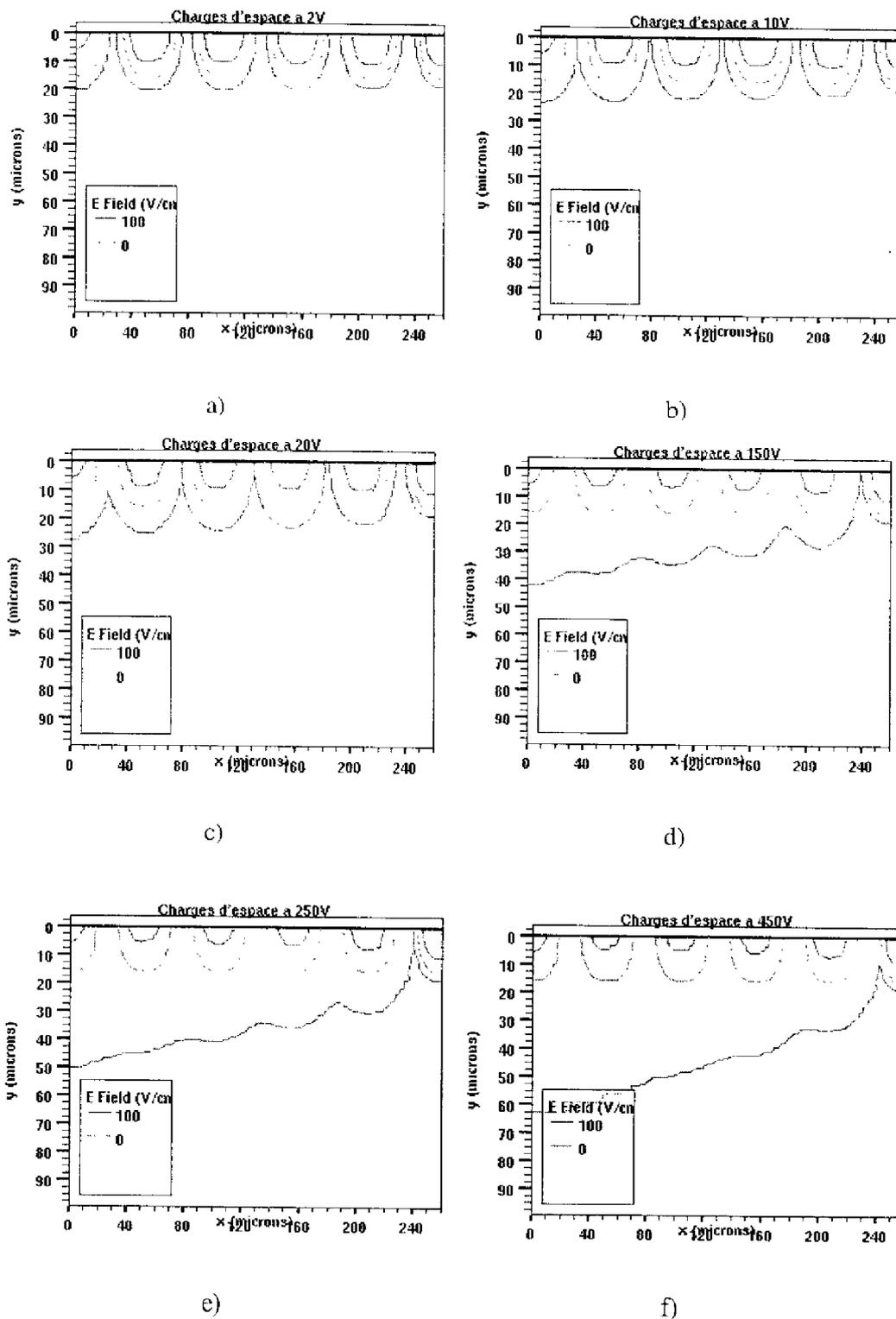


Figure 2 : Extensions de charge d'espace dans une structure à anneaux polarisés pour différentes tensions appliquées.

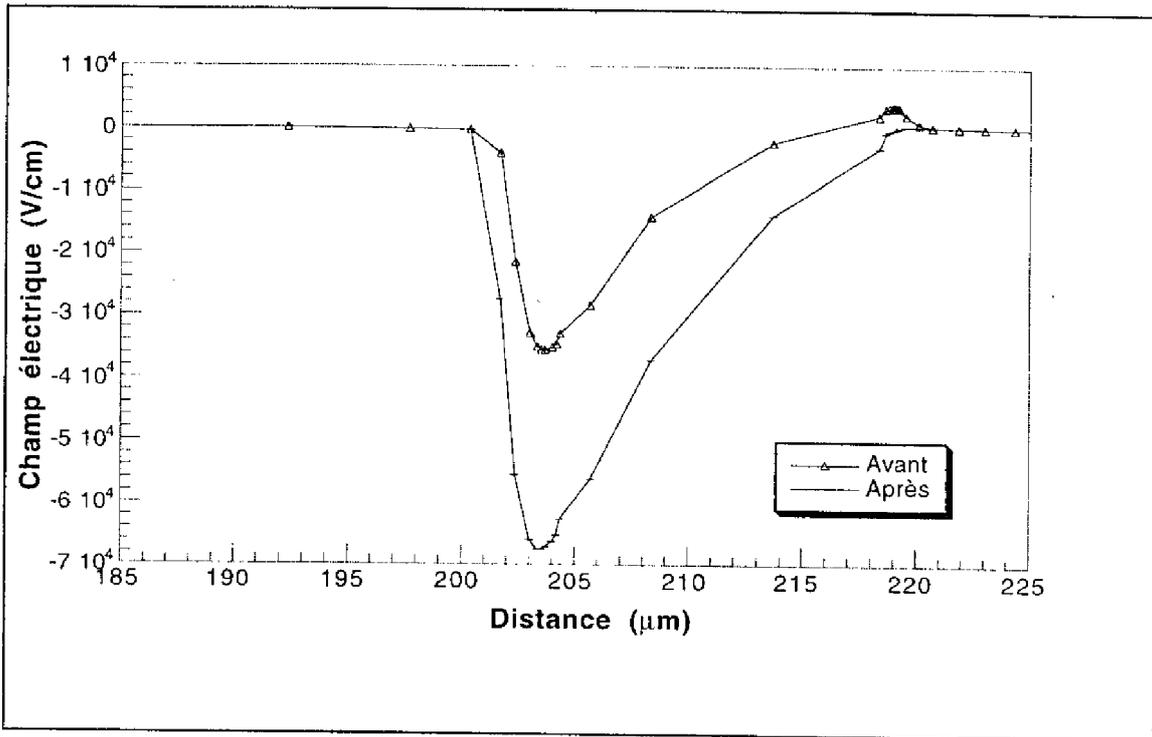


Figure 3 : Distribution du champ électrique en surface (avant 150 V et après le perçage).

La figure 3 représente une coupe de champ électrique en surface sur l'avant-dernier (jusqu'à 200 μm) et le dernier (à partir de 220 μm) anneau. Avant le phénomène de perçage, chaque jonction déploie sa propre zone de déplétion. Le champ électrique change de sens entre chaque anneau, tandis qu'après ce phénomène le champ électrique devient nul au bord du dernier anneau.

3-ETUDE NUMERIQUE

Dans ce paragraphe, nous allons analyser l'influence des différents paramètres sur la tenue en tension de la technique des anneaux polarisés. Nous en déduirons des règles de conception pour un calibre en tension de 850 V, le dopage des plaquettes est de $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (disponibles pour vérifications expérimentales par la suite). La profondeur de jonction choisie est de $13 \mu\text{m}$ ce qui correspond aux processus standards utilisés (la tenue en tension cylindrique est de 420 V). Nous devons étudier particulièrement :

- la distance anode-anneau et anneau-anneau : ce paramètre est de première importance, car l'efficacité de la technique passe par un recouvrement correct des extensions de charges d'espace entre les différentes jonctions polarisées en inverse,
- l'épaisseur de l'épitaxie qui détermine également la gamme de tension,
- la mise en court-circuit possible de deux régions d'anneau par le phénomène de perçage,
- l'influence des charges d'interface,
- le comportement dynamique.

3-1 : Influence de la distance constante entre les anneaux

En supposant que le claquage ait lieu près de la jonction principale, nous pouvons, en première analyse, étudier la tenue en tension de notre structure en ne tenant compte que de la présence du premier anneau. Cela implique, au niveau des outils numériques employés, que le champ électrique est nul à droite de la structure (milieu du premier anneau) pour des raisons de symétrie. La tenue en tension d'une structure avec un anneau sera identique à la tenue en tension d'une structure avec quatre anneaux. Le phénomène de perçage ne sera pas, lui, le même dans les deux cas. Ce premier anneau est relié à la haute tension V_a soit par une résistance (voir Figure 1) dont la valeur donne un potentiel de contact sur l'anneau de $V_a/5$ (cas d'une structure avec 4 anneaux) dans ATLAS, soit directement par une condition aux limites imposant ce même potentiel (cas de Power2D). Nous utilisons des outils de simulations numériques bidimensionnelles qui peuvent résoudre soit l'équation de poisson seule (Power2D, ATLAS), les courants étant négligés, soit les trois équations fondamentales des semiconducteurs (potentiel et courants) (Atlas).

Chapitre 2 : Etude numérique de la tenue en tension de la technique des anneaux polarisés

La figure 4 représente les variations de la tension de claquage en fonction de la distance entre l'anode et l'anneau sur une structure avec un seul anneau dont les paramètres sont :

- dopage du substrat : $N=2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$,
- épaisseur d'épitaxie: $W_{\text{epi}}=100 \text{ }\mu\text{m}$, l'extension de la zone de charge d'espace maximale à 1064V est de $83 \text{ }\mu\text{m}$ pour ce dopage, donc inférieure à l'épaisseur d'épitaxie. Nous sommes alors en non-limitation de charge d'espace,
- dopage de la spirale $P = 2.10^{18} \text{ cm}^{-3}$,
- largeur d'anneau = $32 \text{ }\mu\text{m}$,
- profondeur de jonction = $13 \text{ }\mu\text{m}$.

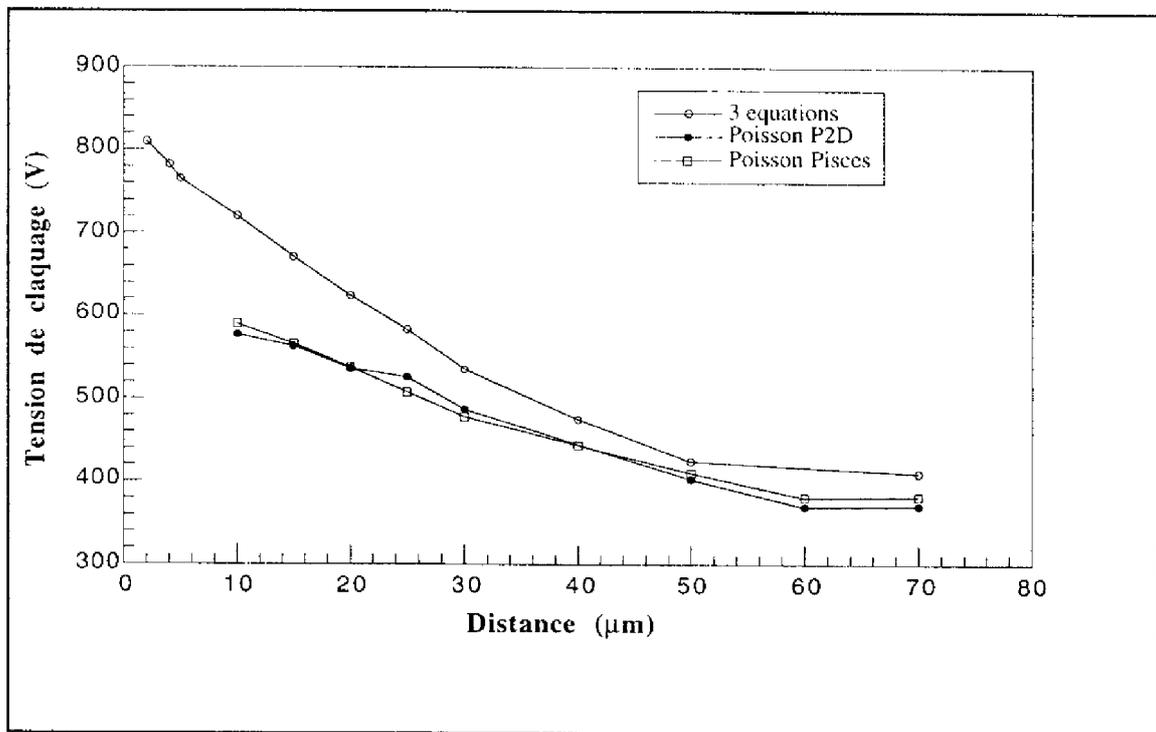


Figure 4 : Tenue en tension en fonction de la distance anode-anneau.

Nous constatons que la tension de claquage augmente lorsque la distance entre l'anode et l'anneau diminue. Lorsque la distance entre l'anode et l'anneau est supérieure à $60 \text{ }\mu\text{m}$, on retrouve la tension de claquage de la jonction cylindrique, soit 380 V . En effet, pour cette valeur de polarisation, l'extension de charge d'espace de la jonction cylindrique est de $43 \text{ }\mu\text{m}$. L'anneau doit donc être situé à une distance inférieure à la somme des deux extensions maximales des charges d'espace (jonction cylindrique et premier anneau). Nous constatons que nous avons un bon accord entre les deux simulateurs (Figure 4) et que l'on a un écart de 10%

Chapitre 2 : Etude numérique de la tenue en tension de la technique des anneaux polarisés

lorsque l'on résout les trois équations où seulement l'équation de Poisson. On peut expliquer ceci par le fait que lors de la résolution de l'équation de Poisson le courant est considéré nul.

La tenue en tension de la jonction plane infinie étant de 860 V, nous avons une efficacité (c'est-à-dire le rapport tension calculée/tension idéale plane), de l'ordre de 90 % lorsque la distance entre l'anode et l'anneau est inférieure à 10 μm .

3-2 : Etude de l'influence de l'épaisseur de l'épitaxie

Nous allons, dans ce paragraphe, étudier l'influence de l'épaisseur de l'épitaxie. Jusqu'ici les charges d'espace verticales pouvaient se déployer sans limitation jusqu'à atteindre leur valeur maximale au claquage par avalanche. Ici, la charge d'espace de la région N sera bloquée par une région fortement dopée avant d'atteindre le claquage par avalanche. Notre dispositif fonctionnera en limitation de charge d'espace.

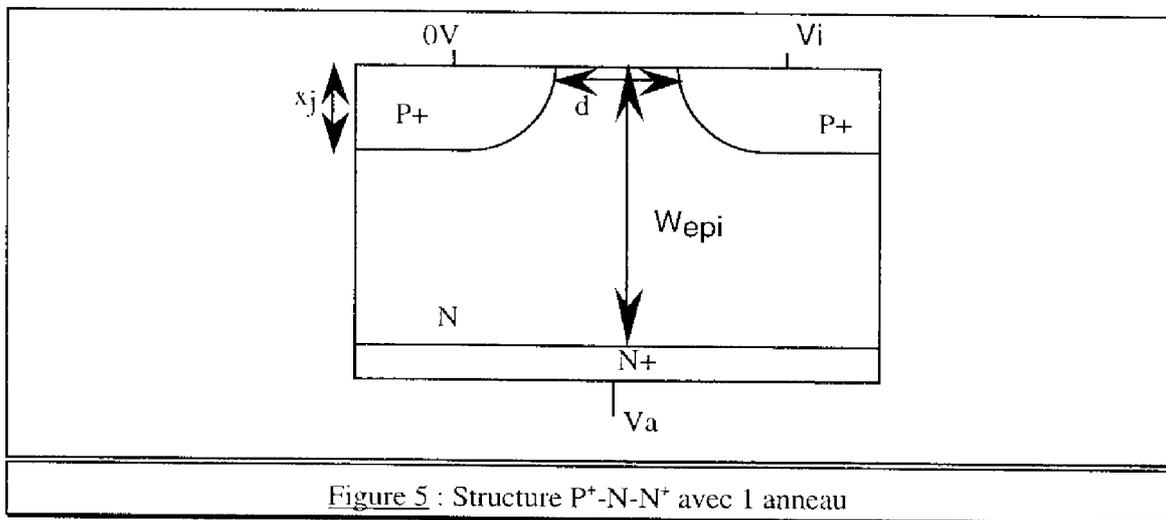


Figure 5 : Structure P⁺-N-N⁺ avec 1 anneau

La structure simulée est représentée Figure 5. Le dopage de la couche N est constant et est fixé à $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$; la couche N⁺ est définie en gaussienne dont la concentration en surface $C_s = 1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. L'anode et les anneaux sont réalisés avec des diffusions de type gaussienne avec une concentration en surface de $C_s = 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. On fixe une profondeur de jonction de 13 μm .

Nous avons reporté sur la figure 6, les variations de l'efficacité de la technique en fonction de l'épaisseur d'épitaxie W_{epi} . Nous notons un accroissement de l'efficacité de la technique lorsque l'épaisseur d'épitaxie varie de 53 μm à 93 μm (nous sommes en limitation de charge d'espace). En effet, l'extension maximale de charge d'espace de la jonction plane est de 83 μm . Au delà de cette valeur, nous constatons que l'épaisseur d'épitaxie n'a plus d'influence sur la tenue en tension. Nous sommes donc en non-limitation de charge d'espace et W_{epi} ne joue alors aucun rôle.

Nous remarquons que pour une structure en forte limitation de charge d'espace (c'est-à-dire pour W_{epi} faible), nous obtenons une efficacité supérieure à 90%. L'efficacité de cette

technique (rapport tension calculée de la jonction cylindrique avec terminaison/tension idéale plane) est meilleure lorsque l'on est en limitation de charge d'espace.

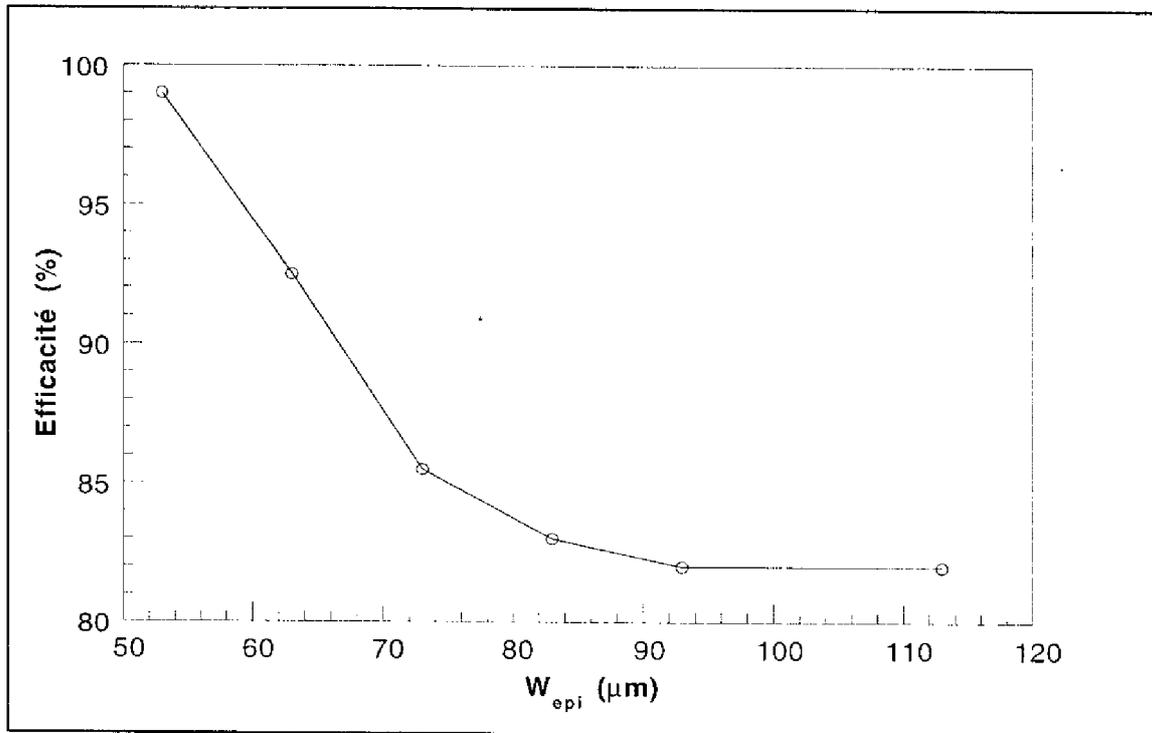


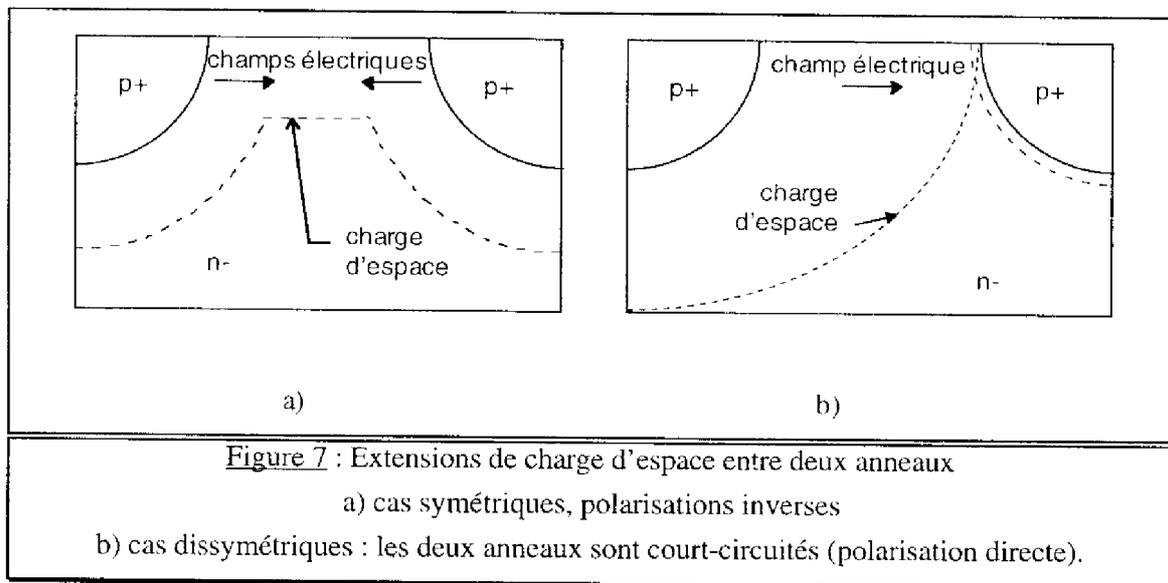
Figure 6 : Influence de W_{epi} sur l'efficacité de la technique.

Nous avons pu vérifier que l'épaisseur d'épithaxie a peu d'influence sur la tenue en tension de la jonction cylindrique : le champ électrique horizontal n'est pratiquement pas modifié. Une coupe verticale du champ électrique pour une même tension appliquée montre que celui-ci est plus intense sous la partie plane lorsque la jonction est en limitation de charge d'espace (la tenue en tension de la jonction plane sera moindre). L'épaisseur de l'épithaxie aura une influence sur la tension de claquage de la jonction plane et peu d'influence sur celle de la jonction cylindrique.

3-3 : Etude du passage en direct des anneaux

Nous savons que dans les anneaux flottants, la jonction anneau-substrat est pour une faible partie polarisée en direct et sur la majeure partie en inverse. Le point de polarisation en direct se situe du côté gauche de l'anneau : le champ électrique est nul.

Dans le cas des anneaux polarisés, les jonctions anneau-substrat sont normalement toujours polarisées en inverse : les charges d'espace des deux sections de spirale mitoyennes vont se rejoindre pour étaler le champ électrique sur une surface de silicium la plus grande possible. Le champ électrique est tel qu'il change de sens d'une charge d'espace à l'autre et interdit donc tout passage de porteurs d'un point de la spirale vers un autre (Figure 7.a) Cependant, si les extensions de charge d'espace sont fortement dissymétriques, l'une d'elles peut venir toucher l'anneau suivant et mettre en direct une partie de ce dernier (Figure 7.b).



Pour étudier ce passage en direct, il est nécessaire de simuler la structure complète, c'est à dire en tenant compte du fait que les anneaux sont en fait des sections de spirales et que leur polarisation n'est pas imposée par un contact ohmique sur chaque section, mais bien par le passage du courant de fuite dans la spirale. Il est alors nécessaire de simuler une structure telle que représentée sur la figure 8. La résistance de la spirale est représentée par des résistances extérieures.

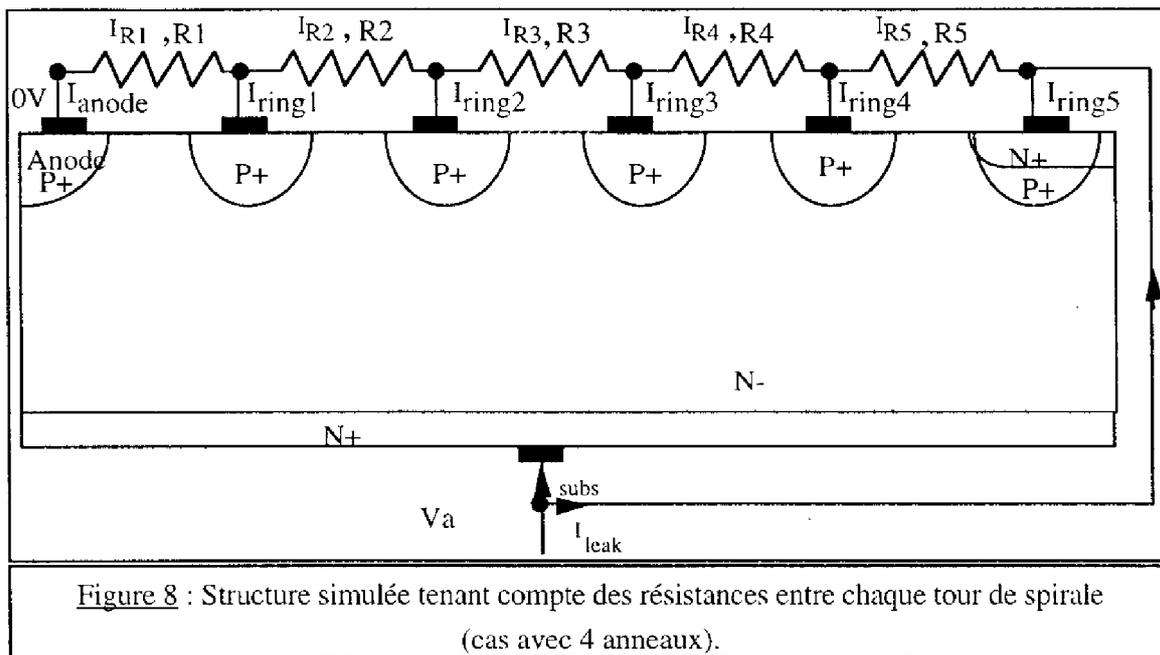


Figure 8 : Structure simulée tenant compte des résistances entre chaque tour de spirale (cas avec 4 anneaux).

Ces simulations permettent de prendre en compte la conduction dans la spirale elle-même ; cette dernière qui détermine le potentiel des anneaux. Nous choisirons une résistance totale de l'anneau de $1\text{ M}\Omega$ permettant de limiter le courant de fuite à 1 mA pour une tension inverse de 1000 V . Les résistances $R1$ à $R5$ ont donc chacune des valeurs de $200\text{ K}\Omega$.

Pour simuler la structure de la figure 8, il est non seulement nécessaire de résoudre les équations du semiconducteur, ainsi que nous l'avons fait avec le module PISCES lors des précédents paragraphes, mais aussi de pouvoir introduire un circuit extérieur constitué ici de simples résistances. Ceci est réalisé par le module MIXEDMODE qui est en fait un logiciel de résolution de circuit, proche de SPICE, qui permet de connecter aux nœuds du circuit les électrodes d'un dispositif dont les caractéristiques électriques sont calculées par PISCES.

La figure 9 représente les variations des courants en fonction de la tension de substrat appliquée pour deux distances entre les différents tours de la spirale. $I[an_ringi]$ représente le courant circulant dans l'anneau i , $I[ri]$ celui dans la résistance i . Dans le cas d'un espacement de $30\text{ }\mu\text{m}$, le courant est identique dans toutes les branches du circuit (Figure 9a) et croît linéairement avec la tension appliquée suivant la loi d'Ohm. Ceci indique que le seul courant notable est bien celui de la spirale elle-même et qu'il n'y a pas de problème important de courant de fuite ou de mise en direct de jonction dans le cas d'un espacement de $30\text{ }\mu\text{m}$.

Pour une distance entre les anneaux de $10\text{ }\mu\text{m}$, les courants dans l'anode et dans les anneaux sont nuls jusqu'à 120 V , tandis que les courants dans les différentes résistances sont égaux, comme dans le cas précédent. Cependant, au delà de 120 V , un courant circule depuis le quatrième anneau ($I[an_ring4]$ sur la figure 9b) vers le "stop channel" ($I[an_ring5]$), et donc dans le silicium lui-même. C'est le passage en direct, dans ce cas, du dernier anneau (ring4)

Chapitre 2 : Etude numérique de la tenue en tension de la technique des anneaux polarisés

vers le "stop channel" (ring5). Si l'on continue à monter la tension de substrat, vers 240 V un courant passe dans le troisième anneau tandis que le courant dans le quatrième anneau sature.

Ce phénomène se produit en premier entre les anneaux les plus éloignés de la jonction principale et est dû à la faible modulation du champ électrique vertical dans cette zone. En effet, la composante verticale non nulle du champ électrique est négative et décroît le long de la structure. L'équation de Poisson peut s'écrire, à la surface, à l'aide de la notion de dopage effectif N_{eff} :

$$\frac{dE_x}{dx} = \frac{q}{\epsilon} N_{eff} \quad (2.1)$$

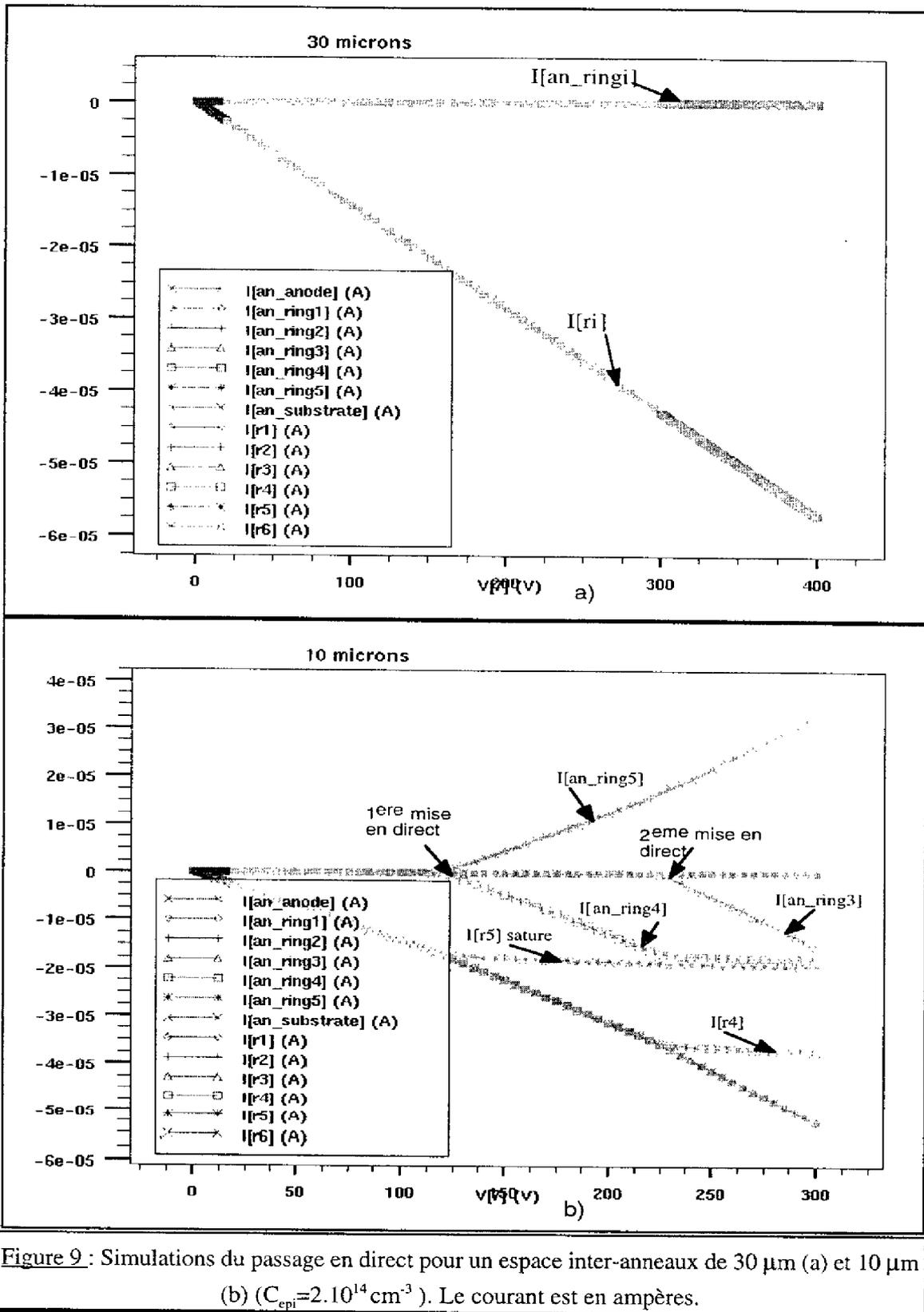
$$N_{eff} = N_{sub} - \frac{dE_y}{dy} \cdot \frac{\epsilon}{q} \quad (2.2)$$

Où E_x et E_y sont respectivement le champ électrique latéral et vertical. Le champ électrique vertical sera important dans la zone près de l'anode et faible dans la région près du stop-channel. Le champ électrique au bout de la structure (près du stop-channel) sera essentiellement latéral.

Dopage	$2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	$7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
$d = 10 \mu\text{m}$	120 V	45 V
$d = 20 \mu\text{m}$	490 V	200 V
$d = 30 \mu\text{m}$	non	435 V
<u>Tableau 1</u> : Etude du passage en direct pour différents dopages.		

Le tableau 1 présente le passage en direct pour deux valeurs de dopages différents. Evidemment, lorsque le dopage diminue, la valeur de la tension de passage en direct diminue aussi puisque les charges d'espace sont plus grandes.

Bien que n'étant pas immédiatement destructeur, ce passage en direct augmente très fortement les courants dans le substrat de notre dispositif et perturbe les polarisations des anneaux. Puisque nous avons vu que ce phénomène se produit en premier lieu dans les anneaux externes, une solution simple est d'augmenter la distance inter-anneaux au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'anode. Il faut donc une très faible séparation anode-anneau que nous avons évaluée à moins de $10 \mu\text{m}$ pour nos dopages, et augmenter la distance entre les tours pour les anneaux suivants : à $30 \mu\text{m}$, le passage en direct ne se produit plus.



Nous pouvons modéliser le passage en direct par le schéma de la figure 10 :

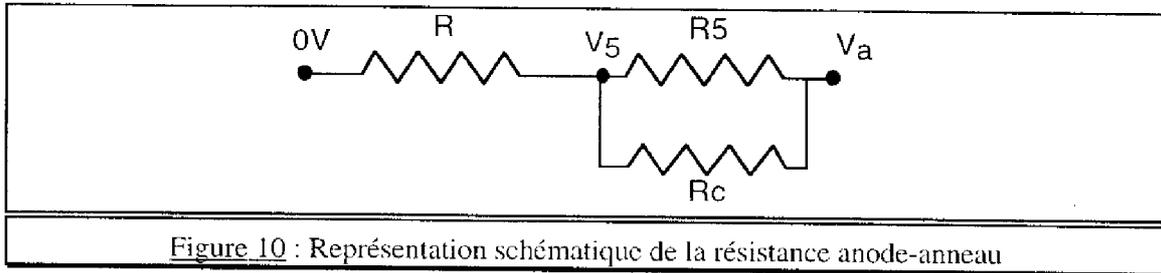


Figure 10 : Représentation schématique de la résistance anode-anneau

où R_c représente la résistance de conduction du quatrième anneau et $R=R_1+R_2+R_3+R_4$

Avant le point de passage en direct du bord de l'anneau, R_c est infinie et le potentiel de l'anneau est :

$$V_5 = \frac{R}{R + R_5} V_a \quad (2.3)$$

Après ce point $R_c \ll R_5$ donc :

$$V_5 = \frac{R}{R + R_c} V_a \quad (2.4)$$

3-4 : Etude d'un modèle analytique de la mise en direct

Nous voulons dans ce paragraphe, donner un modèle analytique de 1^{er} ordre permettant de prévoir la mise en direct de deux anneaux polarisés. On pourra ainsi calculer sans avoir recours aux simulations numériques la distance minimale à respecter entre deux anneaux pour éviter ce phénomène.

Considérons une jonction abrupte dissymétrique infinie P⁺N, la concentration de la région peu dopée n est N et la profondeur de jonction x_j . Polarisons en inverse cette jonction, une extension de charge d'espace W_c va se développer dans la région n. Nous pouvons écrire l'équation de Poisson en coordonnées cylindriques [3] :

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dV}{dr} \right) = -\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rE) = -\frac{qN}{\epsilon} \quad (2-5)$$

Intégrons cette équation :

$$\int_x^{x_j+W_c} d(rE) = \int_x^{x_j+W_c} \frac{qN}{\epsilon} r dr \quad (2-6)$$

La résolution de cette équation nous permet d'obtenir le champ électrique :

$$E_c(x) = \frac{qN}{2\epsilon} \left(\frac{(x_j + W_c)^2 - x^2}{x} \right) \quad (2-7)$$

Une seconde intégration de l'équation précédente par rapport à x nous donnera le potentiel dans la région N :

$$V(x) = \int_{x_1}^x E(x) dx = \frac{qN}{2\epsilon} \left(\frac{x_j^2 - x^2}{2} + (x_j + W_c)^2 \ln\left(\frac{x}{x_j}\right) \right) \quad (2-8)$$

L'évolution de la charge d'espace en fonction de la tension de claquage de la diode, des dopages et de la profondeur de jonction est donc :

$$V_c(x_1 + W_c) = \frac{qN}{2\epsilon} \left(\frac{x_j^2 - (x_1 + W_c)^2}{2} + (x_1 + W_c)^2 \ln\left(\frac{x_1 + W_c}{x_j}\right) \right) = V_a \quad (2-9)$$

Dans le cas des anneaux polarisés, chaque jonction est, dès le départ, polarisée en inverse. Considérons une zone entre deux anneaux consécutifs (Figure 11).

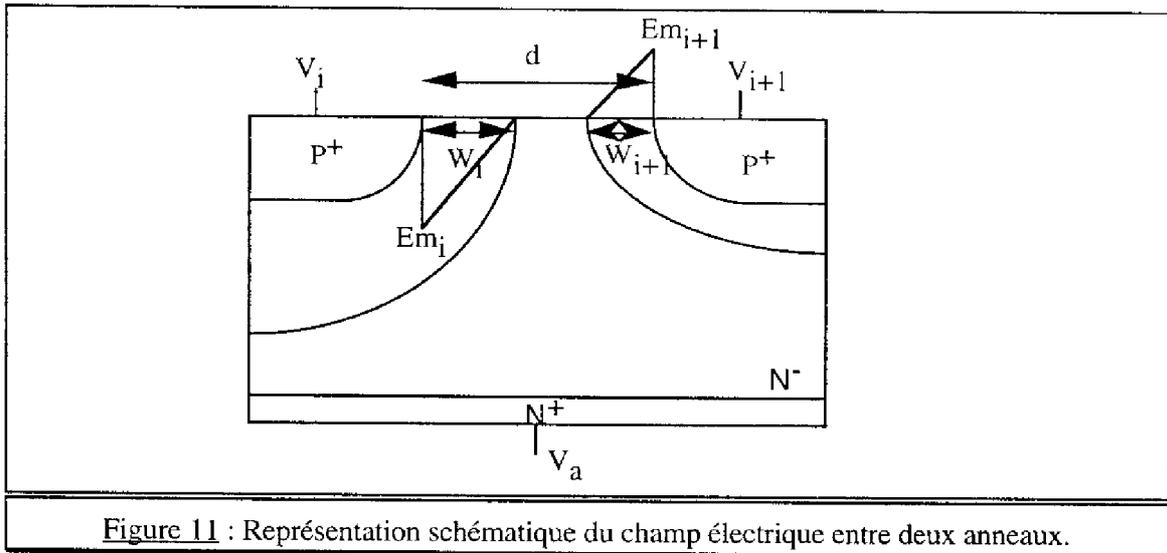


Figure 11 : Représentation schématique du champ électrique entre deux anneaux.

La tension de l'anneau i est donnée par la relation suivante :

$$V_i = \frac{i}{n} V_a \quad (2-10)$$

où n est le nombre total d'anneaux, i l'indice de l'anneau, V_a la tension appliquée sur le substrat.

La jonction i supportera la tension :

$$V_a - V_i = \left(\frac{n-i}{n} \right) V_a \quad (2-11)$$

tandis que la jonction $i+1$ supportera la tension :

$$V_a - V_{i+1} = \left(\frac{n-i-1}{n} \right) V_a \quad (2-12)$$

Il est bien évident que : $V_a - V_i > V_a - V_{i+1}$, et donc que l'anneau i soutient plus de tension, par rapport au substrat, que l'anneau $i+1$.

Ce qui entraîne : $W_i > W_{i+1}$

La charge d'espace est plus développée du côté droit de l'anneau i que du côté gauche de l'anneau $i+1$. Les charges d'espace vont se rencontrer en un point qui se situera plus proche de l'anneau $i+1$ que de l'anneau i .

Nous considérerons par la suite une terminaison constituée de quatre anneaux et un stop-channel. La méthodologie de calcul sera cependant très facilement extrapolable à d'autres configurations.

Nous allons calculer la tension pour laquelle le quatrième anneau passe en direct avec le stop-channel. Il est polarisé à une valeur fixe $V_p = 0.8V_a$, V_a étant la tension du substrat.

Le passage en direct de ce dernier anneau correspond au fait que la charge d'espace qu'il déploie va atteindre le stop-channel, et donc qu'elle est au moins égale à la distance anneau-stop-channel : d . Puisque le passage en direct se produit en premier lieu en surface, nous considérons pour la suite que la répartition de potentiel dans la région anneau/substrat correspond à $V_p + V(x)$, $V(x)$ étant donné par la relation 2-8. La jonction métallurgique est située à une distance x_j du point d'origine de cette relation.

La charge d'espace égale à d correspond maintenant à :

$$V_p + V(x_j + d) = V_a \quad (2-13)$$

$$\text{soit : } V(x_j + d) = 0,2V_a \quad (2-14)$$

et pour une structure à n anneaux : $V(x_j + d) = \frac{V_a}{n}$

De l'équation (2-13) on déterminera la tension pour laquelle l'anneau se polarise en direct.

Exemple:

Considérons une structure dans les conditions suivantes :

$$N = 7.10^{13} \text{ cm}^{-3},$$

$$W_c = 250 \text{ } \mu\text{m},$$

$$x_j = 11,5 \text{ } \mu\text{m},$$

$$d = 10 \text{ } \mu\text{m}, 15 \text{ } \mu\text{m}, 20 \text{ } \mu\text{m}, 30 \text{ } \mu\text{m}, 50 \mu\text{m}.$$

L'utilisation de la relation 2-14 permet de déduire la tension V_a pour laquelle le quatrième anneau se polarise en direct. On comparera dans le tableau 2, les résultats issus de simulations PISCES ainsi que les résultats expérimentaux (voir chapitre 3).

Distance en microns	Calcul Analytique	Simulation	Mesure
10	36 V	45 V	35-40 V
15	84 V	80 V	80-90 V
20	155 V	200 V	140-200 V
30	380 V	435 V	300-400 V

Tableau 2 : Etude du passage en direct en fonction de la distance inter anneaux.

Ce modèle analytique est valable pour l'extrémité de la structure (les deux derniers tours de spirale) car le champ électrique dans cette région est principalement horizontal. Dans le reste de la structure, ce modèle analytique n'est pas valable car il faut tenir compte des effets 2D du champ électrique. En effet le champ électrique vertical n'est pas nul dans la partie gauche de la structure (cf. § 3-3)

3-5 : Influence de la distance variable entre les anneaux

Nous avons étudié au § 3-1 l'influence d'une distance inter-anneaux constante sur la tenue en tension. Nous avons conclu que la technique est plus efficace si la distance entre les anneaux est faible. D'autre part, au § 3-3, nous avons étudié le phénomène de perçage (passage en direct) entre les anneaux. Ce phénomène se produit en premier lieu dans les anneaux externes si la distance entre les anneaux est faible, dans notre cas inférieure à 30 μm .

Une solution est donc de réaliser une structure à distance variable. La distance entre l'anode et le premier tour de spirale sera très faible (pour un dopage d'épitaxie $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, elle sera inférieure à 10 μm) puis, cette distance augmentera au fur et à mesure que l'on se rapproche du stop-channel. La dernière distance devra être suffisamment grande de manière à ce que le passage en direct ne se produise plus.

Le tableau 3 présente quelques exemples de structures simulées (à distance constante ou variable) toujours pour un dopage d'épitaxie de $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ et une profondeur de jonction de 13 μm . Nous avons reporté pour chaque structure la tenue en tension correspondante ainsi que l'éventuel passage en direct entre les anneaux externes.

Nous remarquons que sur une structure de 4 anneaux à distance constante (structure 1), nous obtenons un rendement de 63% (rapport de la tension obtenue par rapport à la tenue en tension plane idéale), mais un passage en direct se produit dans la structure. Par contre dans le cas d'une structure à distance croissante (structure 2), la tenue en tension augmente (rendement de 72%) et l'on n'observe plus le phénomène de perçage. Lorsque l'on augmente les distances inter-anneaux (structure 3), la tenue en tension augmente. Ceci est dû au fait que la chute de tension est plus faible près de l'anode par rapport à la structure précédente. Lorsqu'on augmente le nombre de tours de la spirale (structure 4), la tenue en tension augmente (chute de tension

plus faible près de la jonction principale). Lorsque la distance entre la jonction principale et le premier anneau diminue (structure 5, 6), la tenue en tension augmente.

	d1	d2	d3	d4	d5	d6	BV(V)	Efficacité	Passage en direct
structure 1	10	10	10	10	10		538	63%	oui
structure 2	10	15	20	25	30		615	72%	non
structure 3	10	16	22	28	34		627	74%	non
structure 4	10	15	20	25	30	35	660	78%	non
structure 5	8	14	20	26	32	36	690	82%	non
structure 6	5	10	15	20	25	30	760	90%	non

Tableau 3 : Simulation de la tenue en tension de structures à distances constantes et variables (dopage $2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$).

Un certain nombre de simulations ont été réalisées sur des substrats plus faiblement dopés permettant d'obtenir des tenues en tension plus élevées. Par exemple, une structure dopée à $2.10^{13} \text{ cm}^{-3}$ comportant 8 tours de spirale dont la distance entre les anneaux varie de $3 \mu\text{m}$ à $80 \mu\text{m}$ permet d'obtenir une tenue en tension de l'ordre de 3700 V (la tenue en tension de la jonction plane étant de 4230 V) sans observer de passage en direct.

3-6 : Etude de l'influence des charges d'interface

Nous avons vu au chapitre 1, que la présence de charges à l'interface SiO_2/Si pouvaient fortement perturber le fonctionnement de certaines techniques de garde. Qu'en est-il de la structure à anneaux polarisés ?

Nous ne considérerons ici que les charges fixes, Q_f , positives et localisées dans la zone de transition entre le silicium et la silice. Plusieurs auteurs [4], [5] ont montré que les charges résultantes étaient positives et étaient localisées près de l'interface silicium oxyde.

Donc : $Q_{ss}=Q_f$

Ces charges peuvent être déterminées à partir de la courbe capacité-tension (C-V) d'une capacité MOS (métal oxyde semi-conducteur). En effet, la tension de seuil V_T d'un transistor MOS est donnée par la relation suivante :

$$V_T = \phi_{ms} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} - 2U_T \ln \frac{N_D}{n_i} \quad (2.15)$$

où ϕ_{ms} est la différence des travaux de sortie métal-silicium, Q_{ss} la charge totale dans l'oxyde, C_{ox} la capacité dans l'oxyde, U_T la tension de diffusion, N_D le dopage du substrat et n_i la concentration intrinsèque.

Les charges provoquent un déplacement des caractéristiques électriques des dispositifs MOS (C(V)). La tension de seuil suit la loi de variation suivante :

$$\Delta V_T = \frac{-Q_{ss}}{C_{ox}} \quad (2-16)$$

La présence de charges d'interface, générées lors du processus technologique lui-même, ou bien par des radiations ionisantes lors du fonctionnement du dispositif, est un facteur important vis-à-vis de la tenue en tension (chapitre 1). Si l'on peut supposer que le contrôle de ces charges lors de la réalisation technologique est aujourd'hui maîtrisé, il n'en est pas de même pour celles générées par les radiations ionisantes, telle que l'on en rencontre dans les applications spatiales. Les doses mises en jeu par ces dernières sont, en effet, comparables à celles d'un "mauvais" processus technologique, à savoir de l'ordre de 10^{11} à 10^{12} charges par cm^2 [6], bien que le débit soit faible.

Les variations de la tension de claquage en fonction des charges positives dans l'oxyde sont représentées sur la figure 12 pour la technique des anneaux polarisés [7]. On remarque que la tension de claquage ne varie pratiquement pas lorsque la densité des charges dans l'oxyde est comprise entre $10^{10} cm^{-2}$ et $10^{11} cm^{-2}$. Au-delà, la tension de claquage **augmente**, jusqu'à 50% pour des densités de charges comprises entre 10^{11} et $10^{12} cm^{-2}$.

En effet, dans le cas des anneaux polarisés, ces charges positives dans l'oxyde vont induire des charges négatives dans le semiconducteur qui s'ajoutent à la concentration effective du substrat de type n. La présence de ces charges en surface a une grande influence sur l'extension de la zone de déplétion.

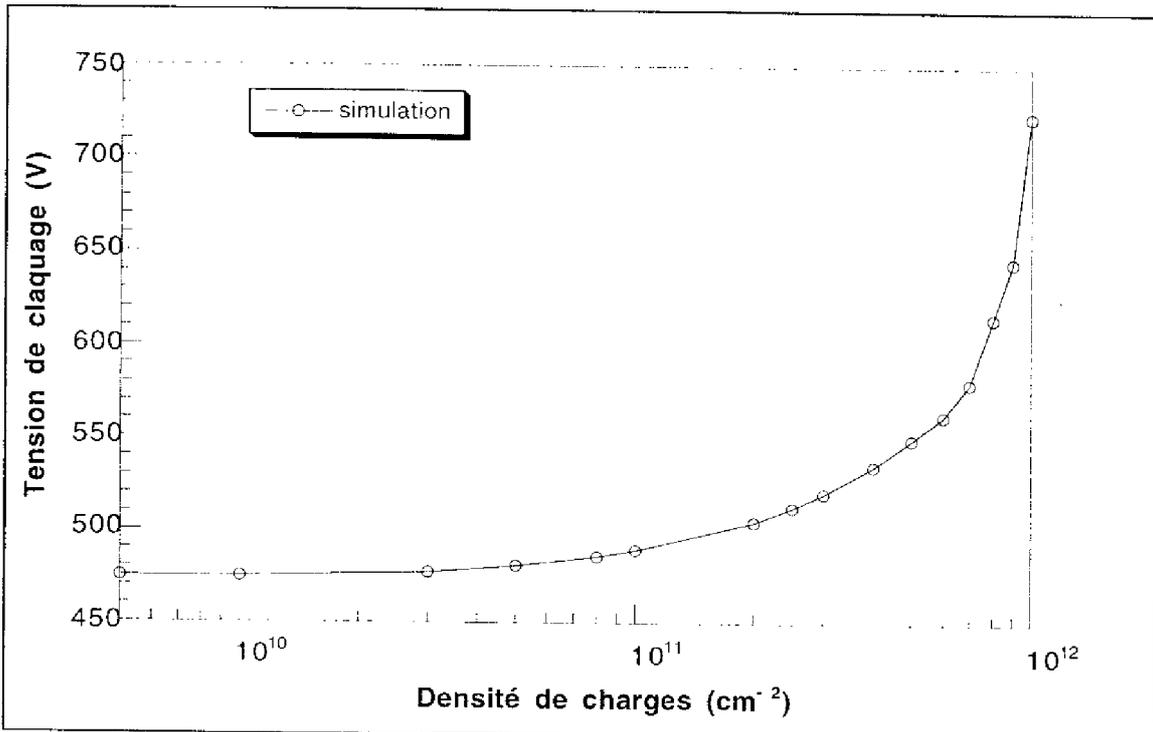


Figure 12: Influence des charges d'oxyde dans une structure à anneaux polarisés.

La figure 13 représente une coupe de la distribution du champ électrique à la surface avec et sans charges pour une même polarisation de 450 V.

Lors de la présence de charges à l'interface, les pics de champ localisés aux bords des jonctions P⁺N décroissent considérablement : de 220 à 110 KV/cm pour la jonction principale (Figure 13). Cette diminution est compensée par un accroissement du champ électrique dans la région entre les anneaux.

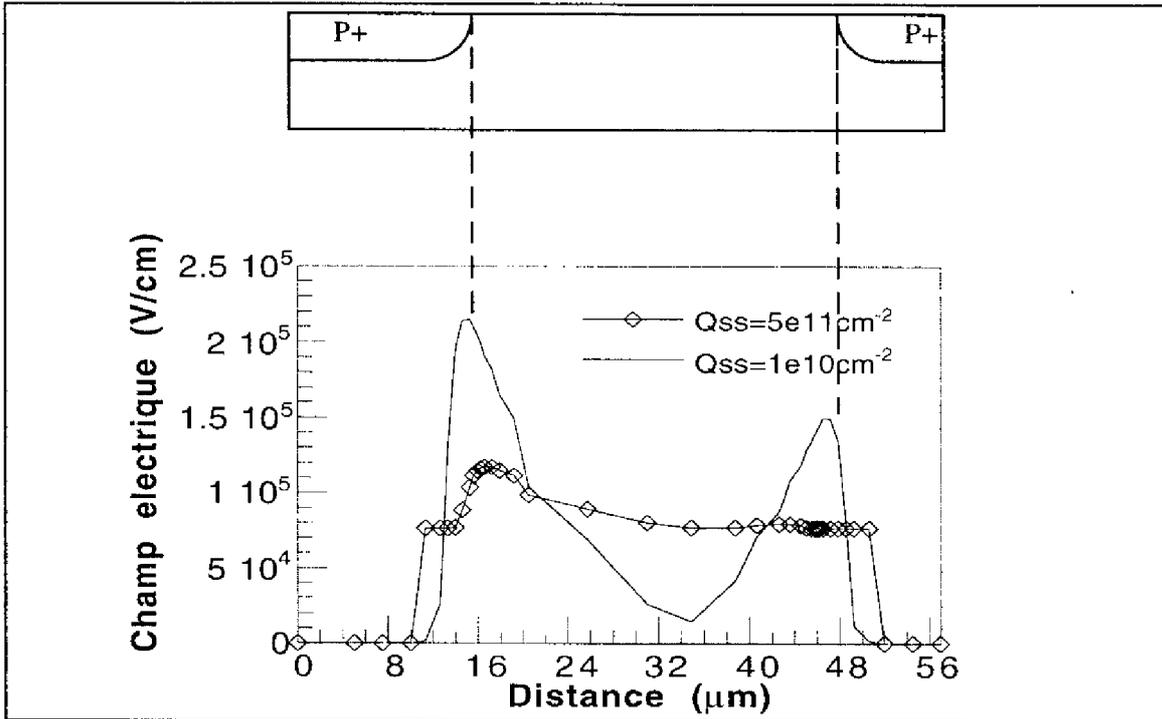


Figure 13 : Coupe de champ électrique en surface en fonction des charges d'oxyde.

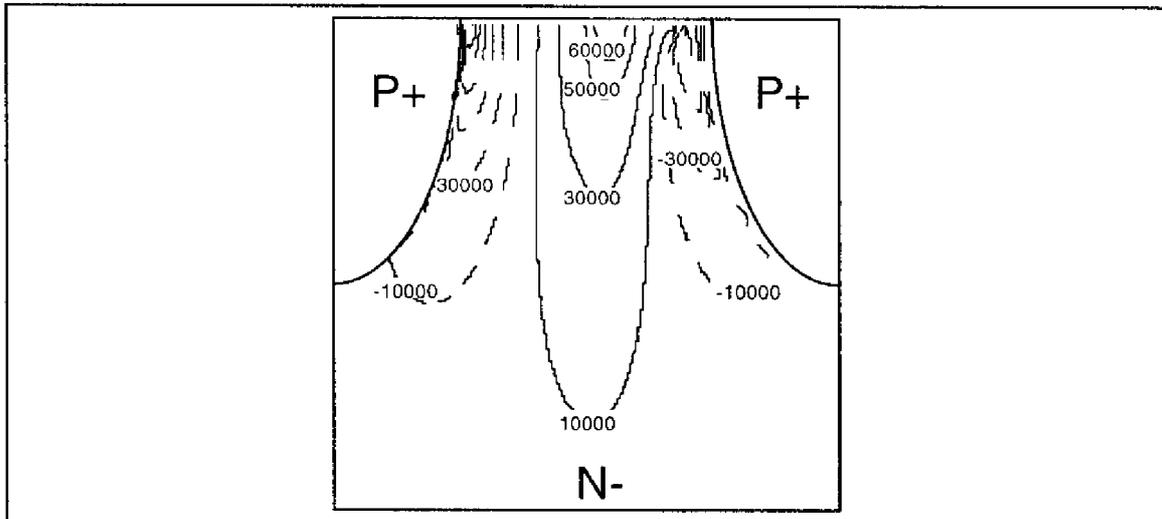


Figure 14 : Différence des champs électriques avec et sans charge d'oxyde.

Ce comportement s'observe également en profondeur dans la structure, jusqu'à la profondeur de jonction. La figure 14 est une représentation 2D de la différence des champs électriques pour une structure avec des charges d'oxyde ($5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) et sans charge dans l'oxyde. La différence des champs électriques est positive entre les anneaux (jusqu'à 60 KV/cm) tandis qu'elle est négative près des courbures de jonctions. Le champ électrique augmente dans la région centrale et les pics de champ électrique au bord des jonctions diminuent. Cette

répartition de champ électrique est favorable pour la tenue en tension de la structure, contrairement aux autres techniques vues au chapitre 1.

3-7 : Etude dynamique

Nous voulons ici évaluer le comportement électrique de notre terminaison de jonction lorsque le dispositif à protéger, diode, transistor ou autre, est soumis à des variations de tension très rapides. En effet, nous avons vu que l'efficacité de la technique des anneaux polarisés dépend étroitement de la capacité à établir des potentiels croissants linéairement par palier avec la distance. Cette propriété a été vérifiée en régime statique et nous voulons maintenant la tester en régime dynamique.

3-7-1 : Etude d'une jonction cylindrique en dV/dt

Lorsque l'on applique un dV/dt à une jonction [8], un courant transitoire capacitif est généré :

$$I_c = \frac{d(C_T V)}{dt} \quad (2-17)$$

qui va traverser la jonction faisant alors apparaître un excès de charges.

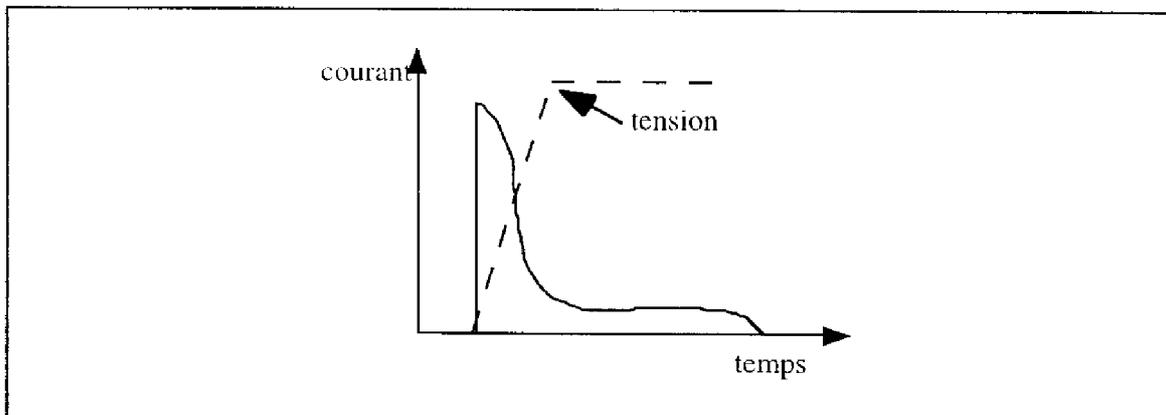


Figure 15 : Forme du courant d'une jonction pn sous un échelon de tension négative.

La valeur de la capacité de transition C_T est donnée, dans le cas d'une approximation d'une jonction abrupte (jonction P+N sans limitation de charge d'espace), par l'expression suivante :

$$C_T = S_c \frac{\epsilon_s}{\omega_T} \frac{1}{\left(1 - \frac{U}{\Phi}\right)^m} \quad (2-18)$$

Chapitre 2 : Etude numérique de la tenue en tension de la technique des anneaux polarisés

où S_C représente la surface, ϵ_s la permittivité du silicium, ω_T l'extension de charge d'espace de la jonction cylindrique à la tension $U=0$, Φ le potentiel interne de diffusion, U la tension appliquée et m le facteur de gradualité.

La combinaison de ces deux équations (2-17 et 2-18) permet de prévoir une forme d'onde courant/temps telle que donnée sur la figure 15.

3-7-2 : Etude d'une structure à anneaux polarisés

Les résultats présentés ci-dessous correspondent à des simulations réalisées par ATLAS. Si nous appliquons une rampe de tension de $200 \text{ V}/\mu\text{s}$ (Figure 16b) à une structure à anneaux polarisés, le courant total dans la structure est tel que représenté sur la figure 16a. Notons que le courant dans les simulations MIXEDMODE est multiplié par la largeur de la structure (troisième dimension) qui, dans notre cas, est de $600 \mu\text{m}$.

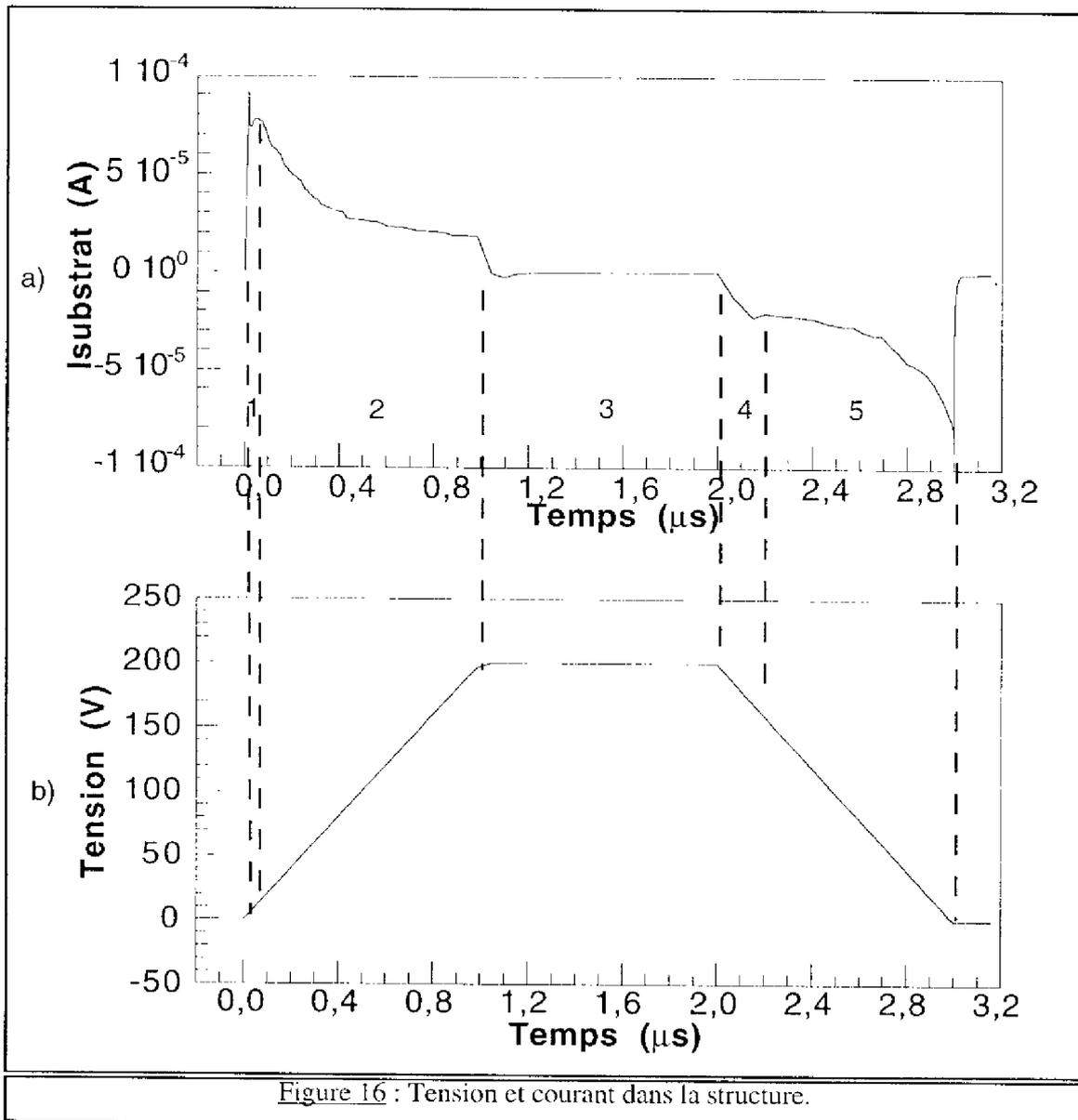


Figure 16 : Tension et courant dans la structure.

On peut diviser l'onde de courant en cinq parties :

- région 1 : la zone de déplétion s'étend et un déplacement de courant de type capacitif circule dans la structure. Ceci est la forme du courant attendu dans une diode pour laquelle on applique une rampe de tension (Figure 15).
- région 2 : à partir de $0.025 \mu\text{s}$, une hausse de courant apparaît qui correspond au moment où les charges d'espace de la jonction principale et du premier anneau se rejoignent entraînant une augmentation de la capacité du système.
- région 3 : lorsque la tension de substrat atteint une valeur constante, la jonction principale est polarisée en inverse. Le courant diminue et il ne reste plus que le courant de fuite de la jonction polarisée en inverse.

- région 4 : la tension de substrat diminue, le courant diminue linéairement.
- région 5 : les deux charges d'espace ne sont plus en contact, le courant diminue alors plus rapidement.

3-7-3 : Variation de la tension de claquage en fonction du dV/dt

Les variations de la tension de claquage en fonction du dV/dt sont représentées sur la figure 17. Cette tension est quasiment constante pour une variation du dV/dt de $100 \text{ V}/\mu\text{s}$ à $2000 \text{ V}/\mu\text{s}$ et correspond à la tenue en tension statique de la structure. La variation ΔBV est de 20% pour des valeurs de dV/dt comprises entre $2000 \text{ V}/\mu\text{s}$ et $10000 \text{ V}/\mu\text{s}$, et de 10 % de $10000 \text{ V}/\mu\text{s}$ et $100000 \text{ V}/\mu\text{s}$.

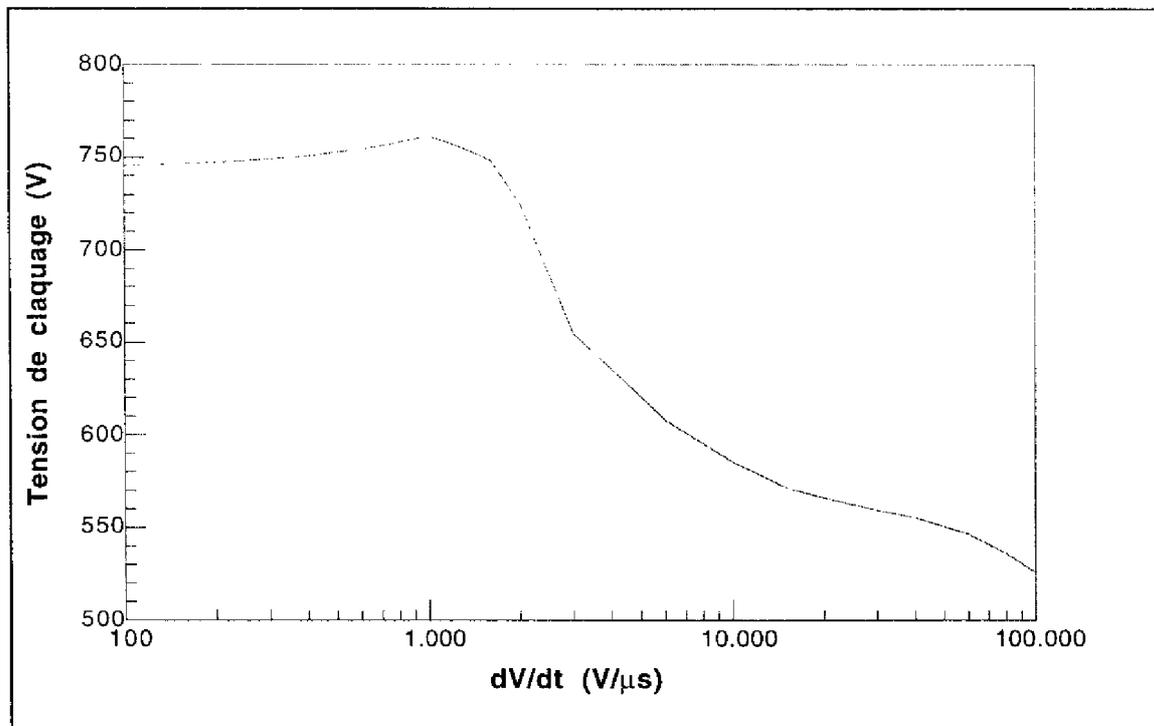
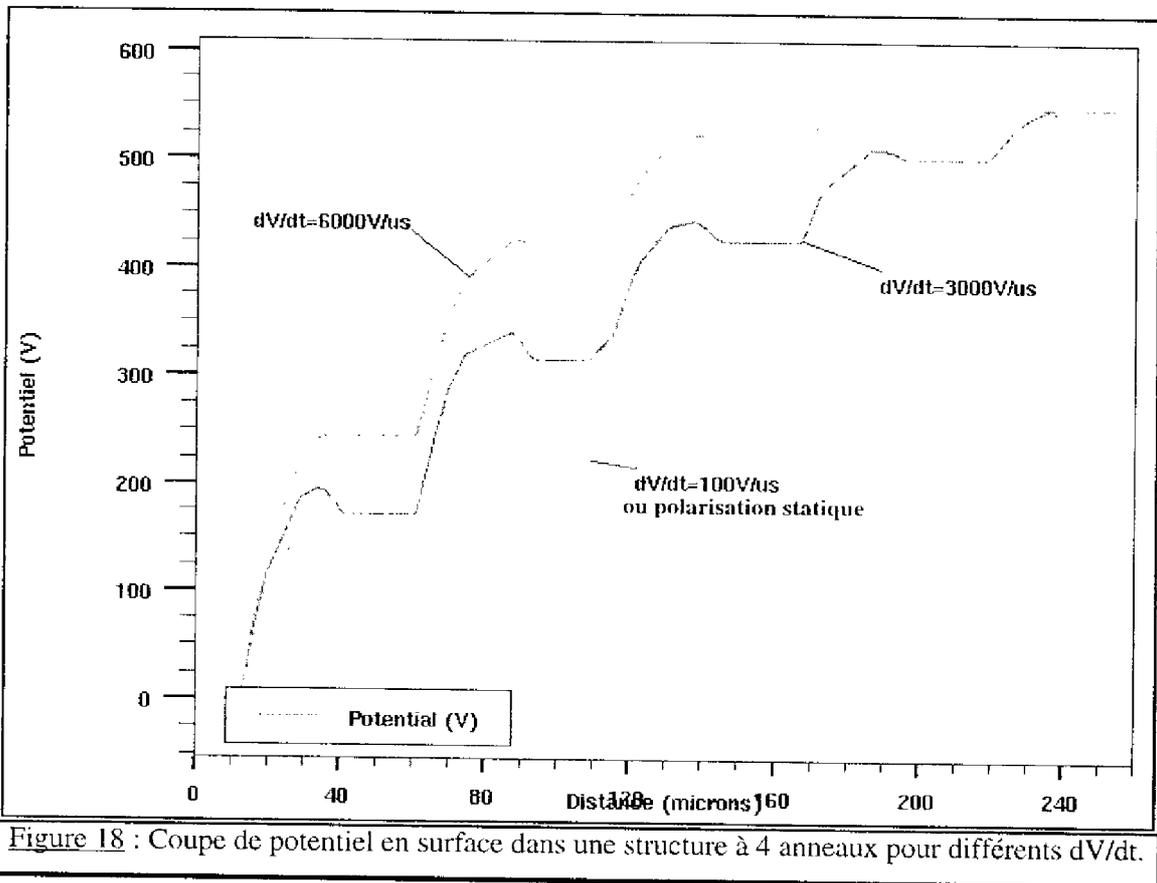


Figure 17 : Variation de BV en fonction de dV/dt .

Pour expliquer cette chute de la tenue en tension, considérons la figure 18, qui représente une coupe de potentiel en surface pour différentes valeurs de dV/dt lorsque la tension de substrat a atteint 550 V . Pour des dV/dt de $100 \text{ V}/\mu\text{s}$, chaque anneau est polarisé comme en statique et répartit le potentiel linéairement par palier : $V_{\text{ring}} = \frac{i}{n} V_a$

Lorsque $dV/dt > 2000 \text{ V}/\mu\text{s}$ les anneaux ne se polarisent plus comme précédemment. Pour $3000 \text{ V}/\mu\text{sec}$, le potentiel n'est plus tout à fait linéaire et nous observons un tassement de la différence de potentiel lorsque l'on s'approche du plot de haute tension. Enfin, lorsque dV/dt

atteint $6000 \text{ V}/\mu\text{s}$, le quatrième anneau est polarisé à la même tension que le substrat. Le champ électrique sera très faible de part et d'autre de cette jonction. La majorité du champ électrique sera soutenue par les autres anneaux : la spirale n'a plus le temps de se polariser.



On constate que sur la figure 19, au bout d'un certain temps ($2 \mu\text{s}$), lorsque la tension appliquée à la structure est laissée constante (550 V), un état d'équilibre apparaît (phénomène de relaxation). Il y a linéarisation du potentiel à la surface comme en statique.

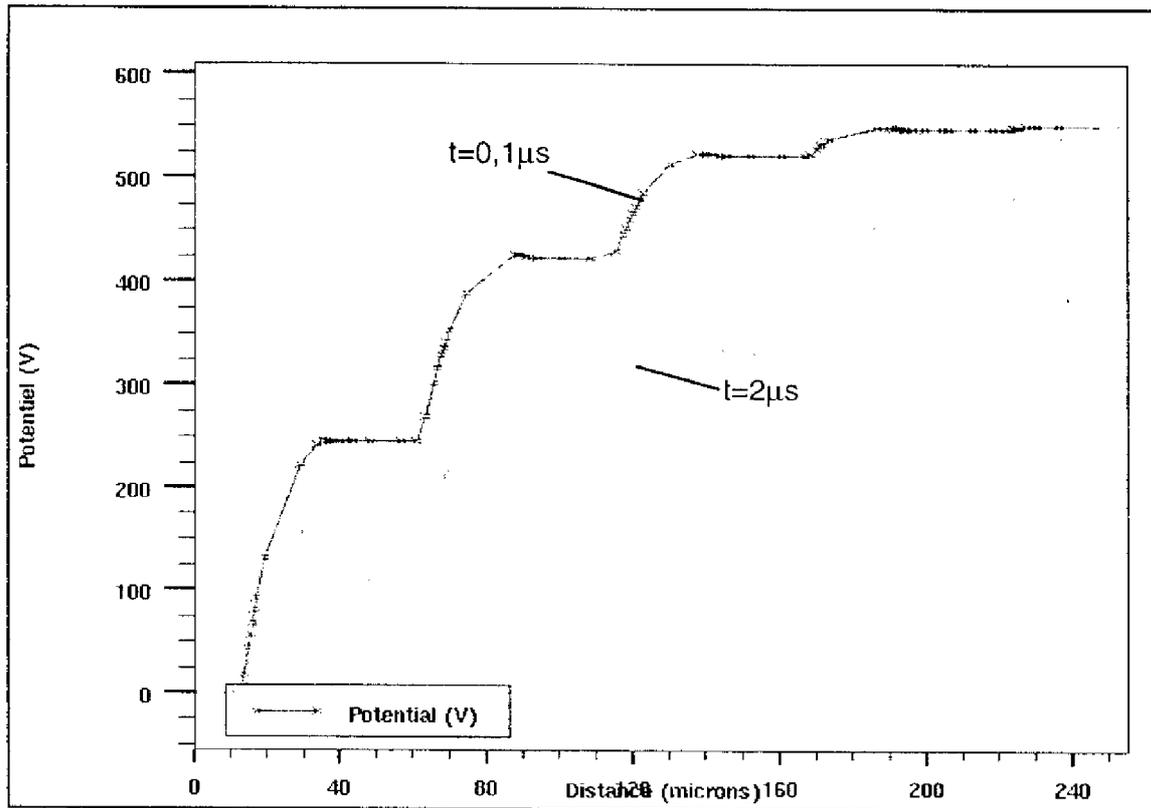


Figure 19 : Coupe de potentiel en surface pour un $dV/dt = 6000 \text{ V}/\mu s$ à $t = 0,1 \mu s$ et $t = 2 \mu s$.

Nous avons voulu comprendre ces résultats au moyen d'une approche circuit. La structure à anneaux polarisés peut en effet être modélisée par une série de lignes RC (Figure 20) ; R étant la résistance de la spirale et C la capacité de la jonction. Nous avons donc réalisé des simulations SPICE de ce réseau. Le nombre de cellules RC simulées est ici de 5 (C1 est l'anode, C2 à C5 les 4 anneaux) et les valeurs de résistances et de capacités correspondent respectivement à la résistance d'un tour de spirale de l'anneau ($200 \text{ K}\Omega$) et aux capacités des diodes anneaux/substrat qui sont elles-mêmes fonction de la tension d'anneau (cf. relation 2-18)

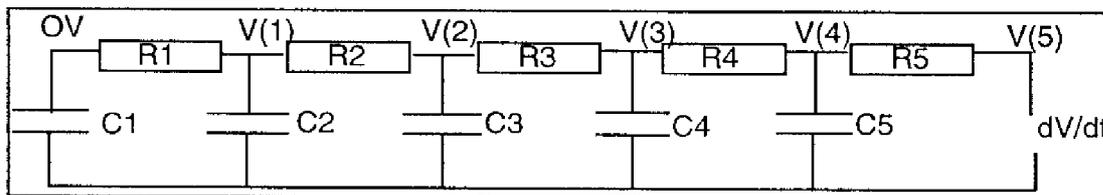


Figure 20 : Schéma électrique équivalent de la structure à anneaux polarisés.

Lorsque l'on applique un dV/dt de $100 \text{ V}/\mu s$ (Figure 21 a), on remarque que l'on a une linéarisation de potentiel sur chaque anneau comme en statique. Lorsque l'on augmente le dV/dt , à partir de $2000 \text{ V}/\mu s$, les anneaux ne se polarisent plus comme en statique. Il n'y a plus de distribution linéaire sur tous les nœuds. A $6000 \text{ V}/\mu s$ (Figure 21 b) on constate que la

linéarisation du potentiel en surface n'a plus lieu. L'état statique (distribution linéaire entre tous les noeuds) est obtenu après un certain temps (0.6 μs).

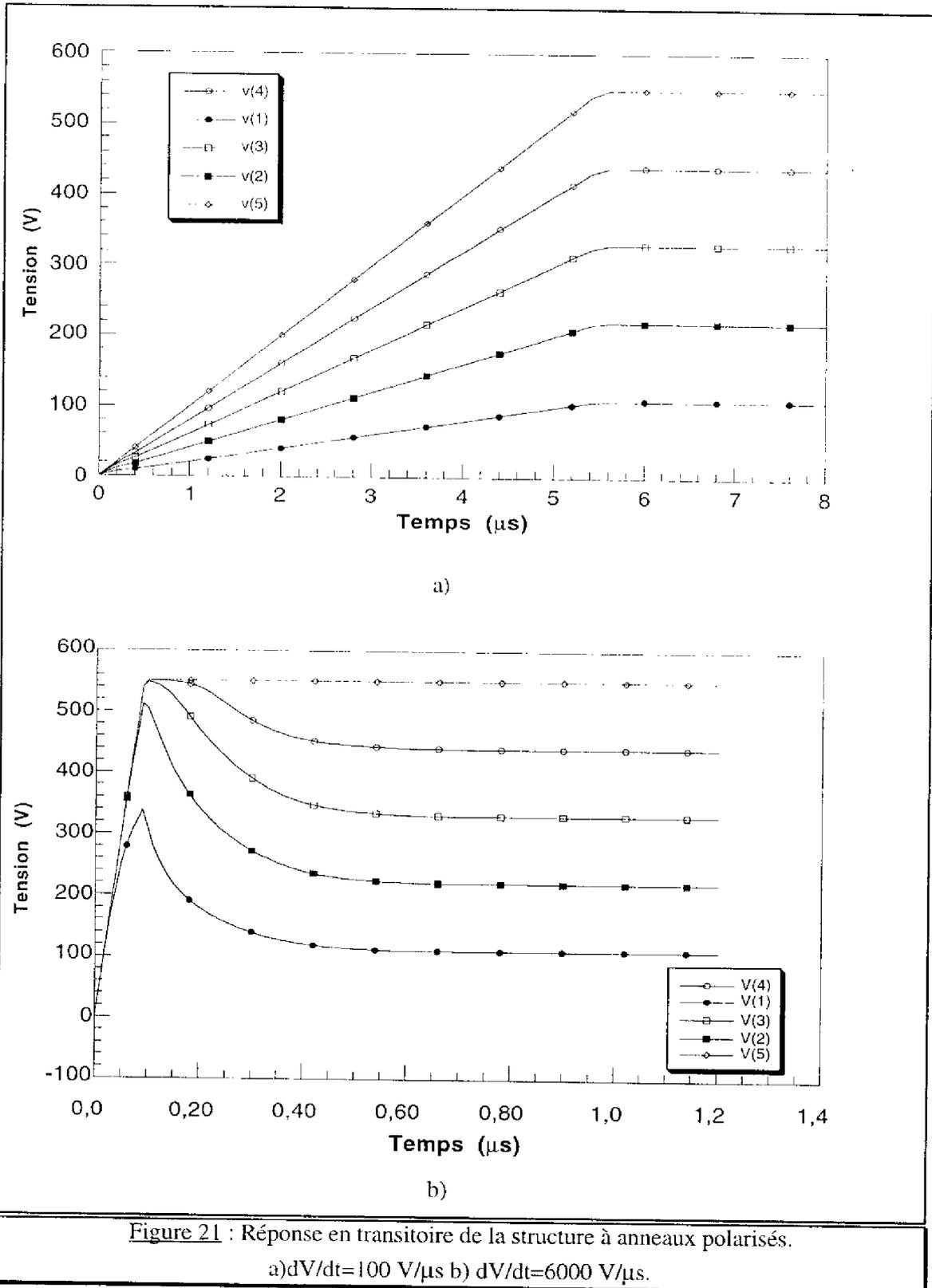


Figure 21 : Réponse en transitoire de la structure à anneaux polarisés.

a) $dV/dt = 100 \text{ V}/\mu\text{s}$ b) $dV/dt = 6000 \text{ V}/\mu\text{s}$.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons analysé le fonctionnement électrique de la structure à anneaux polarisés, au moyen de logiciels numériques bidimensionnels.

L'étude de l'influence de divers paramètres de la structure sur la tenue en tension nous a permis de montrer que :

- La concentration de l'épitaxie détermine la gamme de tension désirée. Pour chaque concentration d'épitaxie, il sera nécessaire d'optimiser la structure.
- La distance anode-anneau et anneau-anneau est un paramètre de première importance, car l'efficacité de la technique lui est directement liée. En effet, la technique est d'autant plus efficace que si la distance inter-anneaux est faible.
- L'épaisseur d'épitaxie détermine également la gamme de tension désirée. L'efficacité de la technique est meilleure sur des structures à limitation de charge d'espace.
- Un phénomène de perçage entre les anneaux se produit lorsque la distance entre les anneaux est faible. Ce phénomène se produit en premier lieu dans les anneaux externes. Nous avons défini un modèle analytique concernant la mise en direct entre les anneaux. A partir de là, nous avons déterminé des structures à distances variables ; c'est-à-dire des faibles distances près de l'anode (pour avoir une efficacité de protection élevée), et augmentant au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la jonction principale : la dernière distance devrait être suffisamment grande afin d'éviter le passage en direct. Nous obtenons une efficacité de 90% sans que le perçage ne se produise.
- Un excellent comportement vis-à-vis des charges d'interface (insensibilité voire amélioration).
- La tenue en tension n'est pas dégradée pour des dV/dt allant jusqu'à 2000 V/ μ s.

La suite de l'étude consiste à vérifier expérimentalement les règles de conception et l'efficacité de la technique de terminaison de jonction proposée.

**CHAPITRE 3 : REALISATION TECHNOLOGIQUE
DES COMPOSANTS TESTS**



INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous nous sommes intéressés à l'étude de la structure de garde des anneaux polarisés à l'aide de simulations numériques qui ont permis de dégager les points positifs d'une telle technique : insensibilité aux charges d'interface, grande tolérance vis-à-vis de la géométrie, faible coût lié seulement à la surface de silicium occupée et conception facile.

Pour compléter cette étude numérique et vérifier son bien fondé, nous nous proposons dans ce chapitre de réaliser des composants tests.

Le déroulement de ce chapitre est organisé selon les quatre parties décrites ci-dessous.

Dans une première partie, nous présenterons le procédé technologique, les conditions opératoires et les masques utilisés pour les deux premiers lots de composants tests.

Dans la deuxième partie, nous regarderons les caractéristiques électriques des premiers dispositifs réalisés. Dans un premier temps, nous nous limiterons volontairement à des structures à distances constantes, afin de mettre en évidence le phénomène de passage en direct prévu par la simulation numérique.

Dans la troisième partie, nous modifierons certaines étapes technologiques à partir des résultats précédemment obtenus afin d'améliorer le courant de fuite dans la structure. D'autre part, nous irradierons nos composants afin d'étudier l'influence des charges d'interface. Enfin, nous regarderons le comportement électrique de notre terminaison de jonction lorsque l'on applique une rampe de tension.

Dans la quatrième et dernière partie, nous nous intéresserons à des structures à distances croissantes : en effet nous avons vu au chapitre 2 (§ 3-5) que d'une part la structure est plus efficace si le premier anneau est proche, et que d'autre part, pour éviter le passage en direct, la dernière distance doit être suffisamment grande. Nous regarderons également l'influence de l'épaisseur d'épitaxie sur la tenue en tension.

1-CONCEPTION DES MASQUES ET DESCRIPTION DU PROCESSUS TECHNOLOGIQUE

Le processus technologique a pour but de réaliser des diodes protégées par la technique des anneaux polarisés selon différentes configurations. Nous présentons les phases de conception et de réalisation de ces diodes avec la technique de garde ainsi que des jonctions cylindriques sur des plaquettes de différentes résistivités et d'orientation cristalline $\langle 100 \rangle$.

Nous avons choisi de faire varier la géométrie de chaque diode avec la spirale sur chacune des plaquettes de la façon suivante :

- nous avons réalisé deux types de diodes circulaires de rayons 1500 et 2500 μm .
- toutes les structures comportent 4 tours de spirale.
- les inter-distances entre deux diffusions de tours de spirale sont constantes. Elles prennent successivement les valeurs de 10, 15, 20, 30 et 50 μm pour la diode de 2500 μm de rayon, et elle est de 20 μm pour celle de 1500 μm .

Le jeu de masque, permettant de réaliser les dispositifs, se composera dans la première réalisation technologique de 4 niveaux correspondant aux étapes technologiques suivantes :

- masque 1 : ouverture de la spirale.
- masque 2 : ouverture du stop-channel.
- masque 3 : ouverture des contacts.
- masque 4 : gravure du métal.

Les dessins des masques et les ouvertures correspondantes sont représentés sur la figure 1. Notons que ce jeu de masques correspond au cas où les dopages des anneaux et de l'anode sont réalisés par une même implantation ionique.

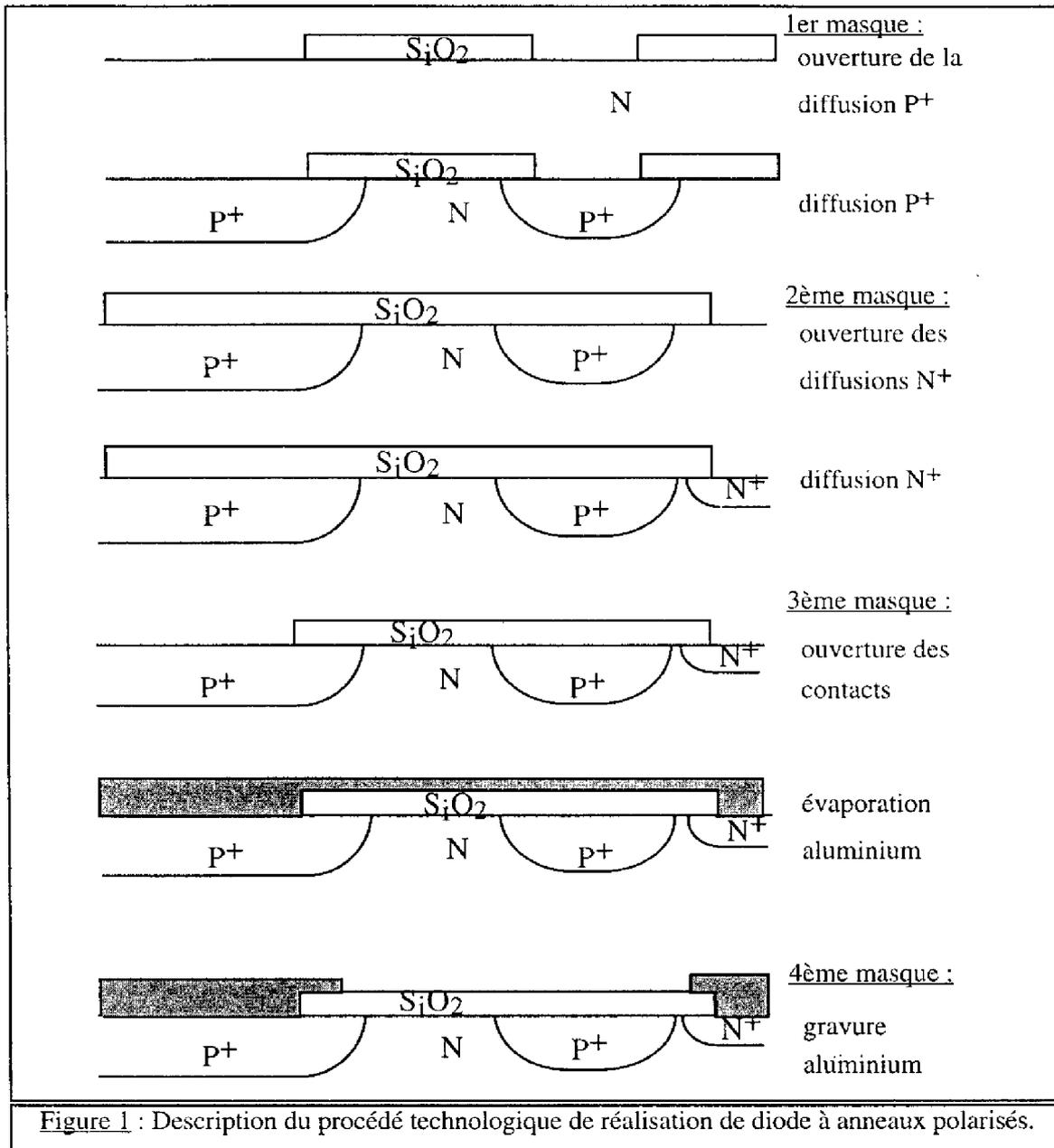


Figure 1 : Description du procédé technologique de réalisation de diode à anneaux polarisés.

Nous allons maintenant décrire les différentes étapes technologiques du processus.

1. Choix du silicium :

Les composants ont été réalisés sur des plaquettes de silicium dopées au phosphore d'orientation <100>. Le choix des résistivités a fortement dépendu de la disponibilité des plaquettes silicium. Pour la première réalisation technologique, nous avons travaillé sur des plaquettes de résistivité 56 Ω.cm (dopage $7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), pour la seconde réalisation

Chapitre 3 : Réalisation technologique des composants tests

technologique, nous avons utilisé des plaquettes de deux résistivités initiales de $19 \Omega \cdot \text{cm}$ (dopage $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) et $35 \Omega \cdot \text{cm}$ (dopage $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$), et enfin pour la troisième réalisation technologique, nous avons utilisé des plaquettes de résistivités $19 \Omega \cdot \text{cm}$ (dopage $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) et $42 \Omega \cdot \text{cm}$ (dopage $8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) ainsi que des substrats épitaxiés de résistivité $50 \Omega \cdot \text{cm}$ (dopage $7,5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) et $W_{\text{epi}}=60 \mu\text{m}$.

2. Nettoyage du silicium :

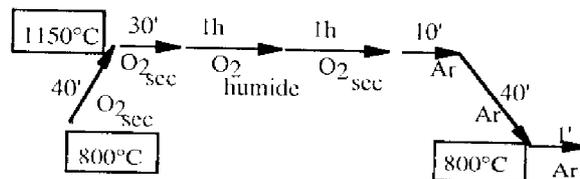
La surface des échantillons présente, dans la quasi-totalité des cas, des contaminants de type moléculaire, ionique et atomique [1]. Un nettoyage est donc nécessaire.

- On place les échantillons dans un bêcher contenant du $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ (proportion 1/1) en agitant pendant 2 mn. L'échantillon est ainsi débarrassé de ses contaminants organiques et est légèrement oxydé. On le rince ensuite à l'eau désionisée et on le sèche au jet d'azote.
- On le trempe dans un bain d'acide fluorhydrique dilué à 10% pendant 1mn pour le désoxyder.

3. Oxydation de masquage :

Cet oxyde permet l'ouverture des fenêtres d'implantation de la spirale et de l'anode, il doit avoir une épaisseur suffisante pour protéger le reste de la plaquette [2] lors des opérations successives.

Les plaquettes sont introduites dans le four à 800°C dans lequel elles subissent une montée lente en température jusqu'à 1150°C ($10^\circ\text{C}/\text{mn}$ environ) sous atmosphère d'oxygène pour éviter d'éventuels défauts. La descente en température se fera de la même façon sous atmosphère d'argon.



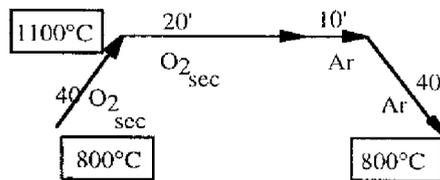
L'épaisseur d'oxyde de masquage obtenue à la fin de cette étape est de $1 \mu\text{m}$.

4. Ouverture d'implantation de la spirale :

L'ouverture des fenêtres d'implantation est faite par un processus de photogravure classique avec le masque 1.

5. Oxyde d'implantation :

Avant l'implantation, il est nécessaire d'introduire une fine couche d'oxyde pour éviter d'éventuelles contaminations et réduire les effets de canalisation.



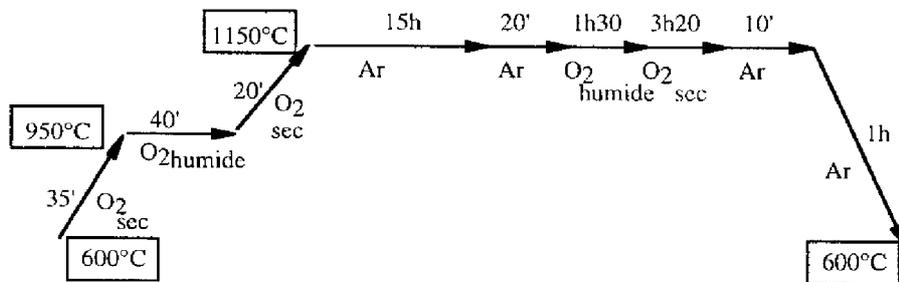
L'épaisseur d'oxyde d'implantation obtenue est de 500 Å.

6. Implantation ionique :

Les implantations ioniques de bore se font à une énergie de 50 KeV avec une dose de $1.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

7. Redistribution du bore implanté :

Cette étape permet de redistribuer les atomes de bore implantés dans la jonction principale et dans la spirale. Elle sera suivie d'une oxydation.



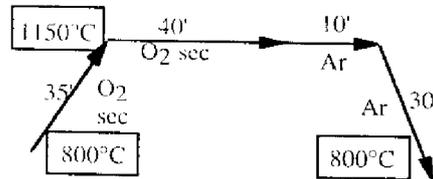
8. Réalisation du stop channel et du dopage de la face arrière :

On ouvre les fenêtres de diffusion avec le masque n°2. Le dopage de type N⁺ est réalisé à partir d'un prédépôt d'une source liquide POCL₃ à 1050°C.

- O₂+N₂ t=5 mn
- POCL₃ t=5 mn
- O₂+N₂ t=10 mn

9. Redistribution du phosphore :

L'étape de prédépôt est suivie d'une étape de redistribution.



L'épaisseur d'oxyde obtenue est de 1970 \AA .

10. Ouverture des contacts :

On effectue l'ouverture des contacts de métallisation avec le masque n°3.

11. Métallisation :

Une métallisation de 8000 \AA sera effectuée en face avant.

12. Photogravure du métal :

La plaquette métallisée est photogravée en utilisant le masque n°4. Le métal est ensuite attaqué à l'aide d'une solution d' H_3PO_4 et d' HNO_3 . Dans le but d'améliorer le contact électrique et de neutraliser une partie des centres responsables des états de surface, la plaquette métallisée est recuite pendant 20 mn à 450°C sous atmosphère N_2H_2 .

13. Profil de dopage final :

Nous avons simulé ce procédé technologique à l'aide du logiciel bidimensionnel ATHENA [3]. La concentration en surface et la profondeur de jonction des régions P^+ d'anode et d'anneaux sont respectivement $8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et 12.5 \mu m dans notre exemple (Figure 2).

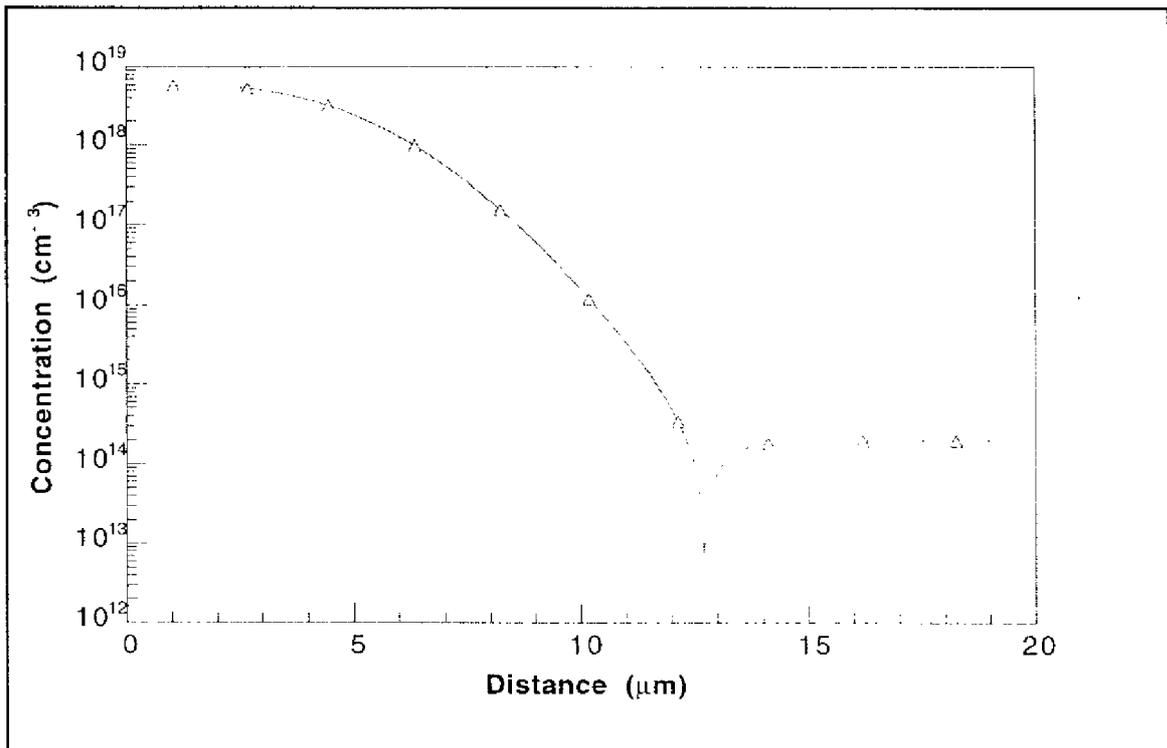


Figure 2 : Profil de dopage obtenu par simulation ATHENA.

2-DISPOSITIFS A ECARTEMENT CONSTANT ET DIFFUSIONS COMMUNE ANODE/ANNEAUX

Sur la base des modélisations précédentes (Chapitre 2), nous avons défini des règles de conception de diodes à terminaisons par anneaux polarisés. Nous nous sommes dans un premier temps volontairement limités à des structures à distances constantes afin de mettre en évidence le phénomène de passage en direct (perçage) prévu par la simulation numérique.

Les composants ont été réalisés sur des plaquettes de silicium dopées au phosphore, d'orientation $\langle 100 \rangle$, de résistivité initiale $56 \Omega \cdot \text{cm}$ (le dopage est de $7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$). Des exemples de photos des structures réalisées sont donnés sur la figure 3.

2-1 : Tenue en tension

La figure 4 représente une caractéristique expérimentale courant-tension typique de la diode sans protection, en polarisation inverse. La tenue en tension des jonctions cylindriques est de 610 V pour un rayon de 2500 μm , et 550 V pour un rayon de 1500 μm . La dispersion des mesures est évaluée à 5%. Rappelons que le calcul analytique de la tension de claquage d'une telle jonction cylindrique donne 606 V, la simulation numérique 567 V. Ces résultats indiquent que le claquage est sensible à l'aspect sphérique puisque lorsque le rayon de l'anode diminue, la tension de claquage diminue aussi. Nous constatons que la tension de claquage pour la jonction cylindrique est du même ordre de grandeur que celle prévue analytiquement ou par la simulation.

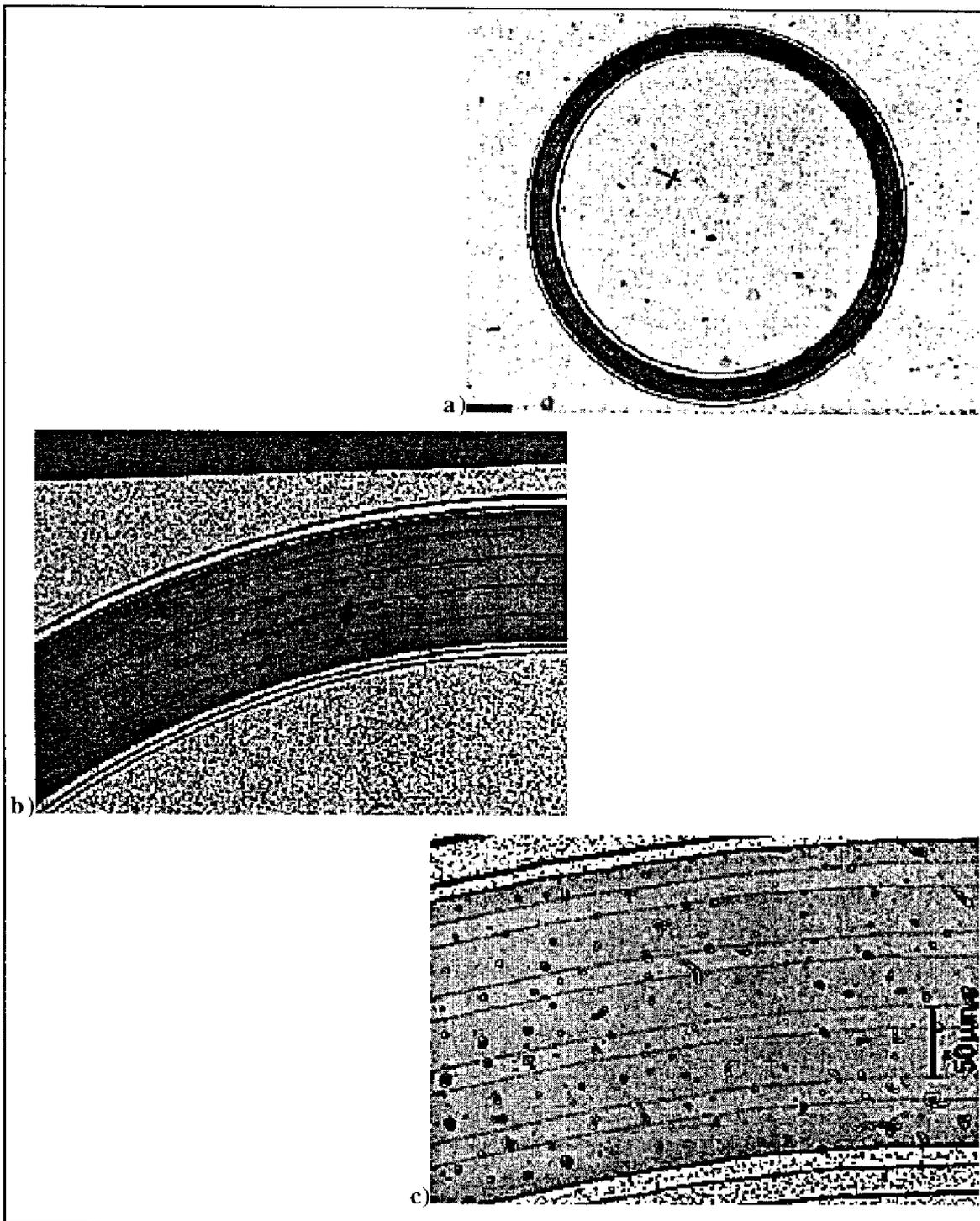
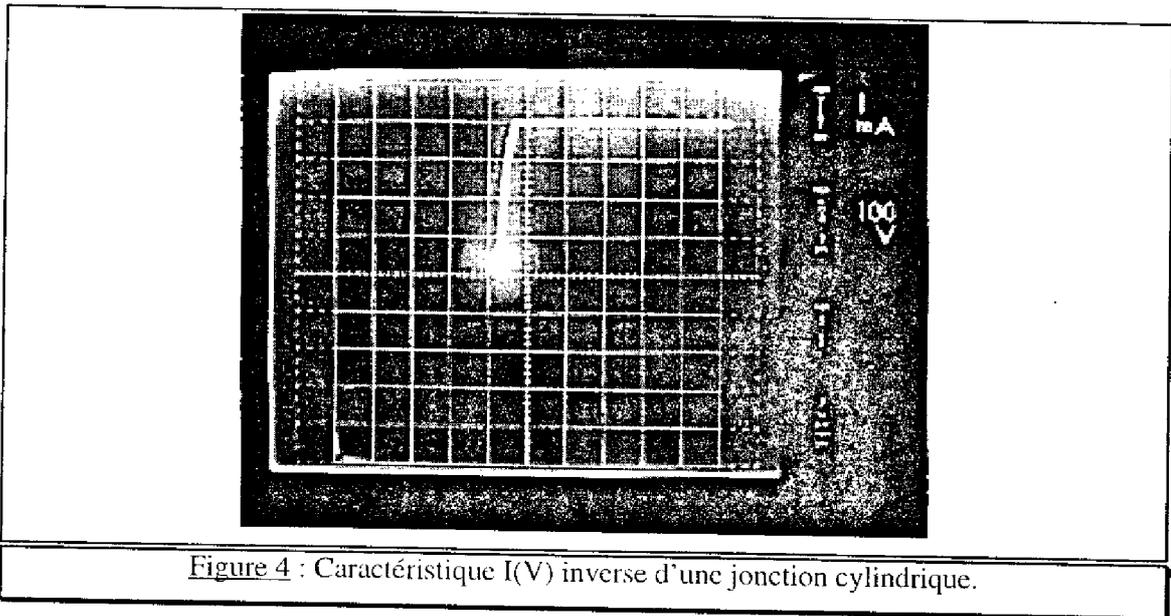
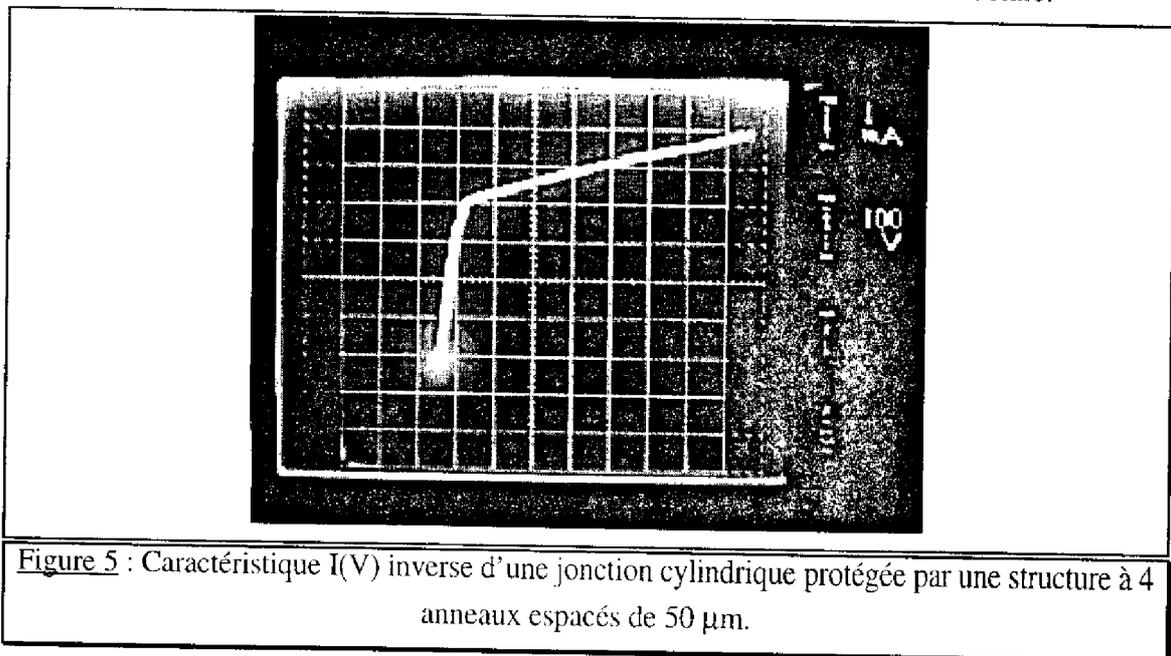


Figure 3 : Photographies du dispositif.

- a) Ranode=1500 microns $d=20$ microns (grossissement 15).
- b) Ranode=2500 microns $d=50$ microns (grossissement 65).
- c) Ranode=2500 microns $d=30$ microns (grossissement 240).



Pour les diodes avec terminaisons, la structure dont la distance entre les anneaux est de 50 μm , présente une tension de claquage de 840 V (Figure 5), avec une dispersion de 10% ; la tension théorique simulée étant de 780 V. Sur cette figure 5, la présence du courant de fuite dans la spirale est tout à fait évidente avant le claquage par avalanche. Pour des distances inférieures, nous observons systématiquement un passage en direct des anneaux (§2-3) qui empêche la mesure du claquage par avalanche du fait du très fort courant de fuite dans la structure.

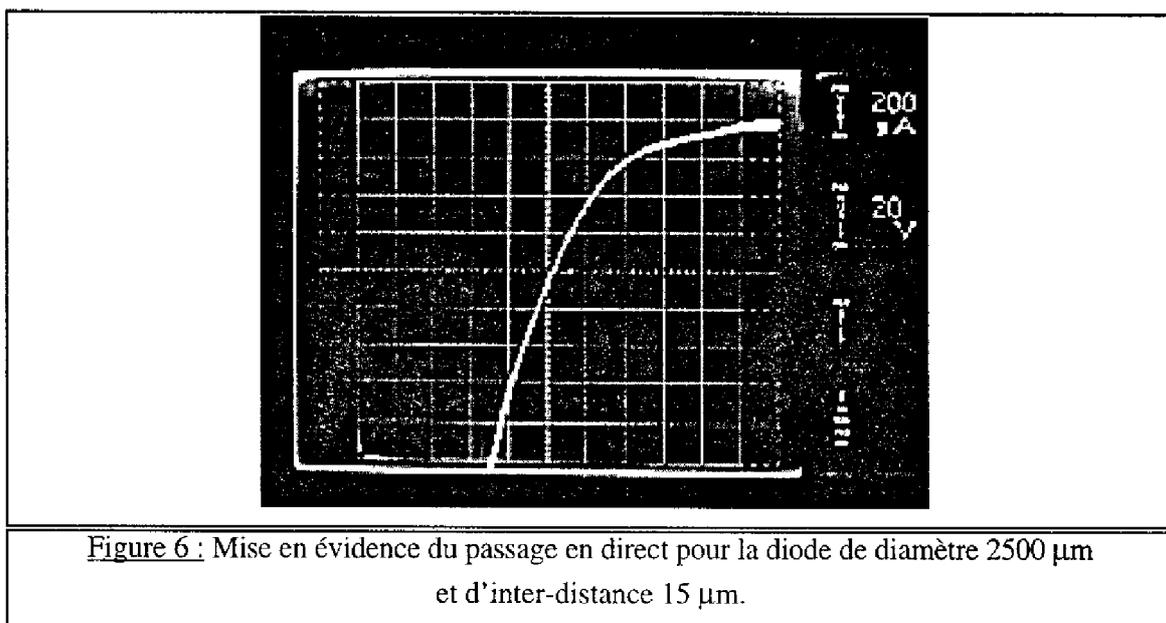


2-2 : Mesure de la résistance de la spirale

Les anneaux polarisés introduisent une résistance entre la basse tension (anode) et la haute tension (stop-channel). Afin de limiter le courant consommé par la structure, il est nécessaire d'avoir la plus forte résistance possible (1 M Ω pour 1 mA de courant de fuite sous 1000 V). Nous avons mesuré la résistance de la spirale des différentes structures à partir des caractéristiques I(V) ; pour les structures dont la distance entre les anneaux est de 30, 20, 15 et 10 μm , il faut mesurer la résistance de la spirale avant le passage en direct, on obtient alors des valeurs de l'ordre de 400 K Ω . Cette résistance est trop faible, ce qui entraîne un courant de fuite trop important. Pour augmenter cette résistance on peut diminuer la dose de la spirale. Etant donné que pour la jonction principale, il faut impérativement une dose importante pour des problèmes de contact ohmique, **la seule solution est de séparer les diffusions d'anode et de spirale.**

2-3 : Etude du passage en direct

La tenue en tension des dispositifs, dont la distance entre les anneaux est de 30, 20, 15 et 10 μm , n'est pas mesurable à cause des courants de fuite importants constatés sur ces caractéristiques. En effet, pour ces structures, on observe le passage en direct prévu au chapitre 2. Ce phénomène est mis en évidence sur la figure 6 sur laquelle on constate une variation brutale de la pente de la caractéristique I(V) à partir d'une valeur de tension aux environs de 80 V, pour une distance inter-anneaux de 15 μm .



Le tableau 1 regroupe les différentes valeurs de la tension de mise en direct, obtenues par simulation numérique, par le modèle analytique développé au chapitre 2 et par la mesure.

Distance (μm)	Calcul Analytique	Simulation	Mesure
10	36 V	45 V	35-40 V
15	84 V	80 V	80-90 V
20	155 V	200 V	140-200 V
30	380 V	435 V	300-400 V
50	1200 V	non	non

Tableau 1 : Tension de passage en direct par calcul analytique, simulation et expérience.

Pour la structure dont la distance entre les anneaux est de 50 μm on n'observe pas le passage en direct car, à cette valeur de tension, le claquage par avalanche s'est déjà produit. La correspondance des résultats mesurés avec ceux issus du calcul analytique et de la simulation indique que c'est bien ce phénomène que l'on observe dans nos diodes.

Ce premier processus technologique, bien que n'étant pas spécialement optimisé pour le dopage utilisé, nous a permis de démontrer l'apparition de deux problèmes : le courant de fuite trop important dans la spirale et la mise en direct de certaines géométries. Ce premier problème sera résolu dans le processus technologique suivant, en séparant les diffusions d'anode et d'anneaux. Le deuxième problème est lié au fait que ce jeu de masques n'a pas été optimisé pour ce dopage. En effet, pour ce dopage ($7.10^{13} \text{ cm}^{-3}$), nous avons observé presque systématiquement le passage en direct. Dans le processus suivant, nous utiliserons des plaquettes dopées à la valeur où nous avons optimisé notre structure ($2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$) afin de vérifier notre étude.

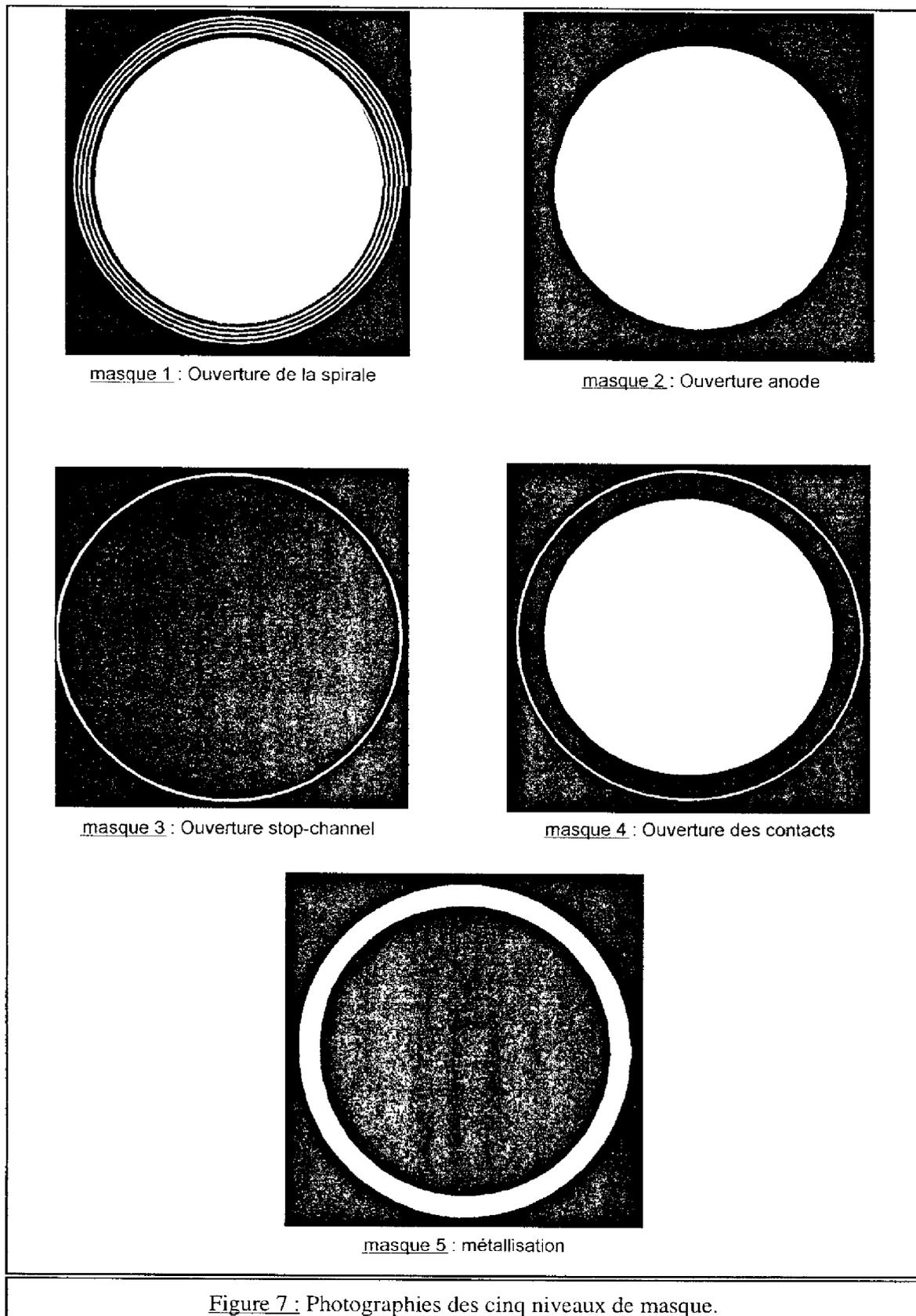
3-DISPOSITIFS A ECARTEMENT CONSTANT ET DIFFUSIONS ANODE/ANNEAUX SEPARÉES

Lors de la précédente réalisation technologique, nous avons pu mettre en évidence le phénomène de perçage et soulever le problème lié au courant de fuite trop important. La solution proposée est de séparer les diffusions d'anode et de spirale : la dose d'implantation de la spirale sera alors plus faible (10^{13} cm⁻²) tandis que nous augmenterons celle de la jonction principale ($8 \cdot 10^{15}$ cm⁻²) afin d'avoir un bon contact ohmique en surface. Donc pour ce processus, nous utiliserons 5 niveaux de masquage (Figure 7), soit un de plus que précédemment :

- masque 1 : ouverture de la spirale,
- masque 2 : ouverture de l'anode,
- masque 3 : ouverture du stop-channel,
- masque 4 : ouverture des contacts,
- masque 5 : gravure du métal.

Le tableau 2 présente les différentes étapes de cette réalisation technologique très proches de la première réalisation technologique.

Les composants ont été réalisés sur des plaquettes de silicium dopées au phosphore d'orientation <100>, avec deux résistivités initiales de 19 Ω.cm (le dopage est de $2 \cdot 10^{14}$ cm⁻³) et 45 Ω.cm (le dopage est de $1 \cdot 10^{14}$ cm⁻³).



Objectif	Etapes	Temps(mn)+Gaz Temperature
Diffusion P ⁺ de la spirale.(Masque n°1)	*Nettoyage plaquette.	-H ₂ SO ₄ (50%)+H ₂ O ₂ (50%) t=2 mn -HF 10% t=1 mn.
	*Oxyde de masquage. (8000Å)	
Diffusion P ⁺ de la spirale.(Masque n°2)	*Ouverture de la spirale	
	*Oxydation d'implantation (450Å)	
Diffusion N ⁺ de stop channel (masque n° 3)	*Implantation de la spirale (50 KeV, 1.10 ¹⁵ à 1.10 ¹³ cm ⁻²).	
	*Ouverture de l'anode.	
Diffusion N ⁺ de stop channel (masque n° 3)	*implantation (8.10 ¹⁵ cm ⁻² Bore à 50 Kev).	
	*Redistribution P ⁺ , P ⁻ .	
Diffusion N ⁺ de stop channel (masque n° 3)	*Oxydation (1 µm)	
	*Ouverture de diffusion	
Diffusion N ⁺ de stop channel (masque n° 3)	*Predépôt phosphore T=1050°C	O ₂ +N ₂ t=5 mn POCL ₃ t=5 mn O ₂ +N ₂ t=10 mn
	*Redistribution du phosphore	
Ouverture des contacts (masque n° 4)	*Ouverture des contacts	
Ouverture des contacts (masque n° 4)	*Metallisation 8000Å Aluminium.	
	*Gravure métal	
Gravure métal (masque n° 5)	*Recuit métal.	N ₂ +H ₂ T=450°C t=20 mn

Tableau 2 : Etapes technologiques pour la réalisation d'une structure à anneaux polarisés.

3-1 : Tenue en tension

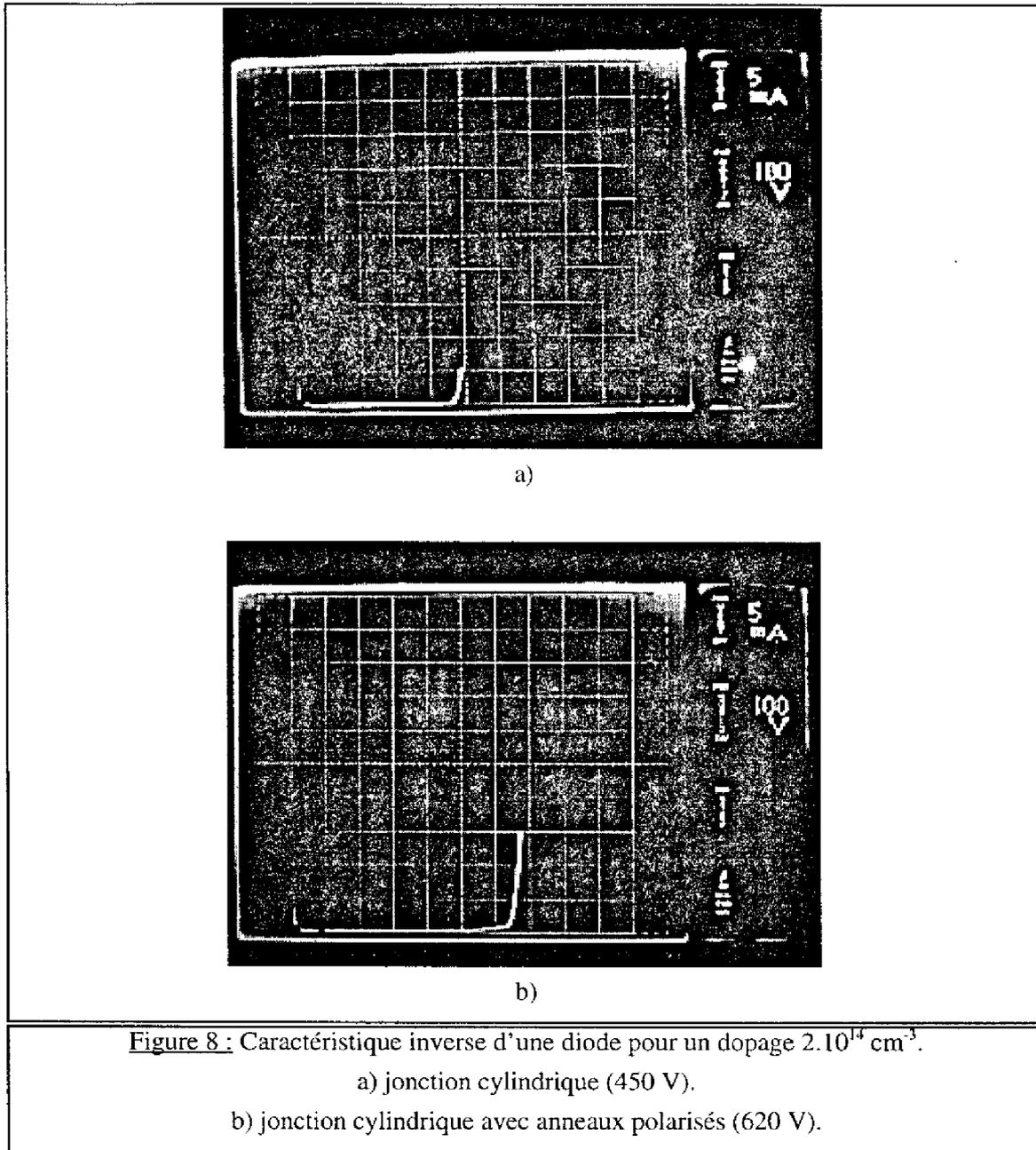
La tenue en tension des jonctions cylindriques est de 434 V pour la diode de rayon 2500 μm et de 367 V pour la diode de rayon 1500 μm pour un dopage de $2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Nous rappelons que le calcul analytique de cette tension de claquage donne 420 V (chapitre 2 §3). La tenue en tension des jonctions cylindriques est de 550 V pour un dopage de $1.10^{14} \text{ cm}^{-3}$.

Le tableau 3 résume les variations de la tenue en tension en fonction de la distance inter-anneaux pour deux dopages respectifs de substrat de $2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$ et $1.10^{14} \text{ cm}^{-3}$, une profondeur de jonction de 15 μm . L'accord entre l'expérience et la simulation est satisfaisant.

d (μm)	Dopage $2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$			Dopage $1.10^{14} \text{ cm}^{-3}$		
	BV _{simulation}	BV _{expérience}	Efficacité	BV _{simulation}	BV _{expérience}	Efficacité
10	605 V	617 V	73%	890 V		
15	575 V	607 V	71%	860 V	876 V	62%
20	555 V	590 V	69%	833 V	835 V	60%
30	522 V	558 V	65%	754 V	820 V	58%
50	480 V	529 V	62%	605 V	700 V	48%

Tableau 3 : Influence de la distance inter-anneaux sur la tenue en tension.

Comme prévu, la tension de claquage augmente lorsque la distance inter-anneaux diminue. Nous obtenons une efficacité de 75% (pour un substrat dopé à $2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$) par rapport à la tenue en tension d'une jonction plane soit 850 V. L'efficacité de la technique est plus faible pour un substrat dopé à $1.10^{14} \text{ cm}^{-3}$ car la structure n'a pas été optimisée pour ce dopage. Lorsque la distance entre les anneaux est grande (50 μm), nous retrouvons la tenue en tension de la jonction cylindrique. La figure 8a donne une caractéristique expérimentale de la diode sans protection (tenue en tension de 450 V) et la figure 8b celle de la diode avec protection (tenue en tension de 620 V) pour un substrat dopé à $2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$.



3-2 : Etude du courant de fuite

La résistance de la spirale est maintenant de l'ordre de $10 \text{ M}\Omega$. La séparation des diffusions de spirale et d'anode a permis de diminuer très fortement le courant de fuite dans la spirale, ainsi que nous pouvons le voir en comparant la caractéristique inverse de la figure 8b à celle de la figure 5.

3-3 : Etude de l'influence des charges d'interface

Nous modifierons volontairement les charges en surface par une irradiation. Pour notre étude nous avons utilisé un générateur de rayons X de large spectre énergétique, destiné en principe à la radiographie industrielle. Il est constitué essentiellement d'un canon, dont les électrons définissent un flux qui vient frapper une anticathode de tungstène, et d'un générateur haute tension de 300 KV maximum. Pour déterminer avec précision la densité de charges d'interface nous avons utilisé comme témoin une capacité MOS. Le processus utilisé pour la réalisation des capacités MOS est décrit ci-dessous.

Les capacités MOS ont été réalisées sur une plaquette de silicium de type N, dopée au phosphore de résistivité 19 Ωcm (le dopage est de $2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$), d'orientation $\langle 100 \rangle$. La plaquette subit tout d'abord un nettoyage de type RCA réalisant les opérations suivantes :

- A : attaque lente de l'oxyde natif formé au contact de l'air,
- A' : oxydation chimique du silicium,
- A : attaque de l'oxyde chimique formé précédemment,
- B : décontamination organique du silicium,
- C : inactivation des métaux lourds (Cr, Au, ...).

On procède ensuite à une oxydation de grille. Cet oxyde thermique doit être très propre et avoir une épaisseur bien contrôlée. Une épaisseur de 1 μm a été obtenue en ambiance "sec/humide/sec" à 1150°C. La métallisation de la grille déposée par évaporation (8000 Å) est réalisée immédiatement après. Ensuite, nous procédons à l'ouverture des contacts en photogravant l'aluminium. On désoxyde la face arrière puis on la métallise avec de l'or-antimoine (2000 Å) pour obtenir un contact de type ohmique.

Les structures MOS sont extrêmement sensibles aux irradiations car celles-ci affectent l'interface Si/SiO₂. Les radiations produisent principalement deux effets :

- accumulation de charges dans la couche d'oxyde.
- accroissement des états à l'interface Si/SiO₂.

Ces effets ont un impact sur les caractéristiques électriques, un des paramètres les plus sensible étant la tension de bande plate ; les charges dans l'oxyde provoquent un déplacement des caractéristiques électriques (courbe C(V)). La tension de bande plate suit une loi de variation avec la charge dans l'oxyde telle que :

$$V_{\text{FB}} = V_{\text{FB0}} - \frac{Q_{\text{ox}}}{C_{\text{ox}}} \quad (3.1)$$

où V_{FB0} est la tension de bande plate avant irradiation, V_{FB} est la tension de bande plate après irradiation, Q_{ox} la charge dans l'oxyde, C_{ox} la capacité de l'oxyde.

Lorsque l'on irradie un composant avec des rayons X, la génération de paires électron trou est essentiellement uniforme à travers l'oxyde. Lors de la présence d'un champ électrique,

les électrons et les trous sont séparés et se déplacent dans l'oxyde à des vitesses différentes. Les électrons sont immédiatement repoussés hors de l'oxyde et traversent l'interface [4]. En revanche les trous ont une faible mobilité (qui varie beaucoup avec la température) et sont facilement piégés. La figure 9 représente une courbe C-V d'une capacité MOS avant et après irradiation. Pour un substrat de type N, les charges positives "déplacent" la courbe vers des valeurs de tension de grille négatives tout en conservant la forme de la caractéristique.

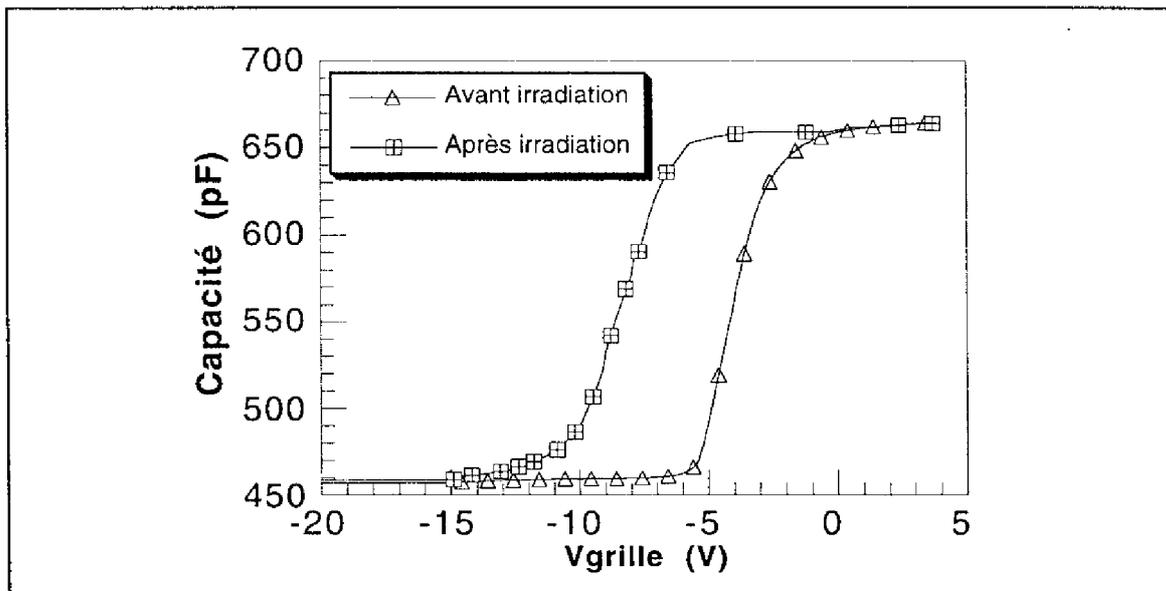


Figure 9 : Courbes C-V (avant et après irradiations aux rayons X).

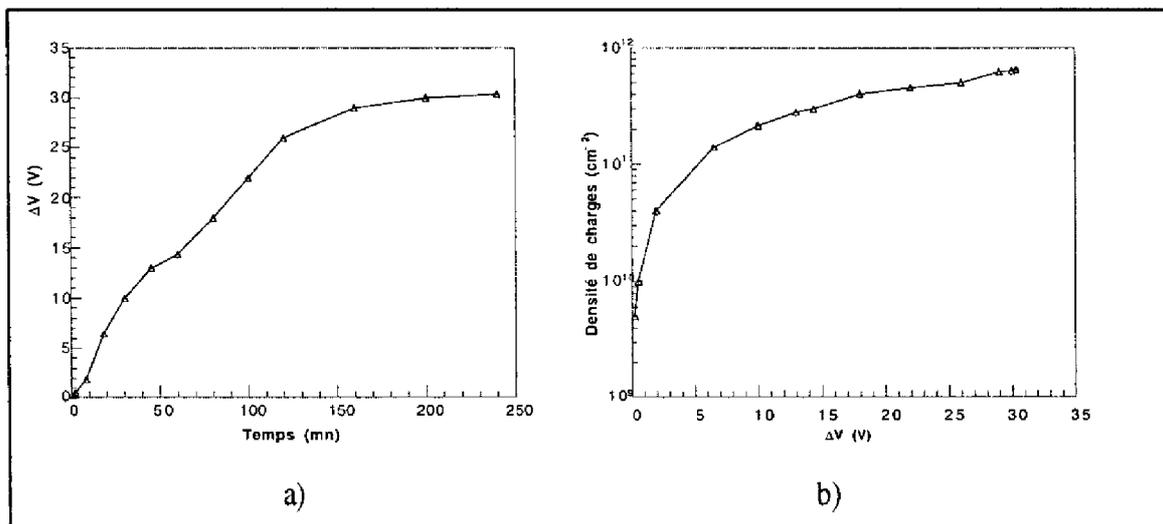


Figure 10 : Calibration de la méthode de mesure.

La figure 10 décrit la méthode utilisée pour déterminer la densité de charges présentes dans l'oxyde. Nous avons irradié nos composants ainsi qu'une capacité MOS pendant un temps t . A partir d'une mesure C-V de la capacité MOS nous avons mesuré la variation de la tension de bande plate (ΔV) (Figure 10a). A partir de l'équation (3.1), nous avons alors déterminé la

densité de charges présente dans l'oxyde (Figure 10b). Notons que la densité de charges dans l'oxyde est cumulative.

La figure 11 représente les variations expérimentales et simulées de la tension de claquage pour différentes densités de charges dans l'oxyde. La tension de claquage est constante lorsque la densité de charges d'interface est comprise entre 10^{10} cm^{-2} et $2 \cdot 10^{11}$ cm^{-2} puis elle augmente de 500 à 600V quand les charges dans l'oxyde deviennent supérieures à $2 \cdot 10^{11}$ cm^{-2} . Nous obtenons un bon accord entre la simulation et les mesures expérimentales. Des charges positives dans l'oxyde induisent une charge négative dans le semi-conducteur. Le champ électrique à la surface est fortement modifié. En effet nous avons remarqué (chapitre 2) que le champ diminuait près des courbures de jonction et augmentait dans les régions inter-anneau, ceci entraînant une hausse de la tension de claquage. **Cette technique n'est donc pas dégradée par la présence de charges d'interface, même à des doses très élevées** [7], [8].

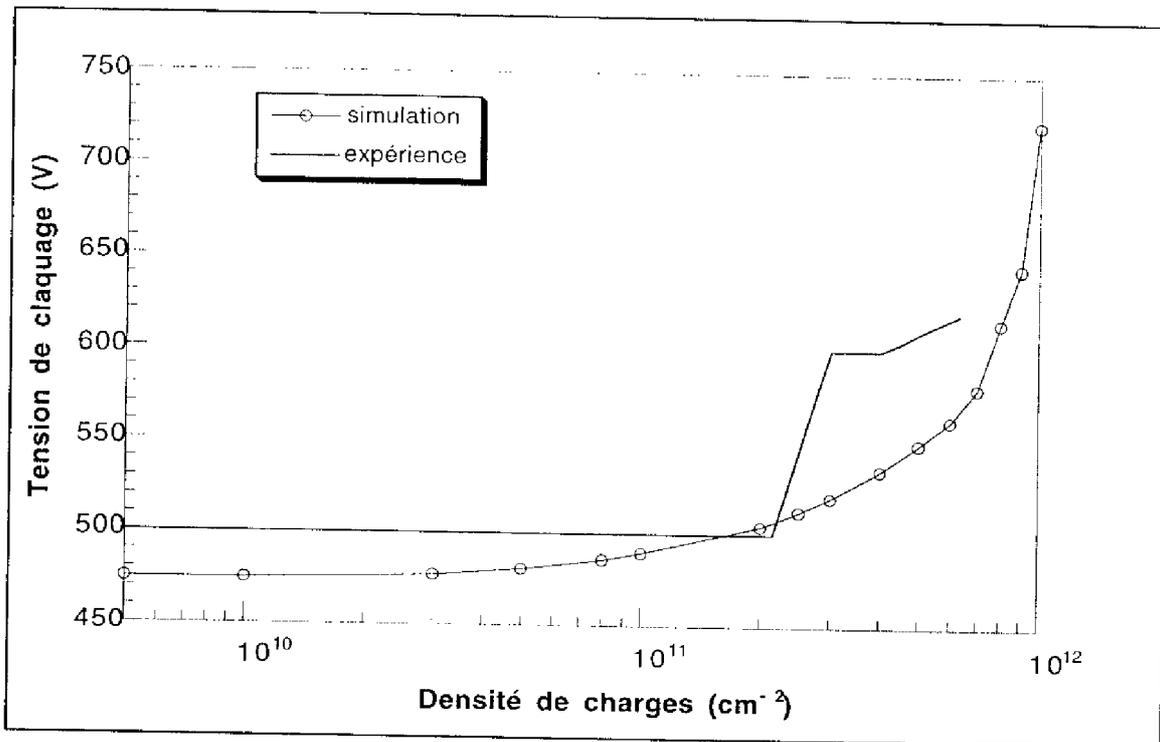
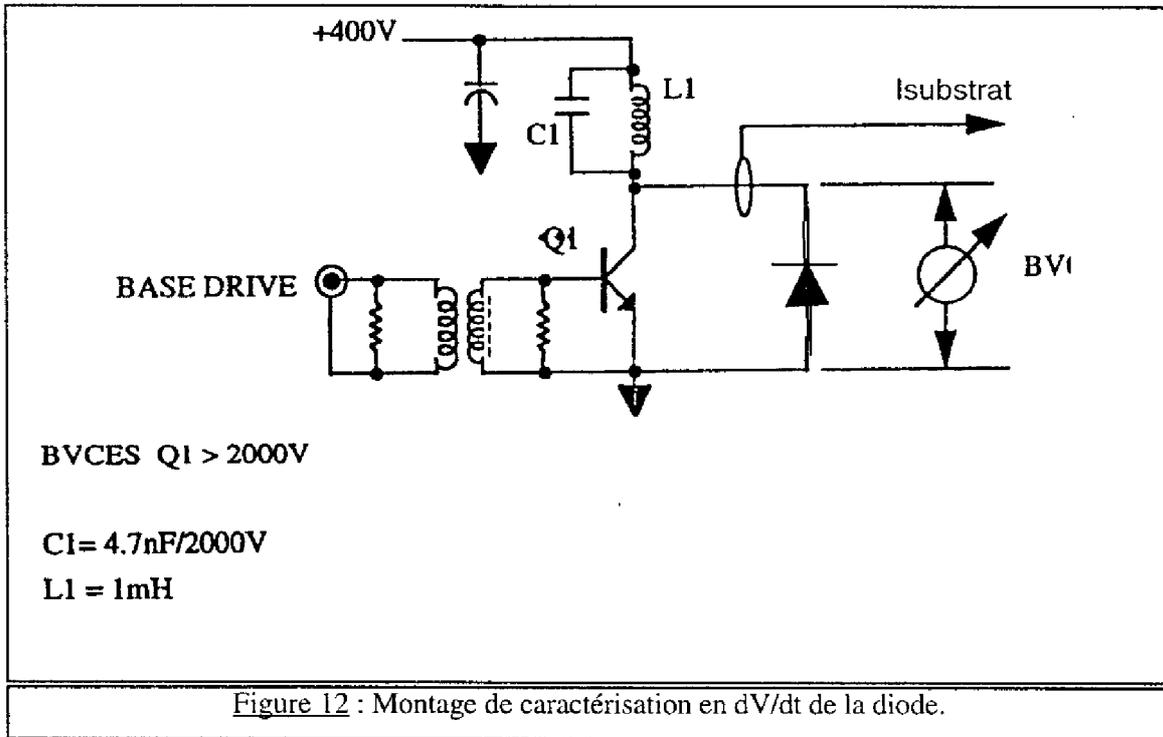


Figure 11 : Etude de l'influence des charges d'interface

3-4 : Etude en dynamique

Les mesures précédentes ont concerné uniquement les aspects statiques des structures que nous avons réalisées. Il est nécessaire d'étudier les propriétés de ces anneaux en régime transitoire. Les diodes testées ici sont réalisées sur un substrat dopé $1 \cdot 10^{14}$ cm^{-3} , de profondeur de jonction 13 μm et une distance inter-anneaux de 50 μm . Nous pouvons penser que si la

variation de tension de substrat est très rapide (attaque en dV/dt), les anneaux ne pourront plus jouer leur rôle de diviseur de potentiel. Une caractérisation expérimentale est effectuée (Figure 12) [Motorola]. On attaque la diode par une impulsion de tension négative délivrée par le circuit à gauche du composant à tester.



Le courant qui traverse la diode (polarisée en inverse) est essentiellement dû aux effets capacitifs et d'avalanche. Il est mesuré par une sonde placée sur l'anode. La tension et le courant de substrat sont enregistrés à l'aide d'un oscilloscope à mémoire. L'impulsion de tension appliquée a un temps de montée de $300 \text{ V}/\mu\text{s}$.

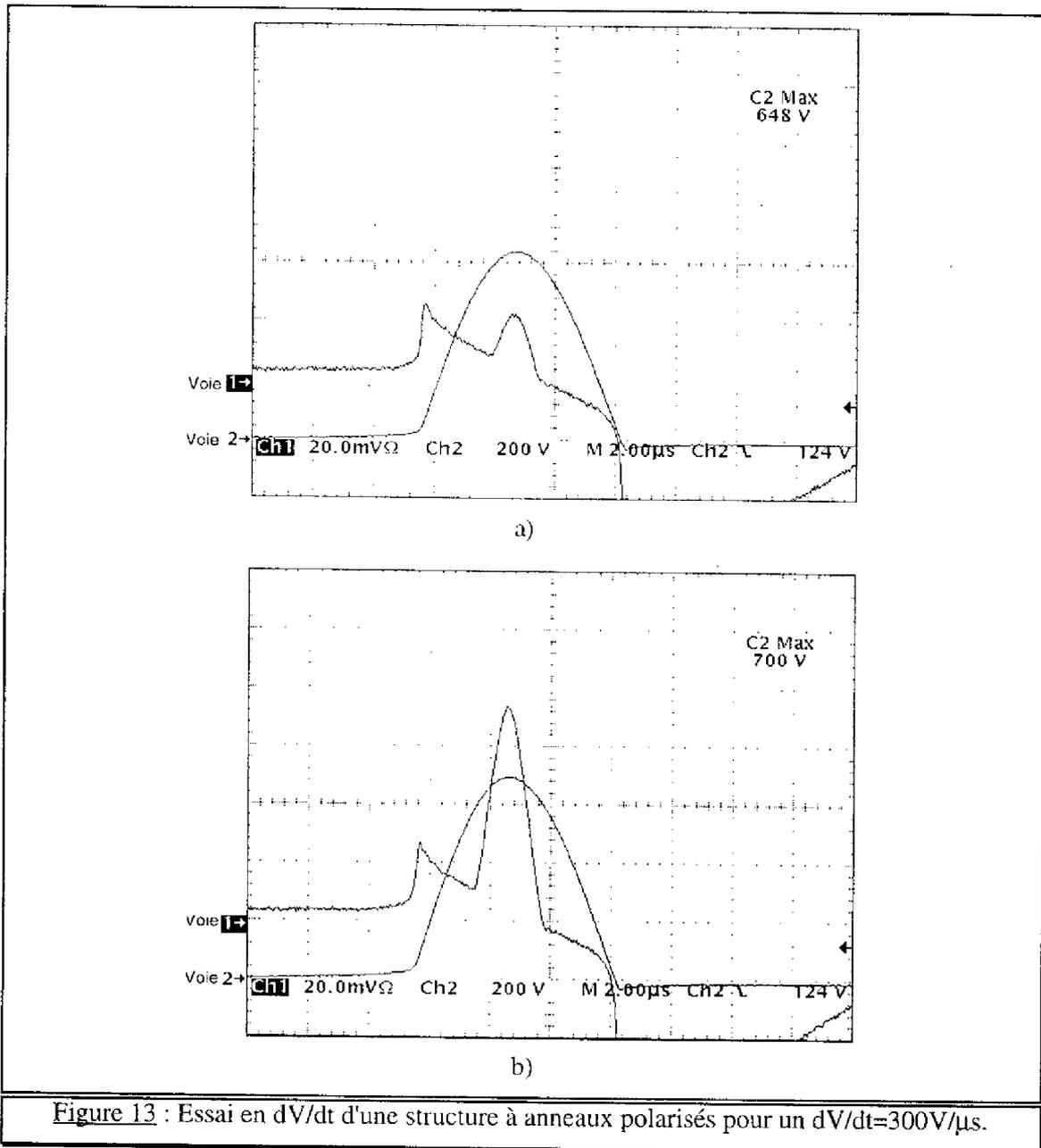


Figure 13 : Essai en dV/dt d'une structure à anneaux polarisés pour un $dV/dt=300V/\mu s$.

La figure 13 représente la tension de substrat appliquée (voie 2) et le courant dans le substrat (voie 1) d'une structure à anneaux polarisés. La forme de l'onde de courant est celle attendue (voir simulation chapitre 2 Figure 16) en dehors du courant d'avalanche au centre de l'onde. Lors du déclenchement de l'impulsion négative de tension (vers $5.2 \mu s$), on observe une augmentation du courant de l'ordre de 20 mA (1 graduation), due aux effets capacitifs de la diode ($I_{diode} = C_{diode} \frac{dV}{dt}$). La tension inverse continuant d'augmenter, la capacité de la diode, C_{diode} , diminue avec son extension de charge d'espace croissante et le courant dans la diode diminue (phase allant de 5.8 à $8 \mu s$ sur la figure 13a). A partir de ce moment, la tension inverse

est suffisamment grande autour de 700 V pour initier le phénomène d'avalanche, faisant apparaître un pic de courant de ce phénomène. Pour des faibles tensions (de 0 à 600 V) aucun pic de courant n'est mesurable dans la phase de montée. Pour une tension de 648 V (90% de la tension de claquage), un pic de courant de 20 mA (Figure 13a) est mesurable tandis qu'il atteint 75 mA lorsque nous approchons la tension de claquage (700 V).

Cette mesure prouve que la tenue en tension dynamique, pour des rampes de tension de 300V/ μ s est exactement égale à la tenue en tension statique, soit 700 V dans cette structure. L'efficacité de la terminaison par anneaux polarisés n'est donc pas modifiée pour des dV/dt allant jusqu'à 300V/ μ s : la répartition du potentiel entre les anneaux reste linéaire. Il pourrait sembler que la valeur de rampe de tension utilisée ici soit un peu faible par rapport aux applications potentielles de ce type de structures, qui peuvent demander des rampes de plusieurs milliers de volts par microsecondes. Cependant, cette valeur de 300 V/ μ s correspond au cahier des charges des applications d'éclairage (allumage de tubes fluorescents) ; notre technique de garde conviendrait donc tout à fait à des dispositifs dédiés à ces applications. De plus, il a été démontré récemment [9] que d'autres solutions envisagées pour ces applications, telle que la technique SIPOS, ne satisfaisaient pas à cette exigence et perdaient toute efficacité à ces valeurs de dV/dt. Nous reviendrons sur ce point au chapitre 4.

4-DISPOSITIFS A ECARTEMENT VARIABLE ET DIFFUSIONS ANODE/ANNEAUX SEPARÉES

Lors des réalisations technologiques précédentes, nous avons montré que :

- l'efficacité de la technique dépendait essentiellement de la distance anode-anneau, une distance faible entraînant une efficacité élevée.
- La structure a un courant de fuite important dû au passage en polarisation directe des anneaux lorsque la distance entre les anneaux est trop faible. Nous avons remarqué à partir de simulations bidimensionnelles (chapitre 2) que ce passage en direct se produisait en premier entre les deux derniers tours de la spirale.

Ceci nous a amené à modifier le jeu de masques de la façon suivante : nous avons choisi une distance anode-anneau faible pour améliorer l'efficacité de la technique puis nous avons fait croître les distances anneau-anneau suivantes pour supprimer le passage en direct.

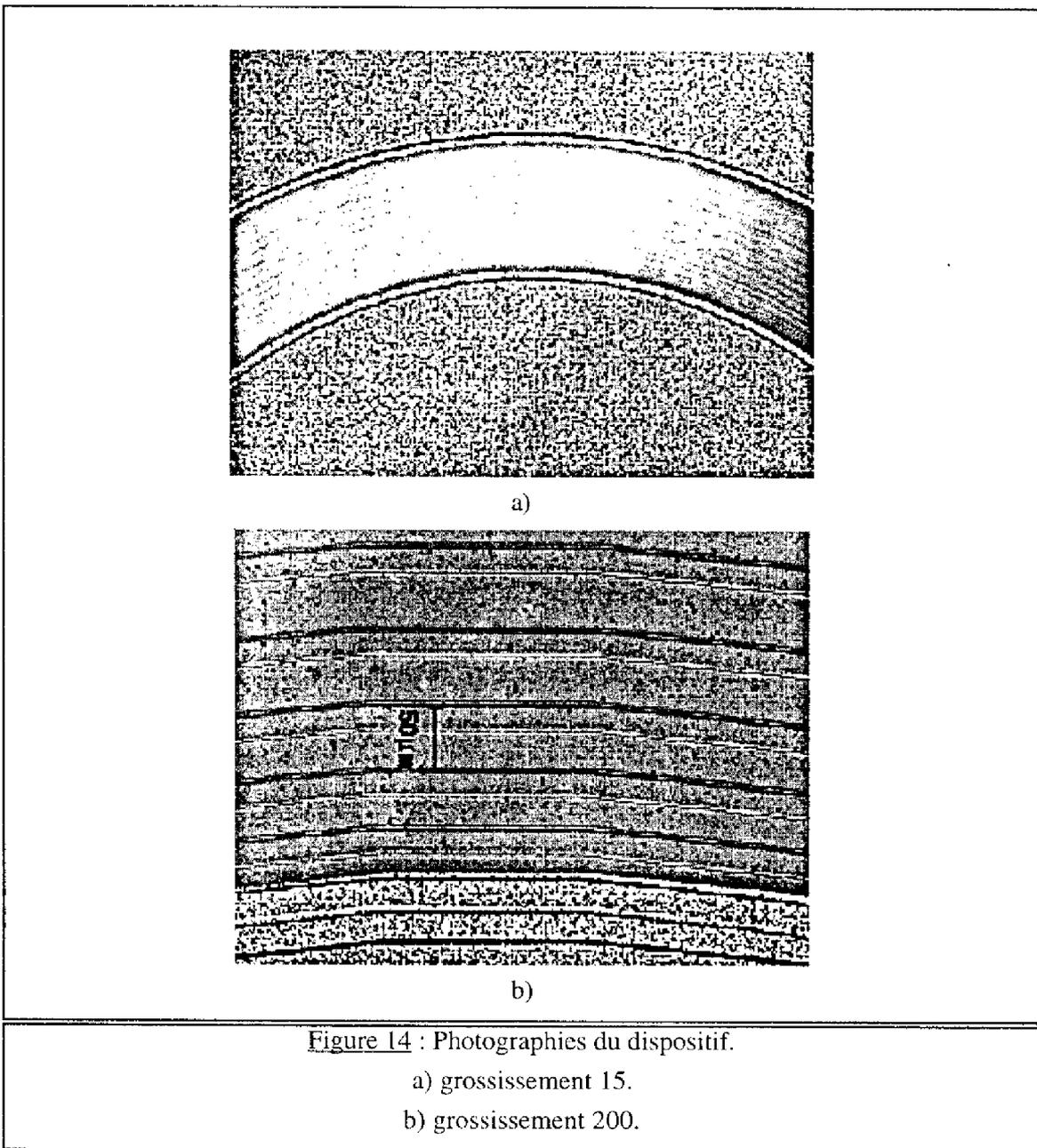
Le jeu de masques permettant de réaliser les dispositifs se composera de cinq niveaux correspondant aux phases technologiques suivantes :

- masque 1 : ouverture de la spirale (diffusion du P),
- masque 2 : ouverture de la jonction principale (diffusion du P⁺),
- masque 3 : ouverture du stop channel (prédépôt phosphore N⁺),
- masque 4 : ouverture des contacts,
- masque 5 : gravure du métal.

Les différentes étapes du processus technologique qui sont décrites au § 3 (Tableau 2) de ce chapitre, ne seront pas modifiées par rapport à la réalisation précédente. Nous avons choisi de faire varier la géométrie de chaque diode sur chacune des plaquettes de la manière suivante :

- toutes les structures ont un rayon d'anode de 1500 μm ,
- une structure ne comportera pas de spirale : c'est une jonction cylindrique sans protection permettant de faire une comparaison de la structure avec et sans protection,
- la première distance (la plus faible) variera entre 6.25 μm et 14.25 μm ,
- la distance entre les deux derniers tours de spirale est comprise entre 27 μm et 80 μm ,
- le nombre de tours sera pour la plupart des dispositifs au nombre de 8, mais il y aura également une structure de 12 tours et une autre de 18 tours.

La figure 14 représente des photographies des dispositifs à distances variables.



4-1 : Tenue en tension

Nous avons travaillé sur des substrats de différentes résistivités ainsi que sur des substrats épitaxiés afin de généraliser nos résultats à différents calibres en tension. Toutefois, les valeurs de géométrie utilisées correspondent à des règles de dessin optimisé pour un dopage de $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, identique au cas précédent. Aucun passage en direct n'a été observé dans ces structures, quelle que soit la distance séparant les deux derniers anneaux.

4-1-1 : Dispositifs en non limitation de charge d'espace

Nos composants ont été réalisés sur des plaquettes de silicium dopées au phosphore, d'orientation <100>, avec deux résistivités initiales de 19 $\Omega \cdot \text{cm}$ (le dopage est de $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) et 42 $\Omega \cdot \text{cm}$ (le dopage est de $8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$). La profondeur de la jonction principale est de 13 μm et celle de la spirale diffusée est de 7.5 μm . Ces structures sont en non limitation de charge d'espace. Le tableau 4 résume les résultats obtenus. Nous avons évalué la tension de claquage théorique de la jonction plane ainsi que les tenues en tension de la jonction cylindrique et des structures à l'aide d'une simulation ATLAS. Pour le dopage $8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, la tenue en tension plane est de 1560 V, et pour le dopage $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ la tenue en tension est de 850 V.

Dopage (cm^{-3})	structure	BVsimulation	BVexpérience	Efficacité
$8 \cdot 10^{13}$	Jonction cylindrique	490 V	520 V	34%
	$d_1=14 \mu\text{m}, d_8=45 \mu\text{m}$	893 V	950 V	61%
	$d_1=9.25 \mu\text{m}, d_8=79 \mu\text{m}$	996 V	1020 V	65%
	$d_1=8.25 \mu\text{m}, d_8=28 \mu\text{m}$	1069 V	1110 V	71%
	$d_1=7.25 \mu\text{m}, d_8=30 \mu\text{m}$	1106 V	1120 V	72%
	$d_1=6.25 \mu\text{m}, d_8=47 \mu\text{m}$	1180 V	1200 V	77%
	$d_1=6.25 \mu\text{m}, d_8=68 \mu\text{m}$	1206 V	1250 V	80%
$2 \cdot 10^{14}$	Jonction cylindrique	420 V	450 V	53%
	$d_1=14 \mu\text{m}, d_8=45 \mu\text{m}$	620 V	700 V	82%
	$d_1=9.25 \mu\text{m}, d_8=79 \mu\text{m}$	660 V	720 V	85%
	$d_1=8.25 \mu\text{m}, d_8=28 \mu\text{m}$	671 V	735 V	86%
	$d_1=7.25 \mu\text{m}, d_8=30 \mu\text{m}$	684 V	780 V	91%
	$d_1=6.25 \mu\text{m}, d_8=47 \mu\text{m}$	710 V	780 V	91%
	$d_1=6.25 \mu\text{m}, d_8=68 \mu\text{m}$	780 V	800 V	94%

Tableau 4 : Tenue en tension des structures à distances variables.

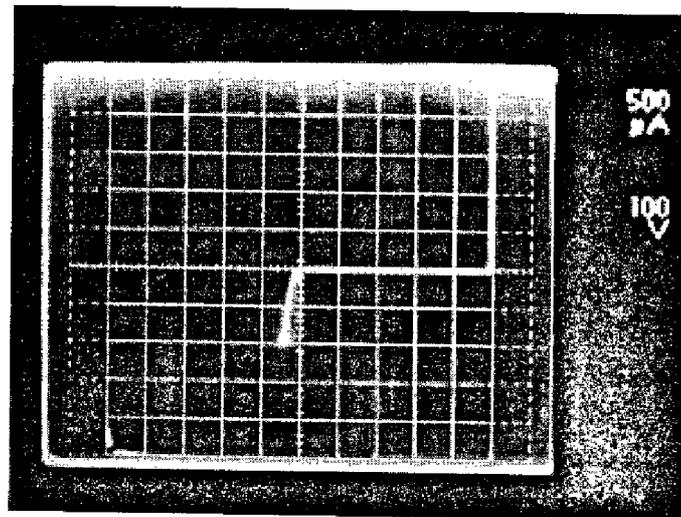
Nous obtenons un bon accord entre la simulation et l'expérience. L'efficacité de la technique est de 94% lorsque le dopage est de $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ et de 76% lorsque le dopage est de $8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Notons cependant que les règles de dessin ont été optimisées pour le dopage de $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ et que nous avons utilisés les mêmes masques pour $8 \cdot 10^{13}$.

Nous pouvons confirmer le fait que l'efficacité de la technique dépend fortement de la distance anode-1^{er}anneau. En effet, pour une distance faible de 6 μm , la tenue en tension est de 800 V tandis que pour une distance de 14 μm , la tenue en tension est de 700 V (Tableau 4).

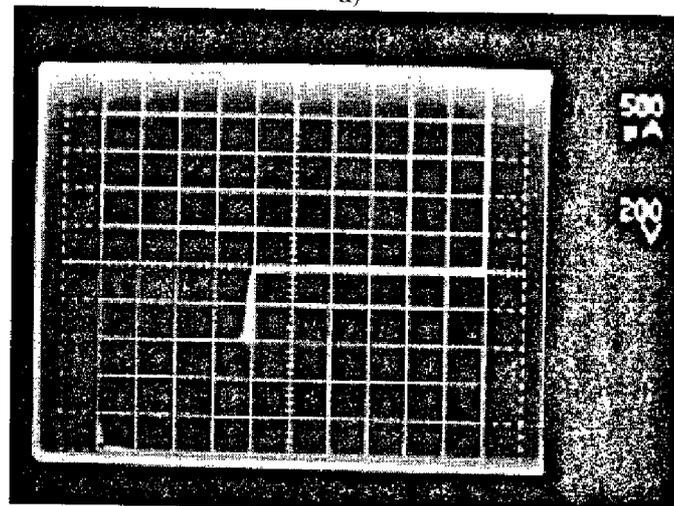
Lors du processus précédent la tenue en tension d'une diode avec spirale (pour une distance inter-anneau de 15 μm) était de 610 V. Pour une distance croissante, la tenue en tension est de 700 V, ce qui nous prouve bien que dans le cas de distances constantes la tension mesurée est faussée par le courant de fuite due au passage en direct des anneaux.

La figure 14 représente les caractéristiques I-V pour un dopage de substrat de $8.10^{13} \text{ cm}^{-3}$ en direct, ainsi qu'en inverse, des diodes avec et sans la spirale diffusée. On constate que la tenue en tension maximale obtenue d'une diode avec spirale est de 1220 V tandis que celle de la jonction cylindrique est de 520 V (rappelons qu'en simulation cette tenue en tension était de 490 V). On peut aussi noter sur ces courbes que le courant de fuite avant l'avalanche est très faible, inférieur à 50 μA , du fait de la grande résistance des spirales de ces structures, entre 10 M Ω et 30 M Ω .

Nous constatons également (Figure 15) que la tenue en tension maximale pour un dopage de substrat de $2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$ est de 800 V tandis que celle de la diode sans protection est de 420 V.



a)



b)

Figure 14 : Caractéristiques I(V) pour un dopage de substrat de $8.10^{13} \text{ cm}^{-3}$
($d_1=6.25 \mu\text{m}$, $d_s=68 \mu\text{m}$)

a) diode sans protection (520 V).

b) diode avec anneaux polarisés (1220 V).

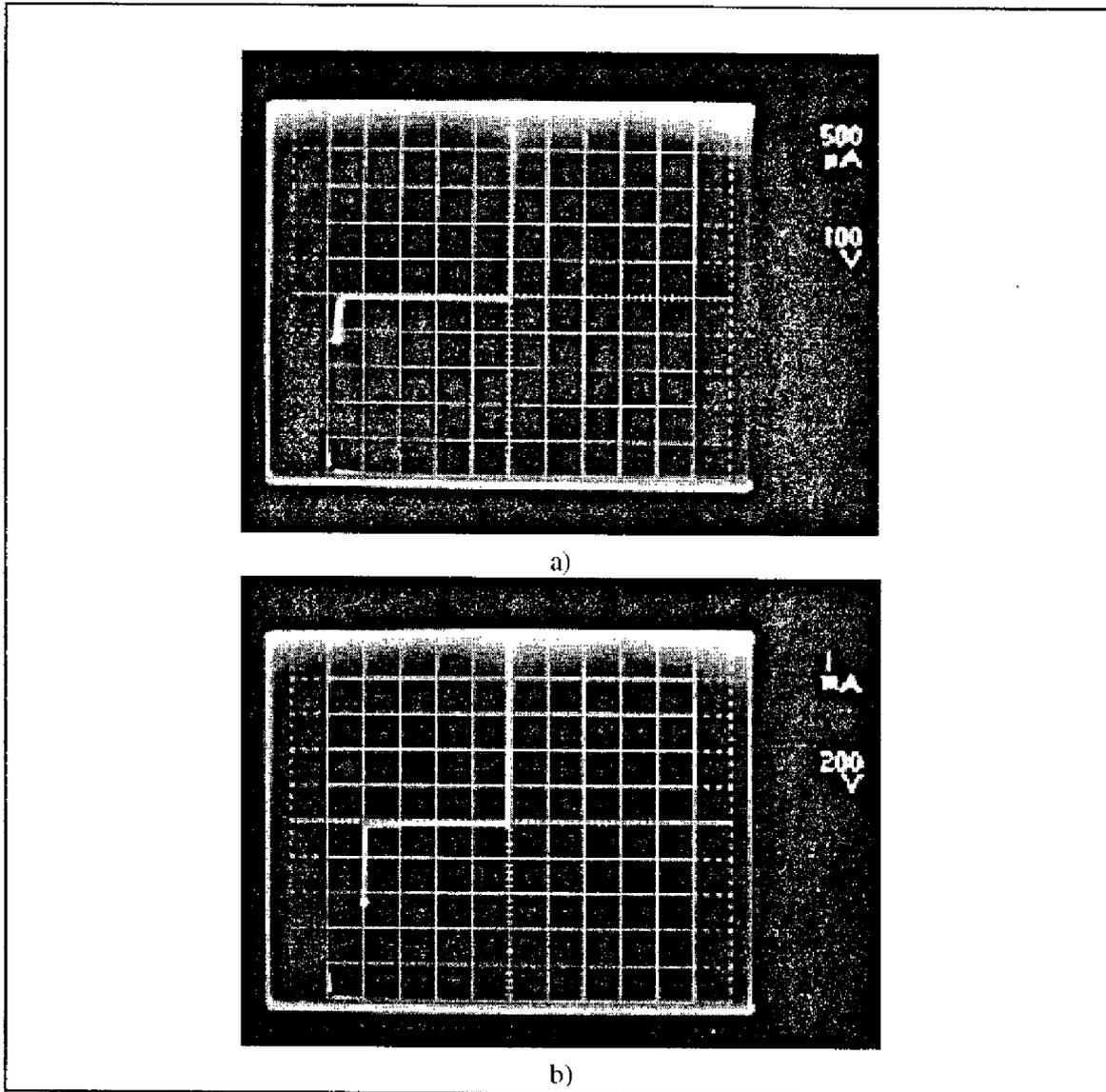


Figure 15 : Caractéristiques I(V) pour un dopage de substrat de $2.10^{14} \text{ cm}^{-3}$.

($d_1=6.25 \text{ }\mu\text{m}$, $d_g=68 \text{ }\mu\text{m}$)

a) diode sans protection (480 V).

b) diode avec anneaux polarisés (800 V).

4-1-2 : Dispositifs en limitation de charge d'espace

Nous avons réalisé nos composants sur un substrat épitaxié de type N/N⁺. La résistivité du substrat déterminée à partir d'une mesure quatre pointes est de $50 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ (le dopage est de $7.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$). L'épaisseur de l'épitaxie déterminée par "spreading résistance" est de $60 \text{ }\mu\text{m}$. A l'aide d'une simulation ATLAS [5], nous évaluerons la tension de claquage théorique de la jonction plane qui est de 1050 V . Nous avons reporté dans le tableau 5 les résultats obtenus

pour ces structures, ainsi que ceux obtenus (pour le même dopage) pour des structures en non limitation de charge d'espace ($W_{epi}=390 \mu\text{m}$ et $BV_p=1560 \text{ V}$).

W_{epi} (μm)	structure	BVsimulation	BVexpérience	Efficacité
390	Jonction cylindrique	490 V	525 V	34%
	$d_1=14 \mu\text{m}$, $d_8=45 \mu\text{m}$	893 V	950 V	61%
	$d_1=9.25 \mu\text{m}$, $d_8=79 \mu\text{m}$	996 V	1020 V	65%
	$d_1=7.25 \mu\text{m}$, $d_8=30 \mu\text{m}$	1106 V	1120 V	72%
	$d_1=6.25 \mu\text{m}$, $d_8=68 \mu\text{m}$	1206 V	1250 V	80%
60	Jonction cylindrique	502 V	540 V	51%
	$d_1=14 \mu\text{m}$, $d_8=45 \mu\text{m}$	860 V	920 V	88%
	$d_1=9.25 \mu\text{m}$, $d_8=79 \mu\text{m}$	894 V	970 V	93%
	$d_1=7.25 \mu\text{m}$, $d_8=30 \mu\text{m}$	920 V	995 V	95%
	$d_1=7.25 \mu\text{m}$, $d_8=30 \mu\text{m}$ spirale flottante		1023 V	97.5%
	$d_1=6.25 \mu\text{m}$, $d_8=68 \mu\text{m}$	950 V	1016 V	96.7%
	$d_1=6.25 \mu\text{m}$, $d_8=68 \mu\text{m}$ spirale flottante		1050 V	100%

Tableau 5 : Tenue en tension des structures à distance variable et influence de l'épaisseur de l'épitaxie.

Nous obtenons un bon accord entre simulation et expérience. Nous remarquons que l'épaisseur d'épitaxie a peu d'influence sur la tenue en tension cylindrique. En effet, la tenue en tension de la jonction cylindrique pour une structure en non limitation de charge d'espace est de 525 V tandis que, pour la structure en limitation de charge d'espace, elle est de 540 V. L'efficacité de la technique est de l'ordre de 80% quand la structure n'est pas en limitation de charge d'espace, tandis que les dispositifs en limitation de charge d'espace ont une efficacité supérieure à 95% pour une même géométrie de jonction. L'efficacité de la technique est meilleure lorsque les dispositifs sont en limitation de charge d'espace, ce qui confirme notre analyse au chapitre 2, § 3-2)

Dans les dispositifs décrits précédemment, le bout de la spirale était connecté à la cathode. De cette manière, le potentiel était imposé dans la spirale. Ceci était équivalent à un

pont résistif polarisé entre la masse (anode) et la haute tension (stop-channel). Une autre possibilité est de laisser la fin de la spirale flottante (la spirale n'est pas connectée au stop-channel). Le courant traversant le dispositif est celui de la jonction polarisée en inverse. Nous constatons que dans le cas où la spirale est flottante (Tableau 5), la tenue en tension augmente et se rapproche de la tenue en tension idéale. Le potentiel à la fin de la spirale augmente avec la tension inverse mais n'atteint jamais la tension de claquage de l'anode. La chute de tension entre deux tours de spirale est réduite. Krizaj [6] a étudié la structure à spirale flottante et a montré que la tenue en tension augmentait de 200 V lorsque la spirale était flottante (augmentation de la tenue en tension de 1200 V à 1400 V).

4-2 : Résistance de spirale

La résistance de la spirale dépend de la longueur de la spirale donc du nombre de tours de la spirale (voir Chapitre 1 § 6-6-2).

Nombres de tours	Surface occupée	Résistance de la spirale
8 tours	370 μm - 600 μm	10 M Ω
12 tours	500 μm	20 M Ω
18 tours	880 μm	30 M Ω

Tableau 6 : Influence du nombre de tours de spirale sur la résistance.

Nous constatons (Tableau 6) que la résistance de la spirale augmente avec le nombre de tours mais lorsque l'on augmente le nombre de tours, on augmente également la taille de la puce, donc la surface de silicium consommé et le coût du composant.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons prouvé la faisabilité de la technique des anneaux polarisés en vue de valider l'analyse numérique bidimensionnelle présentée préalablement dans le chapitre 2. Dans un premier temps, nous avons décrit le processus technologique à mettre en oeuvre en se basant sur les résultats issus des simulations des étapes technologiques par le logiciel ATHENA. Une première réalisation technologique (dispositifs à écartement constant et diffusion anode/anneaux commune) a permis de montrer que la technique des anneaux polarisés fonctionne. Cependant nous avons mis en évidence deux problèmes :

- la résistance de la spirale est trop faible provoquant un courant de fuite important.
- le phénomène de perçage se produit dans la structure.

Nous avons donc réalisé un deuxième processus technologique toujours à écartement constant mais en séparant les diffusions anode/anneau afin d'augmenter la résistance de la spirale et de diminuer le courant de fuite.

Un troisième processus technologique à écartement variable a été réalisé. Nous avons pour cela choisi une distance anode-anneau faible pour améliorer l'efficacité de la technique, et nous avons augmenté les distances anneau-anneau suivantes pour supprimer le phénomène de perçage. Nous pouvons conclure que les avantages de la technique des anneaux polarisés sont conformes à notre attente à savoir :

- Une **réalisation particulièrement simple**.
- La résistance de la spirale est trop faible si l'on réalise ensemble les diffusions d'anode et de spirale qui seront donc maintenant séparées. Ceci complique le procédé dans le cas de notre simple diode, mais ne devrait pas ajouter d'étape technologique dans le cas d'un procédé plus complexe où l'on peut utiliser des étapes préexistantes d'implantation P⁺ (pour l'anode) et P⁻ pour la spirale. Donc le **coût sera nul au niveau du procédé de fabrication**.
- Une efficacité de l'ordre de 70% pour des dispositifs à distance constante entre les anneaux. Cette efficacité est améliorée (de l'ordre de **85 à 95%**) lorsque les distances entre les anneaux sont variables, évitant que la structure ne se polarise en directe.
- L'efficacité peut être améliorée lorsque les dispositifs sont en limitation de charge d'espace. Nous obtenons une efficacité supérieure à 95%.
- Cette efficacité est de 100% lorsque la spirale est flottante.
- Un excellent comportement **vis-à-vis des charges d'interface**.
- Le courant de fuite est important comparé à d'autres terminaisons de jonctions. Ce courant de fuite peut être optimisé en jouant sur la résistance de la spirale. Le nombre minimum d'anneaux étant limité par la valeur de cette résistance, une structure à 8 anneaux permet d'avoir une résistance de forte valeur (10 M Ω).

- **La tenue en tension dynamique** (pour des rampes de tension de **300 V/μs**) **est égale à la tenue en tension statique**. Cette valeur de dV/dt correspond à certaines applications (allumage de tubes fluorescents). La structure à anneaux polarisés s'avère plus attractive pour la tenue en tension dynamique que la structure SIPOS (voir chapitre 4). Cependant, il serait souhaitable de procéder à l'étude en dV/dt de cette structure pour des $dV/dt > 300 \text{ V/}\mu\text{s}$ afin de déterminer pour quelles applications elle peut être utilisée.



CHAPITRE 4 : LA SPIRALE DE SIPOS

INTRODUCTION

Au premier chapitre, nous avons vu que la technique de linéarisation du potentiel en surface d'un semiconducteur, basée sur l'utilisation des couches semi-résistives de type SIPOS, était particulièrement performante. En effet, cette technique présente certains avantages [1], [2]:

- surface consommée faible,
- rendement supérieur à 90% par rapport à la tenue en tension plane théorique.

Nous allons maintenant présenter nos travaux sur une variante de la technique du SIPOS : la spirale de SIPOS qui est une combinaison de deux techniques, le SIPOS (linéarisation du potentiel en surface) [2] et la technique appelée SRFP (Scroll Shaped Resistive Field Plate) [3]. Cette dernière utilise une spirale en polysilicium pour linéariser par palier le potentiel dans le silicium, avec cependant un problème rédhibitoire de courant de fuite important. En effet, la résistivité maximale du polysilicium ($10^3 \Omega \cdot \text{cm}$) ne peut égaler celle du SIPOS ($10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ à $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$). Notre but est ici de prouver que l'efficacité de protection de la spirale SIPOS est équivalente à celle du SIPOS continu, et donc que l'on a intérêt à utiliser de préférence une structure spirale si l'on veut diminuer le courant de fuite dans la terminaison.

Ce chapitre s'organise de la façon suivante :

Nous présenterons la structure étudiée : la spirale de SIPOS. Nous évaluerons de manière qualitative la résistance de la spirale qui détermine le courant de fuite dans la structure.

Nous étudierons les paramètres critiques qui ont une influence sur la tension de claquage (i.e. distance anode stop-channel, longueur de la plaque de champ, largeur de la spirale et influence des charges d'interface).

Enfin, nous présenterons le procédé technologique ainsi que les résultats électriques obtenus.

1-PRESENTATION DE LA STRUCTURE

Lorsque l'on dispose d'un contact haute tension en surface (tel que le stop-channel), on peut linéariser le potentiel à la surface entre le contact basse tension (anode) et le contact haute tension ("stop-channel"). On dépose pour cela une couche semi-résistive (en interposant une couche d'oxyde) entre ces deux contacts, que l'on grave en spirale. Le rôle du SIPOS est d'imposer une répartition linéaire, par palier dans le cas d'une spirale, du potentiel à la surface du silicium entre les deux métallisations (anode et stop-channel).

Une telle structure est donnée par la figure 1.

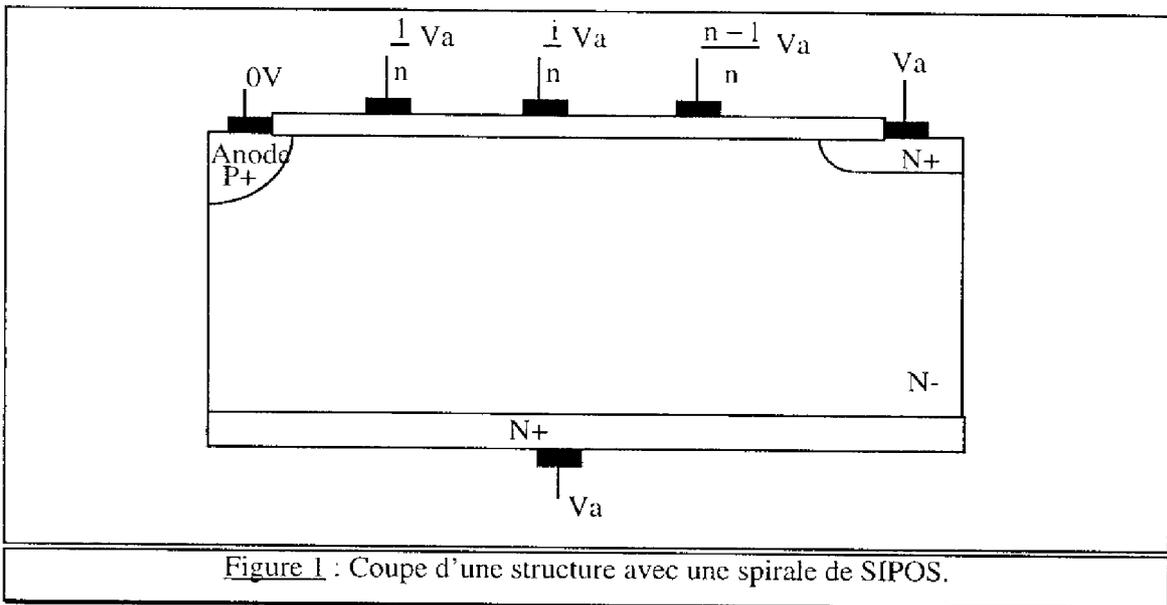


Figure 1 : Coupe d'une structure avec une spirale de SIPOS.

Cette technique est compatible avec la technologie Planar. Le courant de fuite dans la structure sera déterminé par la résistance du SIPOS. La gravure du SIPOS sera réalisée en forme de spirale. Le résultat est équivalent à un pont résistif polarisé entre la masse (anode) et la haute tension (stop-channel) grâce au contact sur la diffusion externe N^+ . De même que dans le cas des anneaux polarisés, la tension appliquée à chaque plaque s'écrit :

$$V_i = \frac{i}{n} V_a \quad (4.1)$$

où i est l'indice de la plaque de SIPOS, n le nombre total de tours de spirale, V_i la tension de la plaque i , V_a la tension appliquée sur le substrat.

Calculons la résistance du SIPOS :

a-Cas du SIPOS continu :

Soit un anneau de rayon interne r_1 et de rayon externe r_2 , ρ la résistivité du SIPOS et e l'épaisseur de l'anneau. La résistance de cet anneau de SIPOS est donnée par :

$$R = \rho \frac{e}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (4.2)$$

b-Cas du SIPOS en spirale :

Dans le cas d'une spirale de SIPOS, la résistance de la spirale est donnée par l'expression suivante :

$$R = R_{sh} \frac{L}{w} \quad (4.3)$$

où w est la largeur de la spirale, L la longueur de la spirale donnée par :

$$L = \frac{\pi}{b} (r_{max}^2 - a^2) \text{ et } r_{max} = a + bn_{max} \quad (4.4)$$

a est le rayon d'anode, b la distance entre les différents tours de la spirale et n_{max} le nombre total de tours.

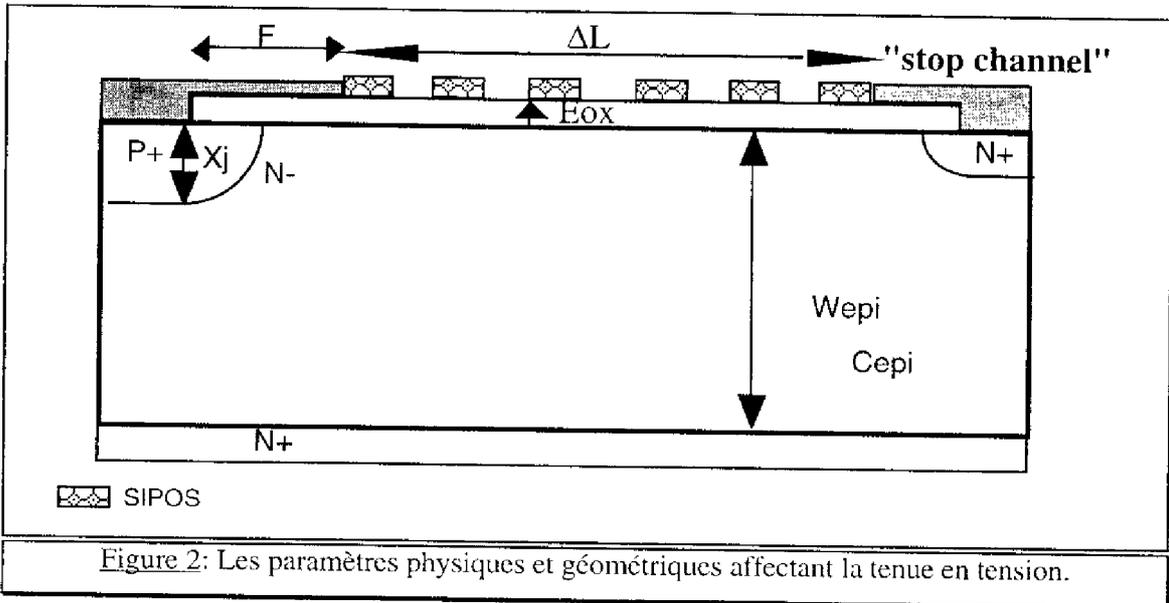
c-Comparaison de la résistance des deux structures :

Pour $\rho = 4.10^{10} \Omega.cm$, $r_1 = a = 2500 \mu m$, $r_2 = 2800 \mu m$, $n_{max} = 4$ et $b = 40 \mu m$, la résistance du SIPOS continu est de $51 M\Omega$ tandis que la résistance de la spirale de SIPOS est de $210 G\Omega$.

La spirale de SIPOS permet d'augmenter très fortement la résistance de la spirale et donc de diminuer le courant de fuite.

2-RESULTATS DE MODELISATION

Une étude des paramètres importants influençant la tenue en tension a été réalisée par simulation numérique 2D à l'aide du logiciel Power2D (cf. Annexe 1).



Il en ressort que pour un substrat dopé à $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, les dimensions géométriques à respecter pour avoir une efficacité de protection maximale sont les suivantes :

- distance fin de plaque de champ-stop-channel (ΔL sur la figure 2) au moins $60 \mu\text{m}$,
- longueur de débordement de la plaque de champ (F) au moins $25 \mu\text{m}$,
- la distance entre deux tours de spirale n'a que très peu d'influence sur la tenue en tension. De $10 \mu\text{m}$ à $30 \mu\text{m}$, la tension de claquage varie seulement de 8 V . Nous prendrons donc une valeur constante minimale de $10 \mu\text{m}$.
- la largeur de la spirale influe sur la largeur de la zone de silicium qui verra son potentiel imposé. Cette longueur variera de 35 à $50 \mu\text{m}$.

3-REALISATIONS TECHNOLOGIQUES

Sur la base des résultats précédents, nous avons réalisé un procédé technologique pour fabriquer des diodes protégées par du SIPOS continu et du SIPOS en spirale.

3-1 : Description du processus technologique

Nous allons décrire le processus technologique de fabrication en présentant, pour chaque étape, les dessins des différents niveaux de masques qui sont au nombre de 5. Les composants ont été réalisés sur des plaquettes de silicium dopées au phosphore, d'orientation $\langle 100 \rangle$.

Les étapes de réalisation, en grande partie équivalentes à celles du processus de réalisation des diodes à anneaux polarisés, sont les suivantes :

- Nettoyage du silicium,
- Oxydation de masquage : 1 μm ,
- Ouverture d'implantation de l'anode,
- Oxyde d'implantation : 500 \AA ,
- Implantation ionique : une dose de $8 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ avec une énergie de 50 KeV,
- Redistribution du bore implanté,
- Réalisation du stop channel et de la face arrière,
- Redistribution du phosphore,
- Dépôt du SIPOS,
- Gravure du SIPOS en spirale,
- Ouverture des contacts,
- Métallisation : 8000 \AA d'aluminium,
- Photogravure du métal.

Nous avons réalisé deux types de diodes circulaires de rayons 1500 et 2500 μm . La structure comporte 4 tours de spirale dont l'inter-distance est de 10 μm , la largeur de la spirale en SIPOS variant de 35 à 50 μm pour la diode de rayon 2500 μm et fixée à 40 μm pour la diode de rayon 1500 μm . Dans le but de comparer les performances du SIPOS continu et de la spirale de SIPOS, les deux types de structures ont été réalisés.

La couche de SIPOS nécessite une couche très résistive pour la protéger : oxyde de type CVD ou nitrure.

Afin de simplifier le processus, Jaume [1] a proposé d'utiliser une deuxième couche de SIPOS dont la résistivité serait plus grande (le ratio des gaz $(N_2O)/(SiH_4)=0.3$) qui est réalisée dans le même cycle que la première couche à 0,12. La première couche permet de linéariser le potentiel entre le bord de la plaque de champ et le contact « stop channel » tandis que la deuxième couche sert de passivation.

Le dépôt de SIPOS est réalisé par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur (LPCVD) à une température de 635 °C et une pression de 400 mT. Le dépôt obtenu est constitué de deux couches, une première au contact de l'oxyde d'une épaisseur de 3200 Å avec un ratio des gaz protoxyde d'azote/silane de 0,12 ; la deuxième couche a également une épaisseur de 3200 Å avec un ratio de $[N_2O]/[SiH_4]$ de 0,24.

La gravure ionique réactive du SIPOS (gravure plasma) est réalisée par un bombardement ionique sous ambiance SF_6 . Cette attaque est sélective entre le SIPOS et l'oxyde thermique et sa vitesse est d'environ 0,6 $\mu m/mn$. Le réacteur utilisé pour la réalisation de cette étape technologique est équipé d'un reflectomètre laser permettant d'assurer le suivi en temps réel de la gravure et donc un contrôle précis de la profondeur gravée.

Des exemples de photos des structures réalisées (SIPOS continu et spirale de SIPOS) sont donnés sur la figure 3.

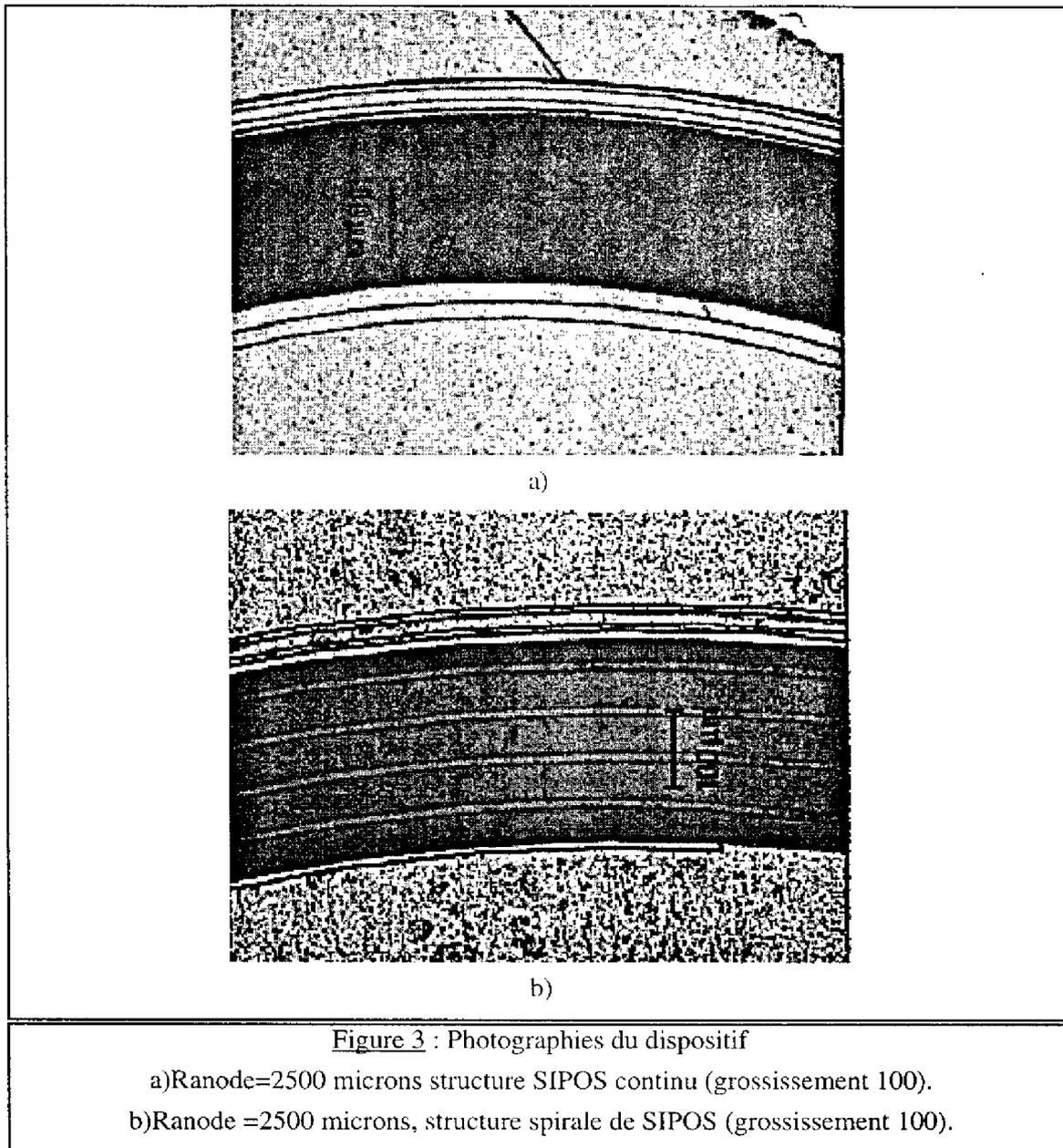


Figure 3 : Photographies du dispositif

- a) Ranode=2500 microns structure SIPOS continu (grossissement 100).
- b) Ranode =2500 microns, structure spirale de SIPOS (grossissement 100).

3-2 : Tenue en tension

Nous avons fabriqué des diodes protégées par SIPOS sur 3 substrats différents, deux massifs de dopages 10^{14} et $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, et un épitaxié de concentration $7.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ et d'épaisseur $60 \mu\text{m}$.

Il est à noter que dans toutes les réalisations technologiques, le masque définissant la spirale de SIPOS correspond en fait à celui des anneaux polarisés et n'a donc pas fait l'objet d'une optimisation particulière.

Un des procédés comporte exactement les mêmes masques que les diodes avec anneaux polarisés, mais le dessin du masque de métallisation impose que le SIPOS contacte directement la région d'anode avec les inconvénients que nous connaissons [1] (noté SIPOS dans le tableau 1). Pour le second procédé, nous avons dessiné un masque métallisation spécifique pour ajouter une plaque de champ entre le contact d'anode et le SIPOS (dénomé SIPOS + FP dans le tableau 1).

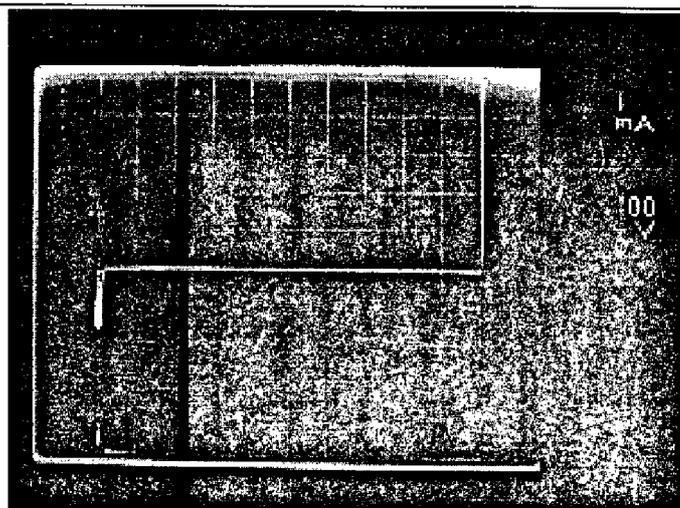
Dopage (cm^{-3})	W_{epi}	BV_p / BV_{cyl}	Technique	BV_{mesure}	$BV_{\text{simulation}}$	Efficacité (%)
2.10^{14}	massif	850/420	SIPOS	600 V	550 V	72
	massif		Spirale SIPOS	600 V	558 V	72
	massif		SIPOS+FP	700 V	612 V	85
	massif		Spirale SIPOS+FP	700 V	662 V	85
10^{14}	massif	1420/540	SIPOS	1000 V	916 V	71
	massif		Spirale SIPOS	1000 V	979 V	71
$7.5 \cdot 10^{13}$	60 μm	1020/550	SIPOS+FP	1000 V	904 V	98
	60 μm		Spirale SIPOS+FP	1000 V	979 V	98

Tableau 1 : Tenue en tension des structures SIPOS et spirale SIPOS.

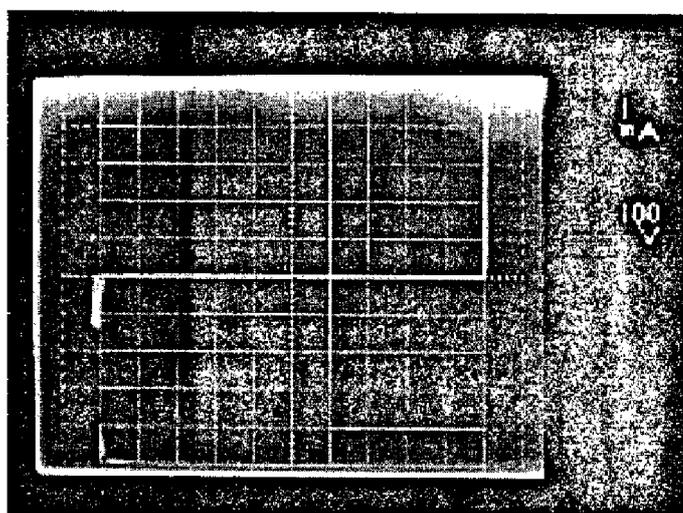
Les résultats de tenue en tension sont consignés dans le tableau 1. Nous pouvons faire les remarques suivantes :

- la tenue en tension est exactement la même pour le SIPOS continu et le SIPOS spirale, avec pour cette dernière un avantage certain quant au courant de fuite (voir § 3-3),
- l'adjonction de la plaque de champ permet de gagner 100 V sur la tenue en tension et porter l'efficacité de protection de 72 à 85%,
- l'efficacité de protection atteint 98% dans le cas des substrats épitaxiés. Cette constatation rejoint celle faite lors des travaux de D. Jaume [1]. En effet, l'épaisseur d'épitaxie a une influence verticale (sur la tenue en tension plane) et n'a pas d'influence latérale (sur la tenue en tension cylindrique).

La figure 4 représente les caractéristiques I-V de la structure SIPOS (a) et de la structure spirale SIPOS (b) pour un dopage de $7.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.



a)



b)

Figure 4 : Caractéristiques I(V) pour un dopage de $7.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ et $W_{\text{epi}} = 60 \mu\text{m}$.

a) diode SIPOS (1000 V)

b) diode spirale SIPOS (1000 V).

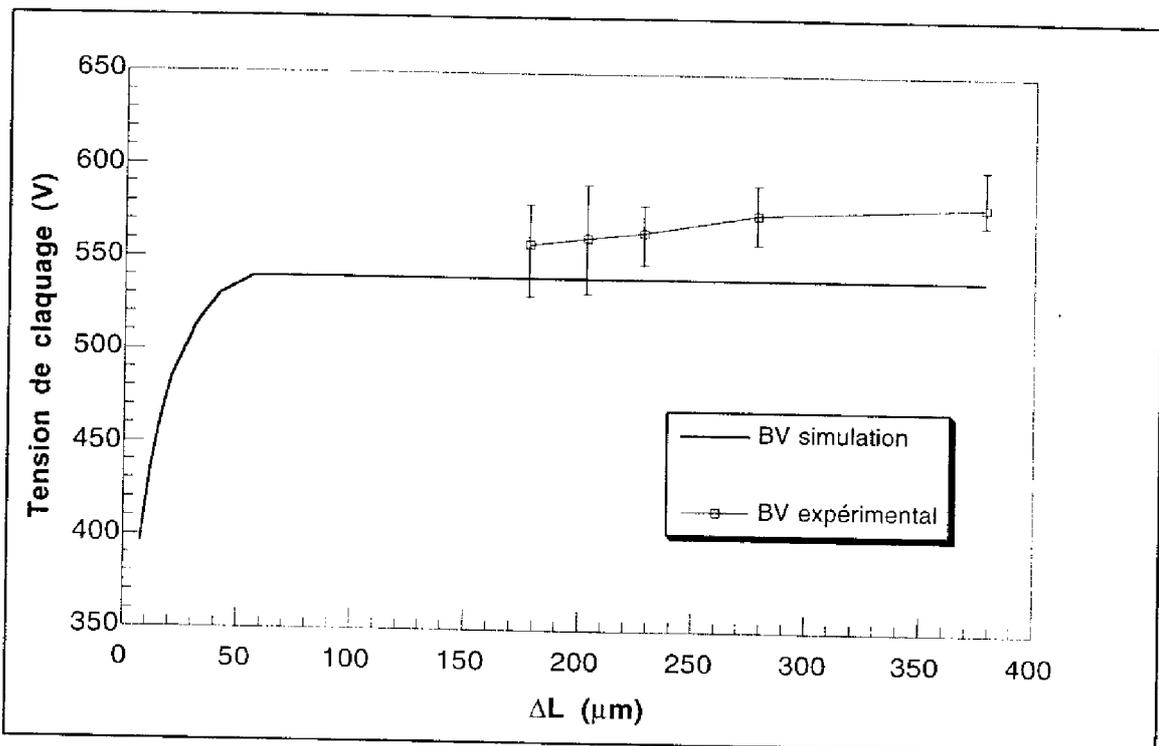


Figure 5 : Tenue en tension en fonction de ΔL .

La figure 5 représente les variations de la tension de claquage en fonction de la distance entre la jonction principale et le stop channel. Ce paramètre intervient sur la tenue en tension lorsque la distance entre la jonction principale et le stop-channel est faible. La tension de claquage augmente lorsque la distance entre la jonction principale et le stop-channel augmente. Nos résultats expérimentaux correspondent à des valeurs pour lesquelles cette distance n'a plus d'influence et où la tension de claquage est constante.

3-3 : Courant de fuite

Nous avons mesuré la résistance de la spirale de SIPOS et celle du SIPOS. Pour la structure SIPOS, nous avons des résistances de l'ordre de 30 à 50 M Ω correspondant aux valeurs estimées au §1, tandis que pour la spirale de SIPOS, nous n'avons pas pu mesurer cette résistance : elle dépasse la limite de mesure qui est de 60 M Ω . **La spirale de SIPOS permet d'augmenter très fortement la résistance de la spirale et donc de diminuer le courant de fuite dans la structure.**

3-4 : Etude de l'influence des charges d'interface

Comme nous l'avons fait précédemment, nous voulons tester la sensibilité de cette technique à la présence de charges d'interface, résiduelles du procédé technologique ou introduites par des radiations ionisantes. Nous avons simulé la tenue en tension de diodes par du SIPOS avec une densité de charges à l'interface silicium/oxyde comprise entre 10^{10} cm^{-2} et $6.10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

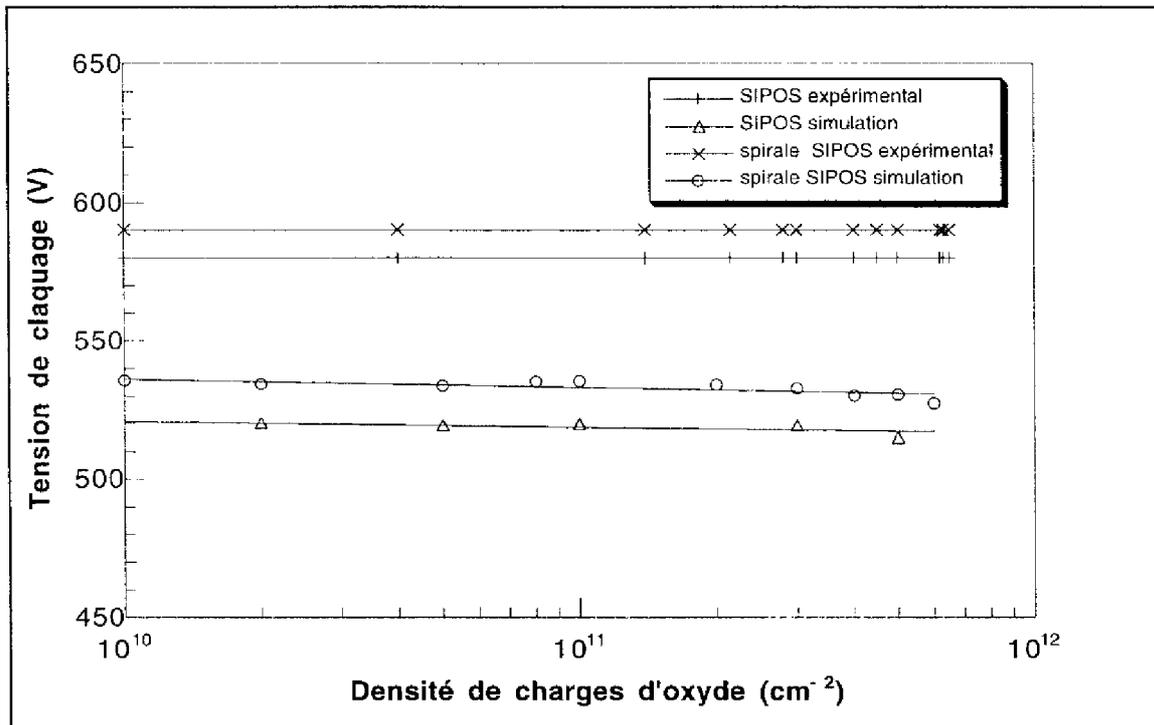


Figure 6 : Influence des charges d'interface sur la structure SIPOS et spirale de SIPOS (expérimental et simulation).

La figure 6 représente les variations de la tenue en tension simulée et expérimentale en fonction de la densité de charges présente à l'interface de la structure SIPOS ainsi que la structure spirale de SIPOS.

Nous constatons que ces charges introduites à l'interface n'ont aucune influence sur la tension de claquage, à la fois pour la structure SIPOS et pour la structure spirale SIPOS. Une coupe du champ électrique à la surface du semiconducteur (Figure 7) montre que celui-ci n'est pratiquement pas modifié de même que le potentiel à la surface du silicium (Figure 8) ; celui-ci reste linéaire entre le potentiel de l'anode (qui est à la masse) et le stop-channel (haute tension).

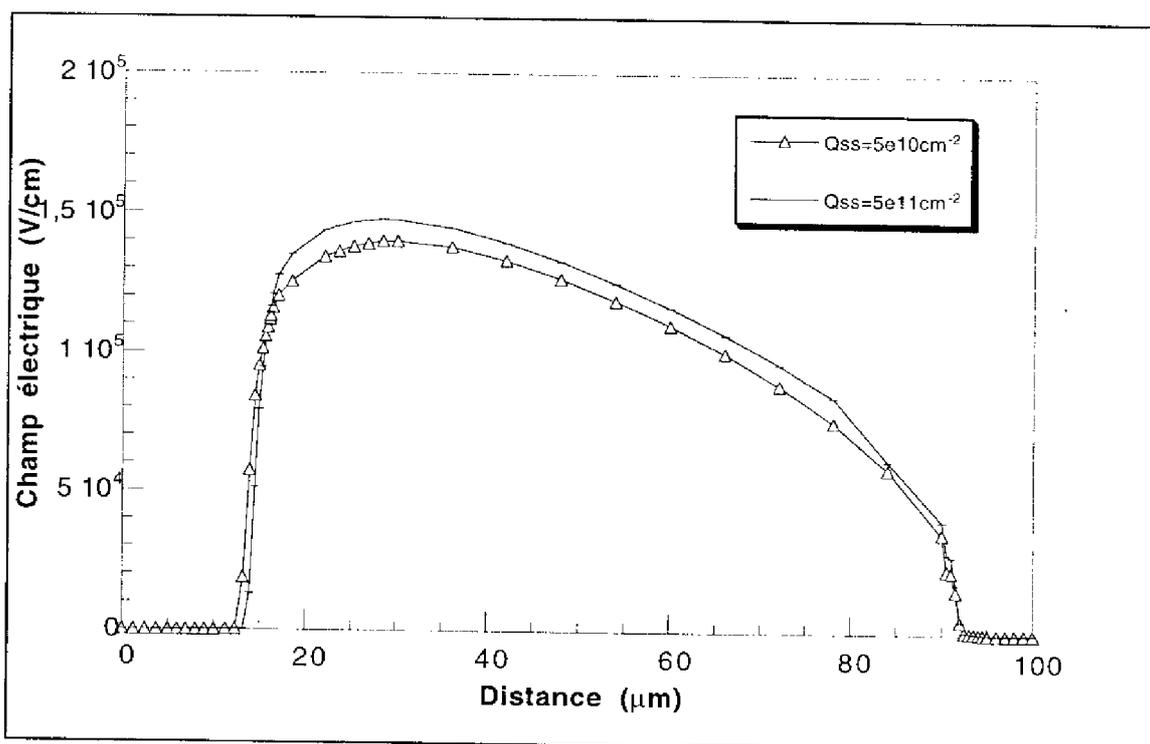


Figure 7 : Coupe de champ électrique à la surface.

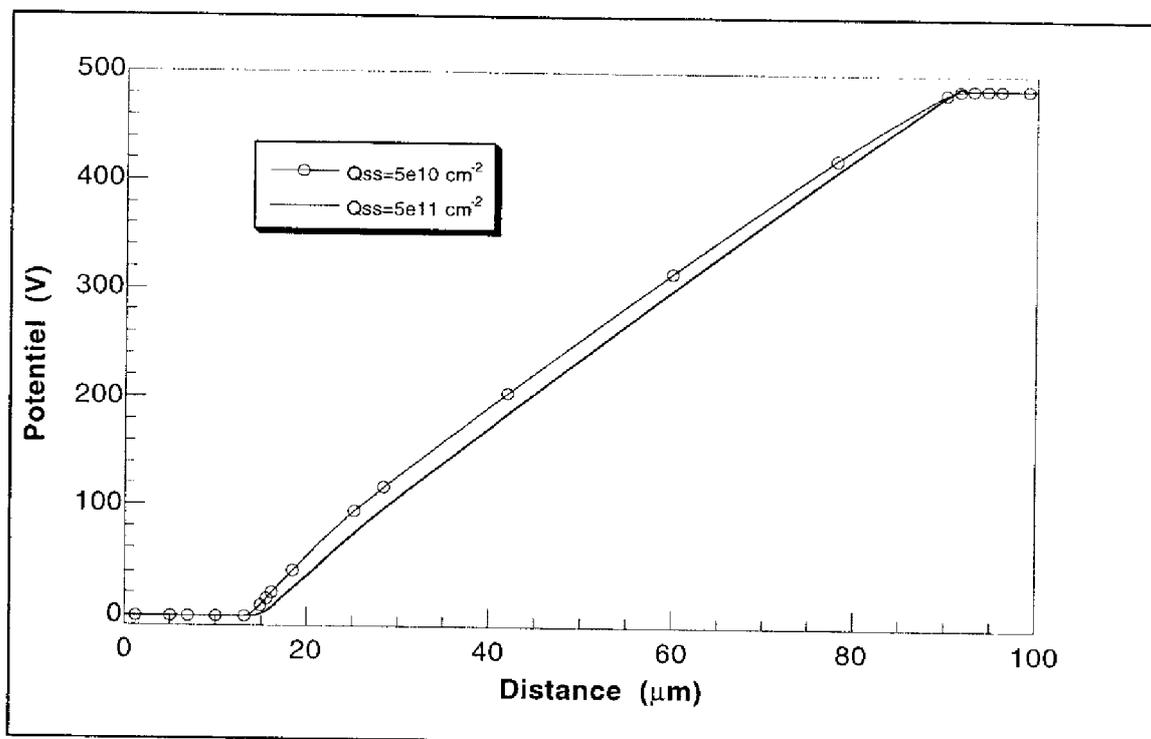


Figure 8: Potentiel à la surface du SIPOS avec et sans charge.

3-5 : Influence des charges d'interface : comparaison avec d'autres techniques

Nous allons comparer l'influence des charges d'interface sur les dispositifs suivants : les anneaux polarisés, le SIPOS, la spirale de SIPOS et les jonctions avec JTE (Junction Termination Extension) [4].

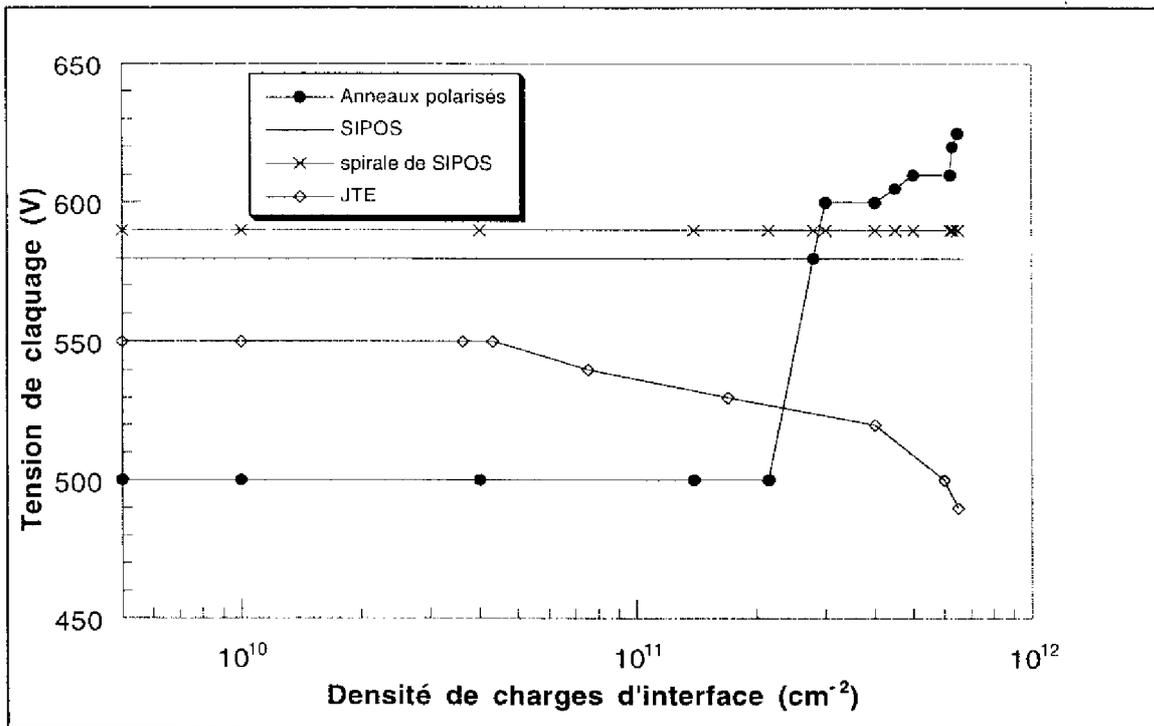


Figure 9 : Influence expérimentale des charges d'interface : comparaison entre différentes techniques.

Pour la technique des anneaux polarisés, nous avons vu que les charges d'interface augmentaient la tenue en tension des dispositifs (voir Chapitre 2 et Chapitre 3).

Le SIPOS et la spirale de SIPOS sont des techniques totalement insensibles aux charges d'interface : le claquage est constant quelle que soit la quantité de charges présentes à l'interface.

Nous avons irradié des diodes avec JTE, qui avaient été réalisées au laboratoire [5]. Pour cette structure, la tension de claquage diminue lorsque les charges dans l'oxyde augmentent. Les résultats obtenus par simulation sont tout à fait en accord avec l'expérience (Figure 10).

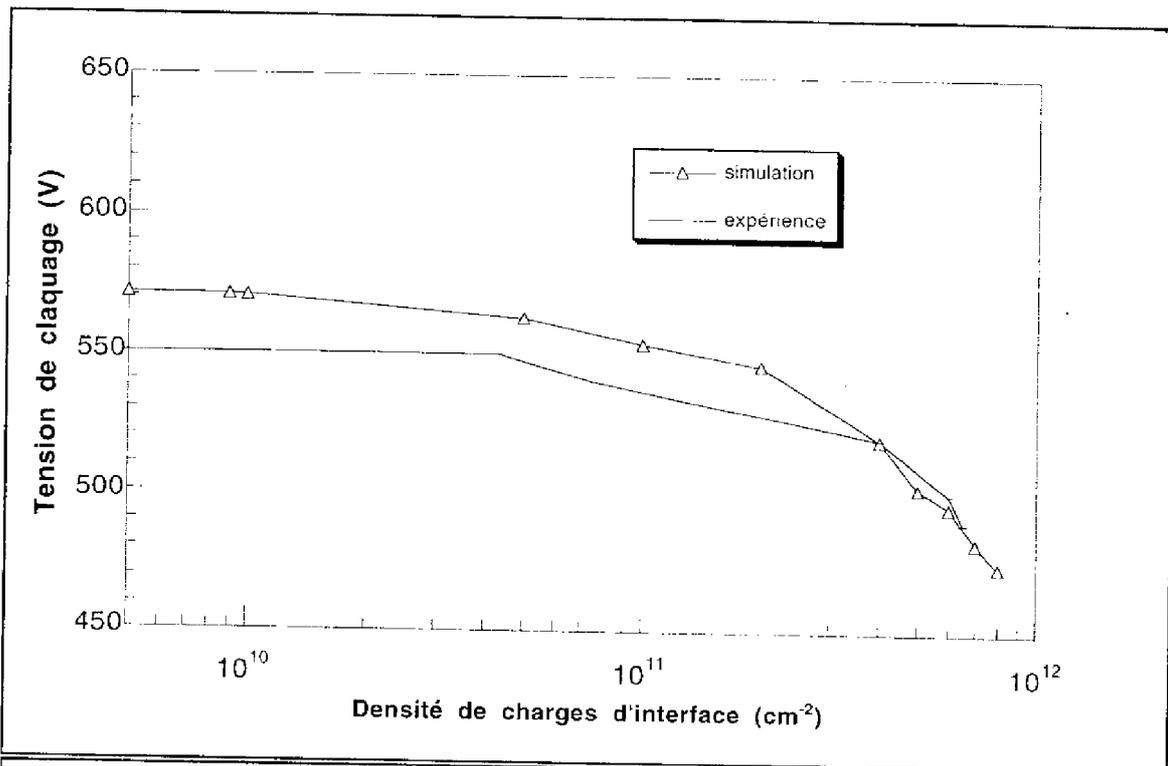


Figure 10 : Influence des charges d'interface sur la structure JTE (expérience et simulation).

Ce comportement peut être expliqué par le fait que l'efficacité de la technique JTE est fortement dépendante de la dose P⁺ implantée à la surface. Les charges dans l'oxyde modifient cette dose. Nous avons vu (Chapitre 1) qu'il existe une dose optimale conduisant à une tenue en tension maximale de 550 V, pour un substrat dopé à $2.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Pour cette dose optimale, la distribution du champ électrique, est uniforme le long de la terminaison et il existe des pics de champs, d'amplitudes équivalentes, dans les deux régions. Si la dose est trop importante, un maximum de champ électrique se situe à la fin de la terminaison, la distribution du champ électrique n'est pas uniforme et la structure n'est pas optimisée. La tenue en tension chute de 15% quand les charges présentes à l'interface atteignent une densité de $5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

La figure 11 est une représentation 2D de la différence des champs électriques pour une structure avec des charges d'oxyde ($5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) et sans charges dans l'oxyde. Cette différence est positive au bord de la terminaison de jonction et est négative le long de la région plane.

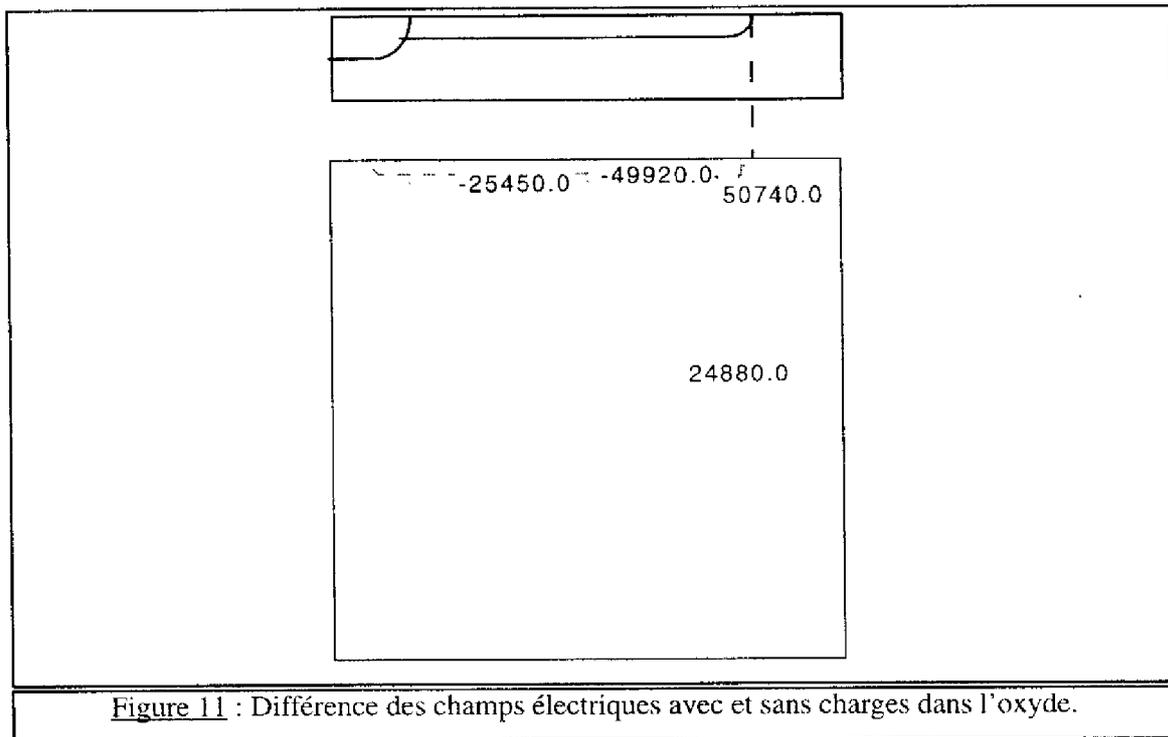


Figure 11 : Différence des champs électriques avec et sans charges dans l'oxyde.

3-6 : Etude dynamique

Comme nous l'avons fait dans le cas des anneaux polarisés (chapitre 3, § 3-4), nous voulons tester la tenue en tension dynamique des diodes protégées par du SIPOS continu et à spirale lorsque l'on applique une rampe de tension de $300 \text{ V}/\mu\text{s}$. Cette étude restera au stade préliminaire. Les diodes testées ici sont réalisées sur un substrat dopé 10^{14} cm^{-3} avec une profondeur de jonction de $13 \mu\text{m}$. Lors de la mise sous boîtier, nous avons rencontré certains problèmes (tels que la découpe des composants, encapsulation...) qui ont dégradé la tenue en tension statique. La tenue en tension de ces structures est alors de 850 V .

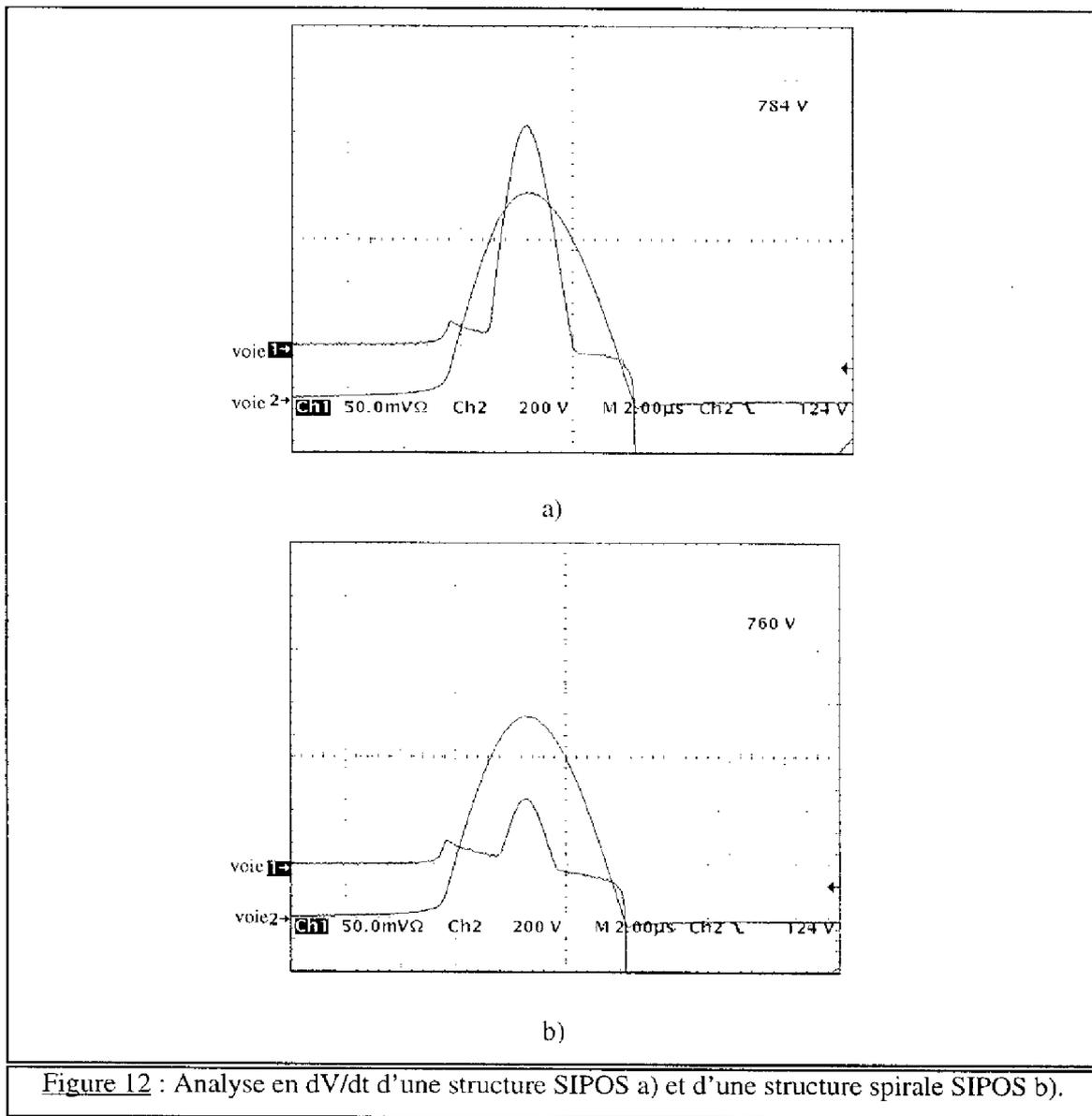
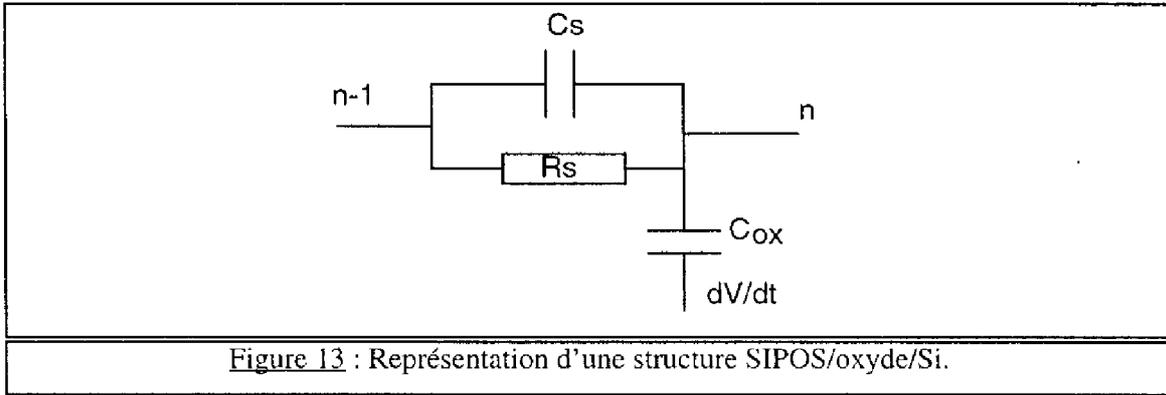


Figure 12 : Analyse en dV/dt d'une structure SIPOS a) et d'une structure spirale SIPOS b).

La figure 12 représente la tension de substrat appliquée (voie 2) et le courant de substrat (voie 1) d'une structure SIPOS et spirale de SIPOS. Lors du déclenchement de l'impulsion négative de tension (vers $5.2 \mu s$), on observe une augmentation du courant de la diode. La tension inverse continuant d'augmenter, la capacité de la diode diminue. Lorsque l'on arrive à 80% de la tenue en tension de la structure, un pic de courant est mesurable dans la phase de montée (entre 26 mA et 220 mA) et variable selon les échantillons pour la structure SIPOS et la structure spirale de SIPOS. La tenue en tension dynamique pour ces rampes de tension de $300 V/\mu s$ n'est pas la même qu'en statique. L'efficacité de la technique est modifiée pour des rampes de tension de $300 V/\mu s$.

La couche de SIPOS peut être modélisé [6] par un réseau R_s, C_s ; R_s et C_s représentent la résistance et la capacité de la couche de SIPOS. La figure 13 donne le circuit équivalent d'une structure SIPOS/oxyde/silicium ; C_{ox} étant la capacité d'oxyde.



Nous avons réalisé des simulations SPICE. La figure 14 représente la répartition de potentiel en surface lors de la polarisation statique et lorsque l'on applique un dV/dt de 300 V/ μ s. On remarque que la répartition du potentiel entre les anneaux n'est plus linéaire mais parabolique. Le potentiel près de la jonction principale est trop élevé, entraînant le claquage de la structure.

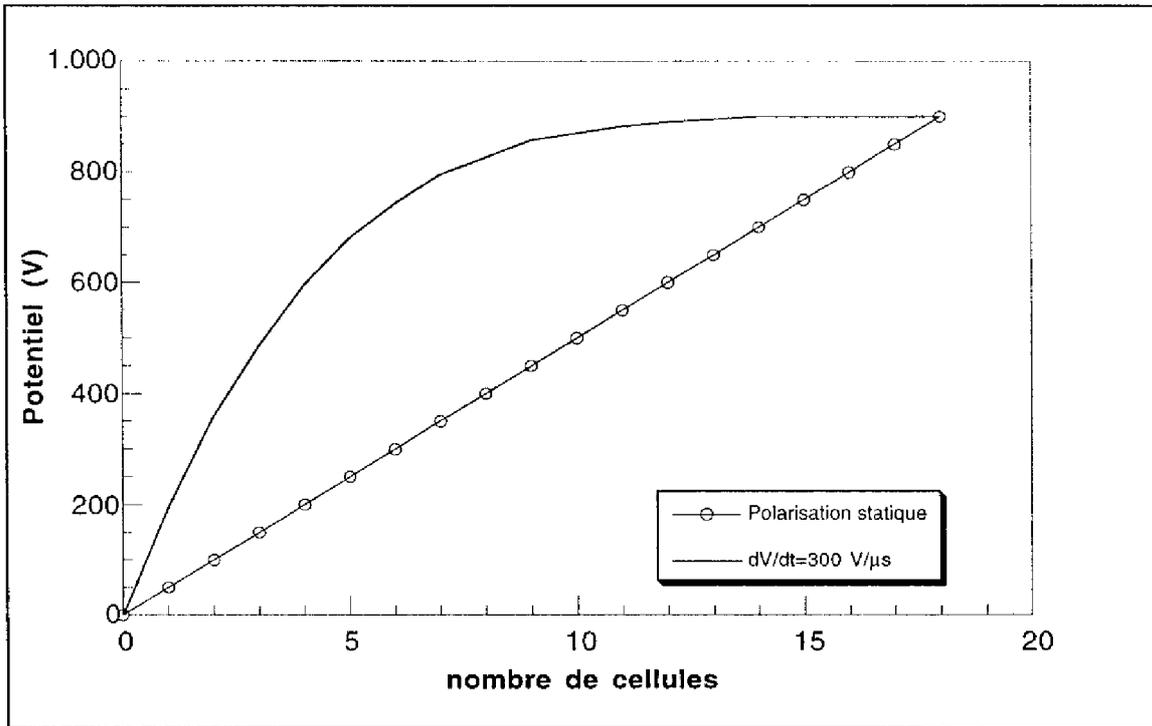


Figure 14 : Répartition du potentiel à la surface.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié la technique de la spirale de SIPOS. Nous avons démontré que, par rapport à la technique SIPOS continu le courant de fuite circulant dans la structure devient négligeable.

Nous avons réalisé des diodes protégées par du SIPOS continu et du SIPOS spirale, et montré **que les deux techniques avaient la même efficacité** sur la tenue en tension. L'efficacité de protection mesurée varie de 72% (cas du SIPOS sans plaque de champ) à 85% (après rajout d'une plaque de champ) et à 98% dans le cas des diodes en limitation de charge d'espace. De plus, **le courant de fuite dans la structure spirale de SIPOS est plus faible que le courant de fuite dans la structure SIPOS continu**. Nous avons aussi étudié l'influence des charges d'interface **et prouvé que cette technique y est totalement insensible**. Enfin, nous avons effectué des mesures en dynamique et nous avons conclu que cette structure présente des courants capacitifs importants et est mise en défaut pour des dV/dt aussi faibles que 300 V/ μ s. Cette étude reste cependant à approfondir.

CONCLUSION GENERALE

Notre travail a été consacré à l'étude théorique et expérimentale de la tenue en tension d'un composant planar en haute tension pour deux technologies : les anneaux polarisés et la spirale de SIPOS. Nous avons prouvé la faisabilité de ces techniques par des réalisations technologiques. Nous allons rappeler les principaux résultats relatifs à cette étude.

Dans le chapitre 1, nous avons tout d'abord rappelé les différentes techniques de garde périphériques utilisées (les anneaux de garde, les jonctions implantées, les électrodes de champs, le RESURF, le SIPOS). En 1992, une nouvelle technique basée sur le principe des anneaux polarisés a été proposée par le LAAS-CNRS. Ses avantages alors avancés sont une simplicité de conception et une grande tolérance aux paramètres géométriques (distance entre anneaux).

Ensuite, le deuxième chapitre a été consacré à l'étude théorique de la structure à anneaux polarisés dont nous avons analysé le comportement électrique. Nous avons conclu que :

- les distances entre les différents tours de spirale doivent être croissantes : la distance anode-anneau doit être faible car elle détermine l'efficacité de la technique. La technique est d'autant plus efficace si cette distance est faible. Cependant, si la distance entre les tours de spirale est faible, un perçage a lieu entre les deux derniers tours de spirale. Une solution est de réaliser une spirale à distance croissante avec des distances faibles près de l'anode puis de faire augmenter ces distances au fur et à mesure que l'on se rapproche du stop-channel,
- cette technique est insensible aux charges d'interface : la tenue en tension augmente même de 16 % pour une densité de charges de $5.10^{11} \text{ cm}^{-2}$,
- cette technique est plus efficace pour des épaisseurs d'épitaxie faibles, c'est à dire lorsque les structures sont en limitation de charge d'espace,
- La tenue en tension n'est pas dégradée pour des dV/dt allant jusqu'à $2000 \text{ V}/\mu\text{s}$.

Le troisième chapitre a été, quant à lui, consacré à la réalisation des composants tests prouvant la faisabilité de cette structure. Nous avons vu que lorsque les distances entre les anneaux sont, constantes, l'efficacité de la technique est de 70% tandis que celle-ci est de l'ordre de 85% à 95% lorsque les distances entre les anneaux sont variables et supérieure à 95% lorsque la structure est en limitation de charge d'espace. Cette technique a bien un excellent comportement vis-à-vis des charges d'interface conformément aux prévisions théoriques. Du point de vue dynamique, cette structure ne présente aucune dégradation de la tenue en tension pour un dV/dt de $300 \text{ V}/\mu\text{s}$ mais nous n'avons pas pu la tester au delà de cette valeur pour des raisons de disponibilité d'équipements.

Enfin, le quatrième chapitre a été consacré à l'étude de la technique de garde de la spirale de SIPOS. Nous avons commencé par une étude quantitative de la structure. Puis, nous avons réalisé des composants afin de valider la faisabilité de cette technique. Nous avons pu voir que cette technique permettait d'avoir un courant de fuite beaucoup plus faible que la technique du SIPOS tout en gardant la même efficacité. Cette technique est de plus insensible aux charges d'interface. Nous avons pu le démontrer à la fois à partir de simulations numériques ainsi que

Conclusion générale

par une étude expérimentale (irradiations avec des rayons X). Par contre l'étude dynamique a montré que cette technique est très sensible à une rampe de tension.

	Spirale SIPOS	Anneaux polarisés
Tenue en tension	1000 V	1000 V
Efficacité	95%	95%
Surface	140 μm	400 μm
Influence des charges	Insensible	Amélioration
Etude en dynamique (300 V/μs)	Dégradation	Pas de dégradation
Courant de fuite	< 16 μA	100 μA

Tableau I : Caractéristiques des anneaux polarisés et de la spirale de SIPOS.

Le tableau I présente les principales caractéristiques de ces deux techniques. Nous pouvons conclure que :

- d'un point de vue surface occupée, la structure à anneaux polarisés est plus encombrante que la structure spirale de SIPOS (la structure à anneaux polarisés occupe une surface de 400 μm tandis que la structure spirale de SIPOS occupe une surface de 140 μm à la périphérie) pour une même tenue en tension,
- l'efficacité des deux techniques est du même ordre de grandeur (supérieure à 90%) pour un même dopage de structure,
- ces deux techniques sont insensibles aux charges d'interface,
- le courant de fuite est important dans la structure à anneaux polarisés, comparé à la structure spirale SIPOS. Ce courant de fuite peut être minimisé en augmentant le nombre de tours de spirale ; mais on augmente alors la surface de silicium consommé,
- la structure à anneaux polarisés est plus attractive pour la tenue en tension en dynamique que la structure spirale SIPOS. En effet, pour une rampe en tension de 300 V/ μs la tenue en tension n'est pas dégradée pour la technique des anneaux polarisés, contrairement au cas du SIPOS.

La poursuite de l'étude dans ce domaine consistera à approfondir le problème de la tenue en tension dynamique :

- pour les anneaux polarisés, il serait souhaitable d'étudier l'influence de différents dV/dt sur la tenue en tension,

- pour la spirale de SIPOS comprendre les phénomènes en dynamique et améliorer la structure.

Un deuxième aspect important qui pourra être abordé est celui de la fiabilité de ces terminaisons de jonctions en particulier vis-à-vis de la température.

Enfin, il semble intéressant de continuer l'étude de la spirale SIPOS à très haute tension, 4 KV ou 8 KV. La résistance qu'elle présente donnera des courants de fuite très faibles, contrairement aux anneaux polarisés pour lesquels nous ne pourrions pratiquement pas augmenter la résistance.



ANNEXE

ANNEXE 1 : LE LOGICIEL POWER2D

1 : Introduction

POWER2D [1], [2] est un logiciel de simulation bidimensionnelle conçu au LAAS et spécifiquement adapté à l'étude de la tenue en tension des structures de puissance. Il calcule le potentiel dans la structure étudiée en résolvant l'équation de Poisson, à deux dimensions (A.1), sur un maillage rectangulaire non uniforme en utilisant la technique des différences finies pour la discrétisation.

$$\Delta\Psi(x,y) = -\frac{\rho(x,y)}{\epsilon} \quad (\text{A.1})$$

Le potentiel permet de déterminer le champ électrique dans la structure. La résolution des intégrales d'ionisation des électrons et des trous permet de déterminer les caractéristiques de claquage par avalanche de la structure. La structure est définie par l'utilisateur dans un fichier d'entrée. POWER2D permet de :

- calculer le potentiel d'une structure à l'état bloqué,
- analyser les effets d'ionisation par impact en évaluant les intégrales d'ionisation,
- prévoir le claquage par avalanche de structures comportant une plaque de champ, une terminaison JTE, du SIPOS, des anneaux polarisés...
- prévoir le claquage dans les dispositifs de puissance : Resurf LDMOST, VDMOST, structure SOI, structures avec des biseaux ...

2 : Méthode numérique et calcul de la tension de claquage

La solution est calculée en approxinant le potentiel électrostatique continu sur un réseau de noeuds constituant le maillage de la structure. Une approximation discrète de l'équation de Poisson reliant la valeur du potentiel d'un noeud à celle de quatre noeuds voisins est calculée. Pour déterminer la tension de claquage par avalanche d'une structure, Power2D calcule les intégrales d'ionisation des électrons (A.2) et des trous (A.3) :

$$I_n = \int_0^w \alpha_n \cdot \exp\left(\int_w^x (\alpha_n - \alpha_p) d\xi\right) dx \quad (\text{A.2})$$

$$I_p = \int_0^w \alpha_p \cdot \exp\left(\int_0^x (\alpha_n - \alpha_p) d\xi\right) dx \quad (\text{A.3})$$

où W est la largeur totale de la charge d'espace, α_n et α_p sont les coefficients de Van Overstraeten et De Man. Le claquage est atteint lorsque ces intégrales sont égales à l'unité. POWER2D résout un algorithme spécifique qui décrit le chemin de l'intégrale d'ionisation. Cet algorithme trace les maxima des champs électriques dans une boîte dont les limites sont fixées

par l'utilisateur. Puis, ces chemins sont déterminés en évaluant les pics de champ électrique et en suivant une ligne. Nous utilisons une procédure d'itération de NEWTON pour calculer automatiquement le claquage par avalanche. La procédure commence par le calcul des intégrales d'ionisation I_n et I_p (A.2 et A.3) pour deux valeurs consécutives de tension appliquée V_{k-1} et V_k . Une procédure itérative est développée afin de prévoir la prochaine tension appliquée où l'intégrale d'ionisation pourra atteindre l'unité.

$$V_{k+1} = V_k - \log(I_{n,p}^k) \cdot \frac{(V_k - V_{k-1})}{\log(I_{n,p}^k) - \log(I_{n,p}^{k-1})} \quad (A.4)$$

Où $I_{n,p}$ sont les intégrales d'ionisation des trous et des électrons calculées à une tension donnée. Cette procédure se terminera lorsque la différence relative entre deux valeurs consécutives d'intégrales d'ionisations satisfait la valeur de l'erreur choisie. Cette procédure de calcul de la tension de claquage présente l'avantage d'être très rapide (maximum 10 itérations). La figure 1 compare les résultats obtenus avec les simulateurs Power2D et PISCES [4] pour une structure comportant un anneau polarisé en résolvant seulement l'équation de Poisson.

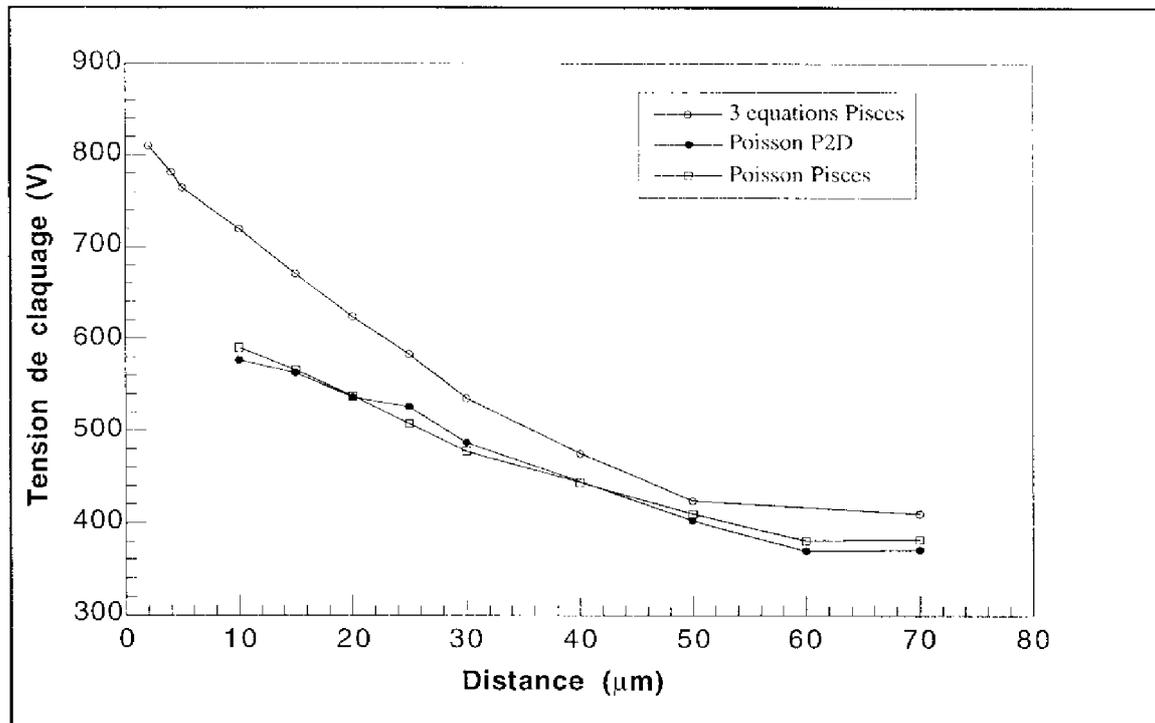


Figure 1 : Comparaison des résultats obtenus par POWER2D et PISCES.

Nous constatons que nous avons un bon accord entre les deux simulateurs (Figure 1), ce qui prouve la validité de Power2D, si tant est que l'on puisse considérer ATLAS comme un standard! On constate que l'on a un écart de 10 % lorsque l'on résout les trois équations des semiconducteurs (Poisson et continuités) que lorsque l'on résout seulement l'équation de Poisson. On peut expliquer ceci par le fait que la résolution de l'équation de Poisson implique que le courant est considéré nul et constant.

Power2D est capable de modéliser le SIPOS par une simple condition linéaire du potentiel sur la surface de l'oxyde, entre le bord de la plaque de champ et le contact stop-channel. Cette hypothèse est basée sur le modèle de Tarnig [3] qui prévoit un comportement ohmique pour un faible champ dans le cas d'une conduction latérale du film SIPOS.

Un logiciel graphique, SPYGLASS TRANSFORM permet d'exploiter les différentes données issues de POWER2D : dopage, potentiel, champ électrique, densités de trous et d'électrons... sous la forme de courbe 2D.

Le temps de calcul de la tension de claquage pour une structure est de 90 mn avec le logiciel PISCES et de quelques minutes (3 à 5 mn) avec le logiciel Power2D, pour cette même structure.

3 : Exemple de fichier d'entrée

Ce fichier décrit une structure SIPOS représentée sur la figure 2.

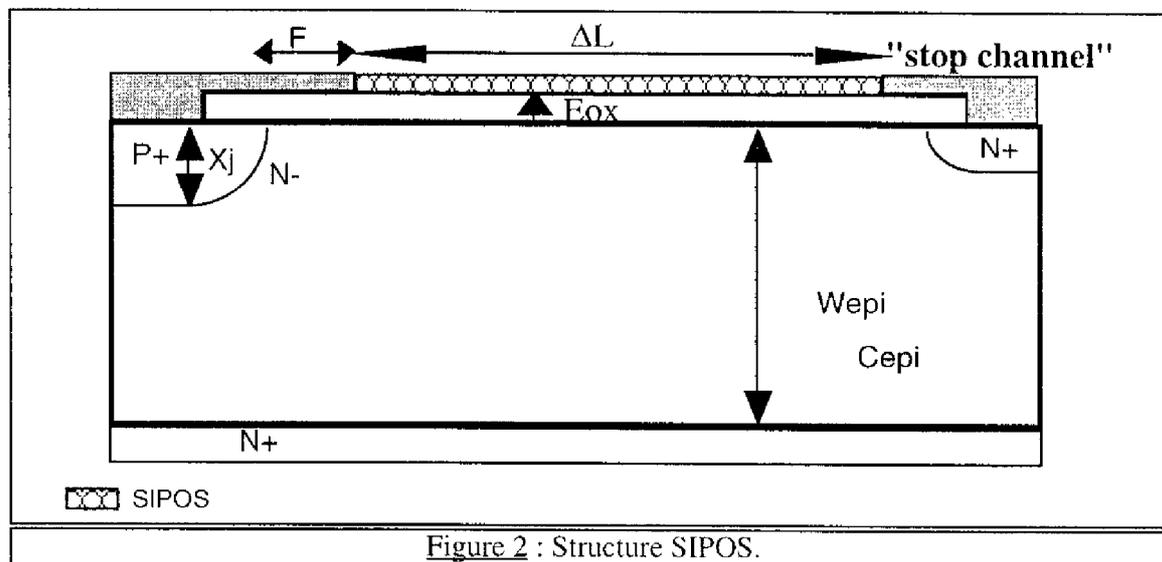


Figure 2 : Structure SIPOS.

```
TITLE structure SIPOS
FILE name=SIPOS
```

```
*Résolution de l'équation de Poisson
MODE POISSON=Y STATIC=Y
```

```
*Définition de la géométrie de la structure
GEOMETRY
```

```
& LINE=1 : 0,0 > 0,100;
& LINE=2 : 0,100 > 5,100;
& LINE=3 : 5,100 > 95,100;
& LINE=4 : 95,100 > 100,100;
& LINE=5 : 100,100 > 100,0;
& LINE=6 : 100,0 > 0,0;
& LINE=7 : 5,100 > 5,101;
& LINE=8 : 5,101 > 16,101;
```

```
& LINE=9 : 16,101 > 90,101;
& LINE=10: 90,101 > 95,101;
& LINE=11: 95,101 > 95,100;
ENDGEOMETRY
```

*Définition des régions de la structure

```
REGION
& CONTOUR=1 NUMBERLINE=6: 1,2,3,4,5,6 MATERIAL=SILICON EPSILON=11.8
& CONTOUR=2 NUMBERLINE=6: 3,7,8,9,10,11 MATERIAL=OXIDE EPSILON=3.9
ENDREGION
```

*Définition du maillage de la structure

```
MESH
& XMESH=Y LNODE=1 RNODE=5 LLOCAL=0 RLOCAL=5 RATIO=1 STEP=.1
& XMESH=Y RNODE=10 RLOCAL=10 RATIO=1 STEP=.5
& XMESH=Y RNODE=20 RLOCAL=16 RATIO=0.8 STEP=.2
& XMESH=Y RNODE=25 RLOCAL=22 RATIO=1.2 STEP=.1
& XMESH=Y RNODE=30 RLOCAL=30 RATIO=1 STEP=.1
& XMESH=Y RNODE=40 RLOCAL=90 RATIO=1 STEP=.2
& XMESH=Y RNODE=50 RLOCAL=95 RATIO=1 STEP=.2
& XMESH=Y RNODE=55 RLOCAL=100 RATIO=1 STEP=.5
*
& YMESH=Y BNODE=1 TNODE=6 BLOCAL=0 TLOCAL=5 RATIO=1 STEP=.5
& YMESH=Y TNODE=20 TLOCAL=80 RATIO=1 STEP=0.1
& YMESH=Y TNODE=30 TLOCAL=87 RATIO=0.9 STEP=.1
& YMESH=Y TNODE=40 TLOCAL=92 RATIO=1.05 STEP=.1
& YMESH=Y TNODE=50 TLOCAL=100 RATIO=1 STEP=.1
& YMESH=Y TNODE=55 TLOCAL=101 RATIO=1 STEP=.5
ENDMESH
```

*Définition des contacts

```
CONTACT
& NUMBER=1 LINE=2 NAME=ANODE VOLTAGE=Y MATERIAL=OHMIC
& NUMBER=2 LINE=6 NAME=SUBSTRATE VOLTAGE=Y MATERIAL=OHMIC
& NUMBER=3 LINE=4 NAME=STOPCHANNEL VOLTAGE=Y MATERIAL=OHMIC
SLAVE=2
& NUMBER=4 LINE=8 NAME=PLAQUE VOLTAGE=Y MATERIAL=OHMIC
SLAVE=1
& NUMBER=5 LINE=10 NAME=STCH2 VOLTAGE=Y MATERIAL=OHMIC
SLAVE=3
& NUMBER=6 LINE=9 NAME=ST2 MATERIAL=OHMIC LINPOT=Y
```

*Définition des dopages

```
DOPING
* SUBSTRATE:
& UNIFORM=Y ELEMENT=NTYPE CONCENTRATION=2E14 JUNCTION=95
+ START=100 PEAK=100 XLEFT=95 XRIGHT=100
* ANODE:
& GAUSS=Y ELEMENT=PYPE CONCENTRATION=2.E18 JUNCTION=87 START=100
+ PEAK=100 XLEFT=0 XRIGHT=5 RATIO=0.85
* STOP-CHANNEL:
& GAUSS=Y ELEMENT=NTYPE CONCENTRATION=1E20 JUNCTION=95 START=100
+ PEAK=100 XLEFT=95 XRIGHT=100
ENDDOPING
```

```
IMPACT SELB=Y EGRAN=4E6
```

*Définition de l'interface

```
INTERFACE
& X.MIN=5 X.MAX=95 Y.MIN=99 Y.MAX=101 QFIX=5E10
ENDINTERFACE
```

*Détermination de la tension de claquage

```
SOLVE
*INITIAL=Y
& VBD=Y IONIZE=Y PROTECT=N IONLINES=15 ELECT=1 : 2 PROJECT=Y VI1=300
VI2=400
+ ERRSO=0.01
ENDSOLVE
OUTPUT POTE=Y TOT.D=Y E.FIELD=Y
SAVE OUTFILE=SIPOS
END
```

4 : Résultats de simulation

Plusieurs informations apparaissent à l'écran pendant la simulation. Parmi ces informations, nous pouvons trouver les coordonnées x et y du chemin de l'intégrale d'ionisation ainsi que les valeurs de champ électrique quand celle-ci atteint l'unité. La valeur de l'intégrale d'ionisation ainsi que la valeur de la tension de claquage est affichée :

VBD=487.05 V

Nous voyons également s'afficher le temps de simulation (Total CPU time) qui est de 9,7 s dans notre cas.

Extrait de fichier de simulation

```
--> IEImax= 2.570E+05 V/cm
--> LOCATION: I= 8 X= 8.0000 μm
                J= 37 Y= 88.9409 μm
```

No.	X, μm	Y, μm	E, V/cm	No.	X, μm	Y, μm	E, V/cm
1	6.7098	92.8000	2.19E+02	24	10.4315	82.0733	1.72E+05
2	6.7161	92.0000	1.10E+04	25	11.1122	80.0000	1.51E+05
3	7.0000	91.3398	7.41E+04	26	11.2816	79.4710	1.48E+05
4	7.3438	90.6780	1.49E+05	27	12.3243	76.2010	1.29E+05
5	7.7236	89.6857	2.46E+05	28	12.7931	74.6429	1.21E+05
6	8.0000	88.9409	2.57E+05	29	13.1725	73.3131	1.14E+05
7	8.2075	88.3818	2.52E+05	30	13.8625	70.8804	1.01E+05
8	8.3613	87.9622	2.47E+05	31	14.3026	69.2857	9.29E+04
9	8.4762	87.6472	2.42E+05	32	14.4238	68.8324	9.08E+04
10	8.5621	87.4107	2.38E+05	33	14.8805	67.1229	8.31E+04
11	8.6265	87.2332	2.35E+05	34	15.2519	65.7226	7.69E+04
12	8.6747	87.1000	2.33E+05	35	15.5542	64.5698	7.19E+04
13	8.7108	87.0000	2.31E+05	36	15.7197	63.9286	6.91E+04
14	8.7469	86.9000	2.30E+05	37	15.8000	63.6144	6.78E+04
15	8.7974	86.7599	2.28E+05	38	16.0000	62.8318	6.47E+04
16	8.8680	86.5638	2.25E+05	39	16.1000	62.4402	6.31E+04
17	8.9667	86.2891	2.21E+05	40	16.3448	61.4834	5.93E+04
18	9.0000	86.1960	2.19E+05	41	16.9439	59.1387	5.00E+04
19	9.1043	85.9043	2.15E+05	42	17.0868	58.5714	4.78E+04

20	9.2959	85.3654	2.08E+05	43	18.4104	53.2759	2.86E+04
21	9.5615	84.6107	1.98E+05	44	18.4256	53.2143	2.84E+04
22	9.9285	83.5537	1.87E+05	45	19.7492	47.8571	1.05E+04
23	10.0000	83.3436	1.85E+05	46	21.1069	42.5000	8.14E+02

-->IONIZATION INTEGRAL FOR N: 9.923E-01

-->IONIZATION INTEGRAL FOR P: 9.424E-01

=====
* MAXIMUM OF IONIZ. INTEGRAL: 9.923E-01

* VBD= 487.05 V ERR= 1.00E-02
=====

CPU time = 0.5 s

Total CPU time = 9.5 s

!BREAKDOWN VOLTAGE IS CALCULATED!
=====

STEP No: 1 IS FINISHED
=====

CPU time for STEP # 1 = 0.0 s

Total CPU time = 9.5 s
=====

STEP No: 2

TYPE SAVE

SAVE FILE : ./SIPOS.POT

! POTENTIAL IS SAVED!

SAVE FILE : ./SIPOS.DOP

! DOPING IS SAVED!

SAVE FILE : ./SIPOS.E

! FILE IS SAVED!

CPU time for STEP # 2 = 0.2 s

Total CPU time = 9.7 s

** #POWER.2D# TERMINATED NORMAL **
=====

Le champ électrique, le potentiel et le dopage sont sauvegardés à la fin du fichier et peuvent être visualisés à l'aide de l'outil SPYGLASS TRANSFORM (Figure 3).

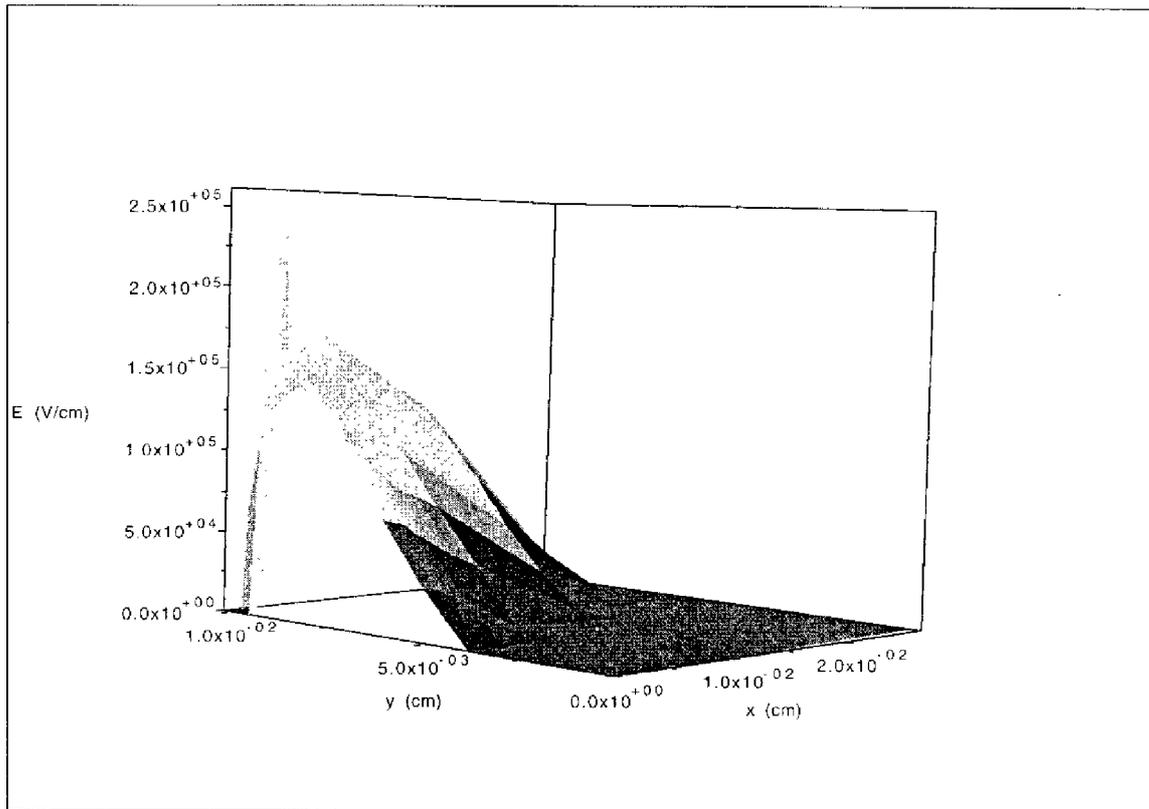


Figure 3 : Répartition de champ électrique dans une structure avec SIPOS au claquage.

BIBLIOGRAPHIE



INTRODUCTION

[1] V. MACARY, G. CHARITAT, M. BAFLEUR, J. BUXO and P. ROSSEL, "Comparison Between Biased and Floating Guard Rings as Junction Termination Technique", Proceedings of the 1992 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, TOKYO, pp. 230-233.

CHAPITRE 1 : LES TECHNIQUES DE GARDE

[1] S. M. SZE and G. GIBBONS, "Effect of Junction Curvature on Breakdown Voltage in Semiconductors", Solid State Electronics Vol. 9, pp. 831-845, 1966.

[2] C. BASANAGOUD et K. N. BHAT, "Effect of Lateral Curvature on the Breakdown Voltage of Planar Diodes", IEEE Electron Device Letters, EDL-6, 6, June 1985.

[3] J. AKTAR et S. AHMAD, "Breakdown Voltage of a Rectangular Planar Diffused Junction with Rounded Corners", IEEE Trans. on Electron Devices, ED-31, 12, pp. 1781-1783, December 1984.

[4] B. J. BALIGA, "High-Voltage Device Termination Techniques" IEE Proc., Vol. 129, Pt. 1, N° 5, pp. 173-179, October 1982.

[5] G. CHARITAT and J. L. SANCHEZ, "Planar Junction Termination Techniques : the State of the Art", Proceedings of the 15th Annual Semiconductor Conference (CAS'92), october 6-11 1992, SINAIA, Romania.

[6] Y. C. KAO et E. D. WOLLEY, "High-Voltage Planar p-n Junctions", Proc. of the IEEE, Vol.55, 8, August 1967.

[7] M. S. ADLER, V. A. K. TEMPLE, A. P. FERRO, R. C. RUSTAY, "Theory and Breakdown Voltage for Planar Devices with a Single Field Limiting Ring", IEEE Trans. on Electron Devices, ED-24, N° 2, February 1977, pp. 107-113.

[8] V. BOISSON, "Etude de la Géométrie Optimale des Périphéries des Jonctions Planar", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1985.

[9] V. BOISSON, M. LE HELLEY, and J. P. CHANTE, "Analytical Expression of the Potential of Guard Rings of Diodes Operating in the Punchthrough Modé", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-32, N° 4, april 1985, pp. 838-840.

[10] S. YASUDA et T. YONEZAWA, "High-Voltage Planar Junction with a Field-Limiting Ring", Solid State Electronics, Vol. 25, N° 5, pp. 423-427, 1982.

[11] M. GHARBI , "La Tenue en Tension et le Calibre en Courant du Transistor M.O.S Vertical dans la Gamme des Moyennes Tensions (300 à 1000 Volts)", Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1985.

[12] K.P. BRIEGER, W. GERLACH et J. PELKA "Blocking Capability of Planar Devices with Field Limiting Rings", Solid State Electronics, Vol. 26, 8, pp. 739-745, 1983.

[13] K. R. WHIGHT, and D. J. COE, "Numerical Analysis of Multiple Field Limiting Ring Systems", Solid State Electronics, Vol. 27, N° 11, 1984, pp. 1021-1027.

- [14] L. EVENSEN, A. HANNEBORG, B. S. AVSET, M. NESE, "Guard-ring design for high voltage operation of silicon detectors", *Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res A* 377, pp. 44-52, 1993.
- [15] H. YILMAZ, "Optimization and surface Charge Sensitivity of High-Voltage Blocking Structures with Shallow Junctions", *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. ED-38, N° 7, July 1991, pp. 1666-1675.
- [16] L. E. CLARK, R. B. DAVIS and P. J. GROENIG, "High-Voltage Termination using Enhanced Surface Doping", *Proceedings of 1992 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs (ISPSD'92)*, Tokyo, pp. 86-90.
- [17] V. A. K. TEMPLE "Junction Termination Extension, a new Technique for Increasing Avalanche Breakdown Voltage and Controlling Surface Electric Field in P-N Junctions", *IEEE E. Devices Meeting digest*, Abstract 20.4, pp. 423-426, 1977.
- [18] K. HWANG and D. H. NAVON, "Breakdown Voltage Optimization of Silicon p- π -v Planar Junction Diodes", *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. ED-31, N°9, September 1984, pp. 1126-1135.
- [19] V. BOISSON, M. Le HELLEY and J. P CHANTE, "Computer Study of a High-Voltage a p⁺- π -n-n⁺ Diode and Comparison with a field-Limiting Ring Structure", *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. ED-33, N°1, January 1996, pp. 80-84.
- [20] S. GEORGESCU and al., "Planar termination for high-voltage p-n junctions", *Solid State Electronics* pp. 1035-1039, 1996.
- [21] J. L. SANCHEZ, V. LIBEROS, P. LETURCQ, "Design and Realization of High Voltage Junction Termination Compatible with Power Circuits Technology", in 17th Yugoslav Conference on Microelectronics (MIEL), Nis YUGOSLAVIA, May 1989, pp. 689-694.
- [22] P. AUSTIN, J. L. SANCHEZ and R. BERRIANE, "Optimization of pp- junction termination for new power devices", *Solid State Electronics*, Vol. 39, N°4, pp. 593-599, 1996.
- [23] R. BERRIANE, " Conception et réalisation d'un thyristor à gachette isolée commandé par voie optique : un exemple d'interrupteur intégré de puissance", *Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse*, Juillet 1993.
- [24] A. MURRAY, "On Interconnection Induced Breakdown in Junction Isolated High Voltage Integrated Circuits: 700-1000V", *Ph.D. Thesis*, February 1995.
- [25] W. TANTRAPORN and V. A. K. TEMPLE, "Multiple-Zone Single-Mask Junction Termination Extension A High-Yield Near-Ideal Breakdown Voltage Technology", *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. ED-34, N°10, pp. 2200-2210, October 1987.
- [26] V. A. K. TEMPLE, "Increased Avalanche Breakdown Voltage and Controlled Surface Electric Fields Using a Junction Termination Extension (JTE) Technique", *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. ED-30, N° 8, pp. 954-957, August 1983.
- [27] V. A. K. TEMPLE, and W. TANTRAPORN, "Junction Termination Extension for Near-Ideal Breakdown Voltage in p-n Junctions", *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. ED-33, N° 10, October 1986, pp. 1601-1608.
- [28] R. STENGL, U. GOSELE and al, "Variation of lateral Doping as a Field Terminator for High-Voltage Power Devices", *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. ED-33, N°3, March 1986, pp. 426-428.

- [29] H. MITLEHNER, H. J SCHULZE, "Current Developments in High-Power Thyristors", EPE Journal, Vol. 4, N°1, March 1994, pp. 36-42.
- [30] A. S. GROVE, O. LEISTIKO, and W. HOOPER, "Effect of Surface Fields on the Breakdown of Planar Silicon p-n Junctions", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-14, N° 3, march 1967, pp. 157-162.
- [31] F. CONTI et M. CONTI, "Surface Breakdown in Silicon Planar Diodes Equipped with Field Plate", Solid State Electronics, Vol. 15, pp. 93-105, 1972.
- [32] D. S. ZOROGLU and L. E. CLARK, "Design Considerations for High-Voltage Overlay Annular Diodes", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-19, N° 1, january 1972, pp. 4-8.
- [33] A. RUSU, O. PIETRAREANU and C. BULUCEA, "Reversible Breakdown Voltage Collapse in Silicon Gate-Controlled Diodes", Solid State Electronics, Vol. 23, 1980, pp. 473-480.
- [34] A. RUSU, and C. BULUCEA, "Deep-Depletion Breakdown Voltage of Silicon-Dioxide/Silicon MOS Capacitors", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-26, N° 3, march 1979, pp. 201-205.
- [35] V. P. O'NEIL and P. G. ALONAS, "Relation between Oxide Thickness and the Breakdown Voltage of a Planar Junction with Field Relief Electrode", IEEE Trans. on Electron Devices, ED-26, 7, pp. 1098-1100, 1979.
- [36] C. BASAVANA GOUD and K. N. BHAT, "Two-Dimensional Analysis and Design Considerations of High-Voltage Planar Junctions Equipped with Field Plate and Guard Ring", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 38, N°6, pp. 1497-1504, June 1991.
- [37] C. BASAVANA GOUD and K. N. BHAT, "Breakdown Voltage of Field Plate and Field-Limiting Ring Techniques: Numerical Comparison" IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 39, N° 7, pp. 1768-1770, July 1992.
- [38] C. BASAVANA GOUD and K. N. BHAT, "Analysis and Optimal Design of Semi-Insulator Passivated High-Voltage Field Plate Structures and Comparison with Dielectric Passivated Structures", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 41, N°10, pp. 1856-1865, October 1994.
- [39] W. FEILER, E. FALCK and W. GERLACH, "Multistep Field Plates for High-Voltage Planar p-n Junctions", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 39, N° 6, pp. 1514-1520, June 1992.
- [40] J. KOREC and R. HELD, " Comparison of DMOS/IGBT Compatible High-Voltage Termination Structures and Passivation Techniques", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol 40, N°10, pp. 1845-1854, October 1993.
- [41] S. L. KOSIER and al., "Combinaison Field Plate/field Ring Termination Structures for Integrated power devices", Proceedings of the 1993 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, pp. 182-187.
- [42] T. DRABE and R. SITTING, "Theoretical investigation of planar junction termination", Second International Symposium on Power Semiconductors (ISPS'94), Prague (République Tchèque) 31 Août-2 Septembre 1994, pp. 15-22.
- [43] L. E. CLARK and D. S. ZOROGLU, "Enhancement of Breakdown Properties of overlay annular diodes by field shaping resistive films", Solid State Electronics, Vol. 15, 1972, pp.653-657.

- [44] T. MATSUSHITA, T. AOKI, T. OHTSU, H. YAMOTO, H. HAYASHI, M. OKAYAMA and Y. KAWANA, "Highly Reliable High-Voltage Transistors by Use of the SIPOS Process", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-23, N°8, August 1976, pp. 826-830.
- [45] D. W. TONG, J. L. BENJAMIN and W. RON VAN DELL, "Interface Effects of SIPOS Passivation", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-33, N° 6, June 1986, pp. 779-787.
- [46] D. JAUME, "Etude des Gardes Périphériques des Composants Silicium Planar Haute-Tension en Technologie SIPOS", Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, Juin 1990.
- [47] D. JAUME, G. CHARITAT, J. M. REYNES, and P. ROSSEL, "High-Voltage Planar Devices Using Field Plate and Semi-Resistive Layers", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-38, N° 7, July 1991, pp. 1681-1684.
- [48] R. SAITOH, A. NISHIURA and K. SAKURAI, "High-Voltage IGBT with a new semi-resistive film over edge structure", Proceedings of the 1992 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, TOKYO, pp. 206-210.
- [49] T. STOCKMEIER, K. LILJA, "SIPOS-Passivation for high voltage power devices with planar junction termination", ISPSD 1991 Technical Digest, pp. 145-148.
- [50] T. TERASHIMA and al., "Structure of 600V IC and A New Voltage Sensing Device", 5th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics, 1993, pp. 224-229.
- [51] A. F. J. MURRAY and W. A. LANE, "Investigation of a Novel Wiring Scheme for 700-1000V HVIC's", in Proceedings of the 23rd European Solid State Device Research Conference (ESSDERC'93), pp. 891-894.
- [52] A. F. J. MURRAY and W. A. LANE, "High voltage wiring using biased polysilicon field plates", in Proceedings of the 2nd International Seminar on Power Semiconductors (ISPS'94), pp. 31-36, Prague, Czech Republic, Aug. 1994.
- [53] K. ENDO, Y. BABA, Y. UDO, M. YASUI and Y. SANO, "A 500V 1A 1-Chip Inverter IC with a New Electric Field Reduction Structure", 6th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics (ISPSD'94), Switzerland, 20-23 Mai 1993, pp. 247-250.
- [54] J. APPELS, M. G. COLLET, P. A. H. HART, H. M. J. VAES and J. F. C. M. VERHOEVEN, "Thin Layer High-Voltage Devices (RESURF Devices), Philips J. Res. 35, 1980, pp. 1-13.
- [55] G. CHARITAT, "Modélisation et Réalisation de Composants Planar Haute-Tension", Thèse d'Etat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, Septembre 1990.
- [56] A. NEZAR, "Composants LDMOS pour Circuits Intégrés Haute-Tension", Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1989.
- [57] G. CHARITAT, A. NEZAR and P. ROSSEL, "High voltage RESURF LDMOS for smart power integrated circuits", Revue Physique Appliquée 1989, pp. 993-1000.
- [58] G. CHARITAT, M. A. BOUANANE and P. ROSSEL, "A New Junction Termination Technique for Power Devices : RESURF LDMOS with Sipos Layers", Proceedings of the 1992 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, TOKYO, pp. 213-216.
- [59] V. MACARY, "Filière technologique de puissance intelligente haute tension à isolation diélectrique basée sur la soudure directe sur silicium", Thèse de Doctorat, INSA Toulouse, 1992.

[60] V. MACARY, G. CHARITAT, M. BAFLEUR, J. BUXO and P. ROSSEL, "Comparison Between Biased and Floating Guard Rings as Junction Termination Technique", Proceedings of the 1992 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, TOKYO, pp. 230-233.

[61] V. MACARY, J. BUXO and M. BAFLEUR, "Nouveau Système Planar de Terminaison Haute Tension pour les Circuits Intégrés de Puissance Intelligente", Rapport LAAS-CNRS N°91022, Février 1991.

[62] D. KRIZAJ, G. CHARITAT, "Electrical and physical properties of biased-ring junction termination", Rapport LAAS N°93307, Août 1993.

[63] D. KRIZAJ, "Breakdown properties of semiconductor planar structures analysis and optimization", Ph.D. Thesis, University of Ljubljana 1995.

[64] D. KRIZAJ, S. AMON, G. CHARITAT, "Diffused spiral junction termination structure: modeling and realization", 8th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics (ISPSD'96), Hawai (USA), 20-23 Mai 1996, pp. 247-250.

<p>CHAPITRE 2 : ETUDE NUMERIQUE BIDIMENSIONNELLE DE LA TENUE EN TENSION DE LA TECHNIQUE DES ANNEAUX POLARISES</p>
--

[1] "ATLAS User's Manual", Silvaco International, Santa Clara USA, June 1995

[2] V. MACARY, G. CHARITAT, M. BAFLEUR, J. BUXO and P. ROSSEL, "Comparison Between Biased and Floating Guard Rings as Junction Termination Technique", Proceedings of the 1992 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, TOKYO, pp. 230-233.

[3] B. J. BALIGA, S. K. GANDHI, "Analytical solutions for the breakdown voltage of abrupt cylindrical and spherical junctions", Solid State Electronics, 1976, vol. 19, pp. 739-744.

[4] S. T. CHANG and S. A. LYON, "Location of positive charge trapped near the Si-SiO₂ interface at low temperature", Appl. Phys. Lett 48(2), january 1986, pp. 136-138.

[5] G. HU and W. C. JOHNSON, "Relationship between trapped holes and interface states in MOS capacitors", Appl. Phys. Lett. 36(7), pp. 590-591, 1 April 1980.

[6] G. SARRABAYROUSE, communication personnelle.

[7] G. CHARITAT, C. MINGUES, "Modélisation et réalisation de terminaisons de jonctions haute tension à haute efficacité" Rapport LAAS 96282, juillet 1995, Contrat Région Midi-Pyrénées n° RECH/9407504.

[8] M.K JOHNSON, A.D ANNIS, J.N SANDOE and D COE, "An analysis of the dynamic behavior of field-limiting ring-passivation systems", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 36, N° 6, june 1989, pp. 1203-1211.

CHAPITRE 3 : REALISATION TECHNOLOGIQUE DES COMPOSANTS TESTS

- [1] F. ROSSEL, "Le procédé technologique" Rapport LAAS-CNRS.
- [2] B. ROUSSET, "L'oxydation thermique du silicium" Rapport LAAS-CNRS.
- [3] "ATHENA User's Manual", Silvaco International, Santa Clara USA, June 1995.
- [4] S. T. CHANG and S. A. LYON, "Location of positive charge trapped near the Si-SiO₂ interface at low temperature", Appl. Phys. Lett 48(2) January 1986, pp. 136-138.
- [5] "ATLAS User's Manual", Silvaco International, Santa Clara USA, June 1995.
- [6] D. KRIZAJ, S. AMON, G. CHARITAT, "Diffused spiral junction termination structure: modeling and realization", 8th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics (ISPSD'96), Hawaii (USA), 20-23 Mai 1996, pp. 247-250.
- [7] C. MINGUES, D. KRIZAJ, G. CHARITAT, "An efficient junction termination technique: the biased ring structure", Trondheim 1997, EPE 97 Proc., Septembre 1997, vol.2, pp 105-109.
- [8] D. KRIZAJ, S. AMON, C. MINGUES, G. CHARITAT, "Spiral junction termination", IEEE Transactions on Electron devices, Novembre 1997, pp. 2002-2010.
- [9] BAIRANZADE, MOTOROLA communication personnelle.

CHAPITRE 4 : LA SPIRALE DE SIPOS

- [1] D. JAUME, "Etude des Gardes Périphériques des Composants Silicium Planar Haute-Tension en Technologie SIPOS", Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, Juin 1990.
- [2] D. JAUME, G. CHARITAT, J. M. REYNES, and P. ROSSEL, "High-Voltage Planar Devices Using Field Plate and Semi-Resistive Layers", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. ED-38, N° 7, July 1991, pp. 1681-1684.
- [3] K. ENDO, Y. BABA, Y. UDO, M. YASUI and Y. SANO, "A 500V 1A 1-Chip Inverter IC with a New Electric Field Reduction Structure", 6th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics (ISPSD'94), Switzerland, 20-23 Mai 1993, pp. 247-250.
- [4] C. MINGUES, G. CHARITAT, "Efficiency of junction termination techniques vs oxide trapped charges", weimar 1997, IEEE ISPSD 1997, Mai 1997, pp. 137-140.
- [5] P. AUSTIN, J. L. SANCHEZ and R. BERRIANE, "Optimization of PP- junction termination for new power devices", Solid State Electronics Vol. 39, n°4, pp. 593-599, 1996.
- [6] G. CHARITAT and al, "Optimisation of high voltage (1200 V) MOS transistor capabilities and switching behaviour", ESSDERC 1996, pp. 887-890.

ANNEXE 1 : LE LOGICIEL POWER2D

[1] E. STEFANOV, G. CHARITAT, "POWER2D : a dedicated tool for two-dimensional simulations of OFF-state power structures. User's guide", Rapport LAAS 93306.

[2] N. NOLHIER, E. STEFANOV, G. CHARITAT, P. ROSSEL, "POWER 2D: A dedicated tool for two-dimensional simulations of off-state power structures". International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol.13, N° 4, december 1994, pp. 771-783.

[3] M. L.TARNG, "Carrier transport in oxygen-rich polycrystalline-silicon films", J.Applied Physic, Vol 49, N°7, pp.4069-4076 July 1978.

[4] "ATLAS User's Manual", Silvaco International, Santa Clara USA, June 1995.

Modélisation et réalisation de terminaisons de jonctions haute tension compatibles avec la technologie Planar : les anneaux polarisés et la spirale de SIPOS

Résumé : Cette thèse traite du problème de la tenue en tension des composants de puissance, discrets ou intégrés. Elle concerne l'étude des techniques de garde de jonctions qui permettent d'obtenir une efficacité de protection maximale, c'est-à-dire d'approcher au mieux la tenue en tension de la jonction idéale plane. Nous étudions le fonctionnement et les règles de conception de deux techniques de linéarisation de potentiel : **les anneaux diffusés polarisés et la spirale de SIPOS.**

Le travail réalisé ici comporte les points-clés suivants :

- compréhension et analyse du fonctionnement statique et dynamique.
- détermination des règles de conception : évaluation des paramètres critiques pour des tenues en tension de 1000V. Les paramètres importants de cette étude sont : la surface occupée, la complexité technologique de réalisation, la sensibilité à la technologie (les charges dans l'oxyde).
- réalisations de structures tests sur silicium.

Les principaux résultats obtenus sont les suivants : réalisations de diodes de calibre 600 à 1200 V, efficacité de protection de 95 % (anneaux polarisés et SIPOS spirale), insensibilité aux charges d'interface, robustesse vis-à-vis des tolérances de la technologie, grande tolérance sur les règles de dessin.

Mots clés : Technologie Planar
Anneaux polarisés
Spirale de SIPOS
Tension de claquage

Modelling and realisation of high voltage junction termination compatibility with Planar technology : the biased rings and the spiral SIPOS

Abstract: This thesis deals with the breakdown capability of discrete power devices or integrated circuits. It presents a study about guard techniques which allows the breakdown capability of an ideal plane junction. We study two techniques of potential linearization: **the biased rings and the spiral SIPOS.**

The work achieved here is about:

- comprehension and analysis of the static and dynamic state,
- determination of design rules: evaluation of critical parameters for a breakdown voltage of 1000V. The main parameters of this study are: the surface used, the complexity of the technological fabrication process, the sensibility of parameters to the technology (oxide charges),
- realisation of test devices.

The main results obtained are: fabrication of diodes in the range of 600 to 1200 V, efficiency of protection about 95 % (biased rings and spiral SIPOS), insensitivity to oxide charges density, robustness of the technology, large tolerance of the design rules.

Key-words : Planar technology
Biased Rings
Spiral SIPOS
Breakdown capability