



HAL
open science

COMPOSANT $N_{\nu}N$ POUR L'ETUDE DE LA ZCEM (ZONE DE CHARGE D'ESPACE MIXTE) DES TRANSISTORS MOS

Guillaume Verneau, Laurent Aubard, Thierry Bouchet, Jacques Arnould,
Pierre Brosselard, Franck Nallet, Dominique Planson

► **To cite this version:**

Guillaume Verneau, Laurent Aubard, Thierry Bouchet, Jacques Arnould, Pierre Brosselard, et al.. COMPOSANT $N_{\nu}N$ POUR L'ETUDE DE LA ZCEM (ZONE DE CHARGE D'ESPACE MIXTE) DES TRANSISTORS MOS. Electronique de Puissance du Futur (EPF 2002), Nov 2002, Montpellier (FR), France. hal-04390458

HAL Id: hal-04390458

<https://hal.science/hal-04390458>

Submitted on 12 Jan 2024

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.

COMPOSANT NvN POUR L'ETUDE DE LA ZCEM (ZONE DE CHARGE D'ESPACE MIXTE) DES TRANSISTORS MOS

Guillaume VERNEAU, Laurent AUBARD
Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, UMR 5529 INPG/UJF - CNRS
BP 46
38402 ST-MARTIN D'HERES CEDEX- France

Thierry BOUCHET, Jacques ARNOULD
Ion Beam Services
Avenue Gaston Imbert Prolongée
13790 ZONE PEYNIER-ROUSSET – France

Pierre BROSELARD, Franck NALLET, Dominique
PLANSON
Centre de Génie Electrique de Lyon, UMR5005 CNRS
20, Avenue Albert Einstein
69621 VILLEURBANNE CEDEX- France

Résumé : L'étude du composant NvN, censé représenter la zone intercellulaire, explique le phénomène de retournement observé en ZCEM sur des MOSFETs de puissance verticale. Il trouve son origine dans l'ionisation par impact, au niveau de l'accumulation d'électrons sous la grille. Il est ainsi possible d'affiner la définition de l'Aire de Sécurité (SOA) de fonctionnement du composant, en fournissant la limite du point de retournement. Ceci ouvre la voie à la possibilité d'une optimisation de la distance intercellulaire au niveau des motifs élémentaires.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre d'un contrat DGA, les sociétés IBS et THALES-SA ont été amenées à développer un composant de type transistor MOS de puissance haute tension (>2kV), destiné à améliorer le compromis entre haute tension et capacités internes parasites.

Après réalisation, l'étude et l'analyse d'essais ont montré un comportement inhabituel, traduisant une saturation du courant drain I_{DS} vis-à-vis de la tension de commande V_{GS} (Fig.1), et confirmé par des résultats de simulation avec des logiciels type éléments finis (ATLAS / MEDICI).

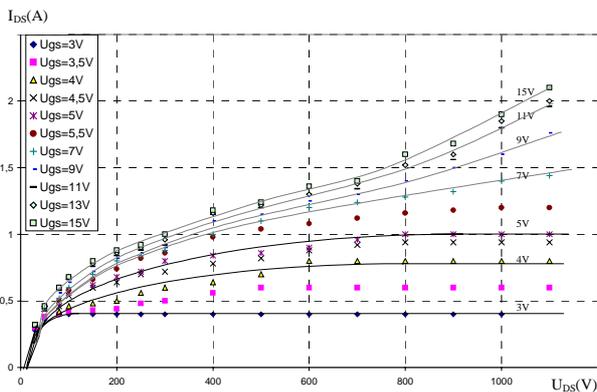


Figure 1 : Effets de saturation et d'inflexion montante sur un réseau statique expérimental $I_{DS}=f(V_{DS}, @ V_{GS}=cte)$.

Les précédents travaux [1], [2] ont alors mis en défaut un modèle erroné (faisant intervenir un Transistor à Effet de Champ vertical parasite), remplacé par celui propre à la Zone de Charge d'Espace Mixte (ZCEM ou modèle à 3 segments, cf. Fig.2). Ensuite les mêmes études soulignèrent l'influence et l'importance de la zone intercellulaire, tant dans le comportement électrique du composant que dans sa conception, compte tenu des observations précédentes.

La présente analyse vise à approfondir notre compréhension du phénomène de Zone de Charge d'Espace Mixte dans les transistors MOS de puissance verticale. A ce niveau, deux points sont à souligner :

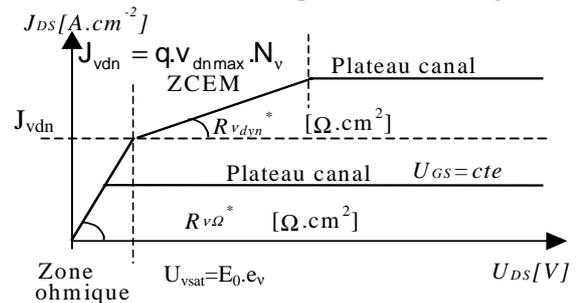


Figure 2 : Modèle ZCEM (ou modèle à 3 segments).

- la saturation (#quasi-indépendance) du courant drain I_{DS} vis-à-vis de la tension de commande V_{GS} ,
- l'inflexion "vers le haut" des courbes de courant à partir d'une certaine tension de drain, semblant traduire une avalanche dans le composant.

Ces deux phénomènes ont été observés tant sur des prototypes d'étude que sur des composants du commerce (APT, MOTOROLA), et confirmés par des simulations à l'aide de logiciels type éléments finis (SILVACO, ATLAS). Il ne s'agit donc pas d'une particularité inhérente aux prototypes étudiés. Si le premier point a déjà fait l'objet de recherches antérieures, le second n'a pas encore été abordé et n'est pas retranscrit par l'actuel modèle de source de courant du MOS de puissance.

2. STRUCTURE NvN

2.1. Origines de la structure

Rappelons tout d'abord l'importance de la zone intercellulaire du MOS dans le mécanisme de ZCEM, que ce soit au niveau des dimensions, du dopage ou de l'épaisseur d'oxyde au dessus de cette zone. Il est

important de souligner que la zone d'inversion (liée au principe même du MOS) ne se restreint pas à la zone porte canal proprement dite (Fig.3). Le canal, normalement confiné à la zone P (dite porte canal), s'étend au delà de cette limite [3], et se poursuit dans l'espace intercellulaire. Il y crée un matelas d'électrons, en référence à la couche d'accumulation de charges sous l'oxyde de grille, prolongation de la couche d'inversion susdite.

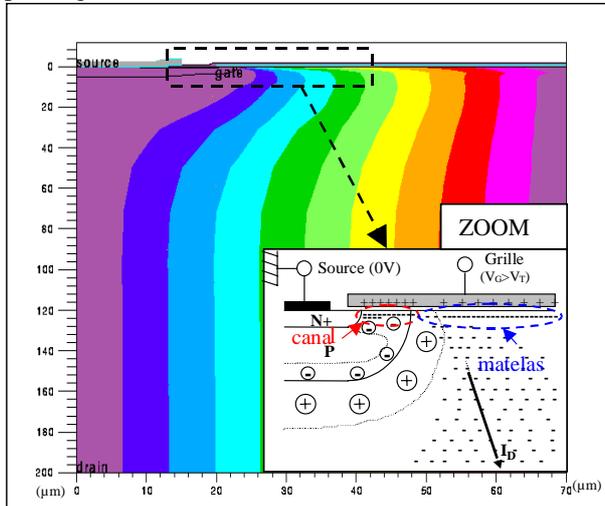


Figure 3 : Répartition des tubes de courant et épanouissement du matelas d'électrons dans la zone intercellulaire.

Ce matelas d'électrons dans la zone intercellulaire est à l'origine de la structure NvN [4], schématisée Fig.4. Elle est destinée à étudier et rendre compte du comportement de cette zone, notamment dans le mécanisme de la ZCEM.

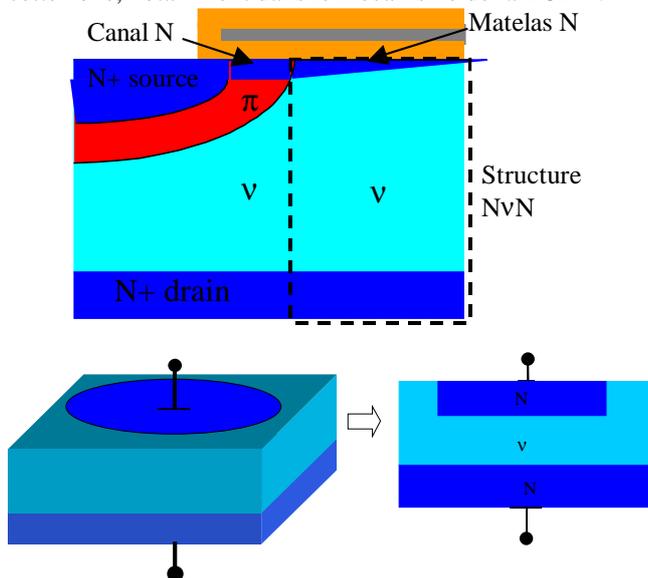


Figure 4 : La structure NvN telle qu'elle existe au sein du MOS (en haut), et sa réalisation pratique pour cette étude (en bas).

2.2. Résultats expérimentaux

La structure introduite Fig.4, et cotée Fig.5, a fait l'objet de nombreuses mesures. Les relevés expérimentaux (Fig.6) confirment, sur le composant artificiel NvN, les deux points observés sur le comportement du MOS, à

savoir la quasi-saturation (type ZCEM) et un phénomène d'emballlement [5].

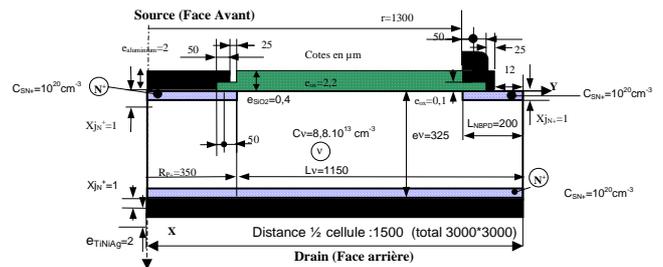


Figure 5 : Demi-vue en coupe de la structure NvN. Compte tenu de la structure du composant, celui-ci présente un axe de symétrie cylindrique (ici à gauche).

Ces résultats corroborent donc que les phénomènes (ZCEM & emballlement) observés sur des MOS sont dus à cette accumulation d'électrons (matelas) sous la grille du composant, dans la zone intercellulaire. Le matelas d'électrons, ici réalisé par une implantation N+ en face avant, ne constitue donc pas une simple vue de l'esprit, mais une réalité physique. L'observation de ces mesures expérimentales montre bien l'effet d'une limitation du courant à partir d'une certaine tension drain-source ; cette limitation dépend du rayon de l'injecteur N+ en face avant (censé représenter le matelas d'électrons) et de sa concentration en atomes donneurs.

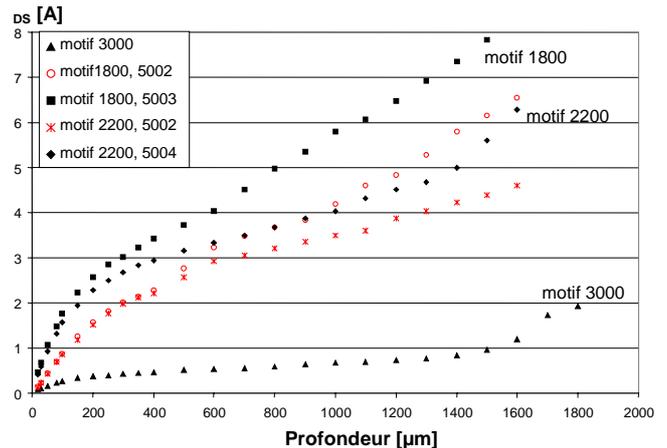


Figure 6 : Caractéristiques $I_{DS}=f(U_{DS})$ pour différents motifs de la structure NvN

3. RESULTATS DE SIMULATION

Afin de mieux appréhender les mécanismes physiques observés, des simulations à l'aide du logiciel MEDICI ont été réalisées. Des approches 1D (plus simples d'interprétation) puis 2D (pour tenir compte des effets d'épanouissement du courant) permettent de comprendre l'origine de ces résultats et leur sensibilité à différents paramètres, tels que dimensions ou dopages.

3.1. Simulations 1D

La structure simulée (Fig.7) donne une caractéristique $I_{DS}=f(U_{DS})$ analogue à celles observées de manière expérimentale. Les différents comportements (quasi-saturation et pseudo-emballlement du courant drain-source)

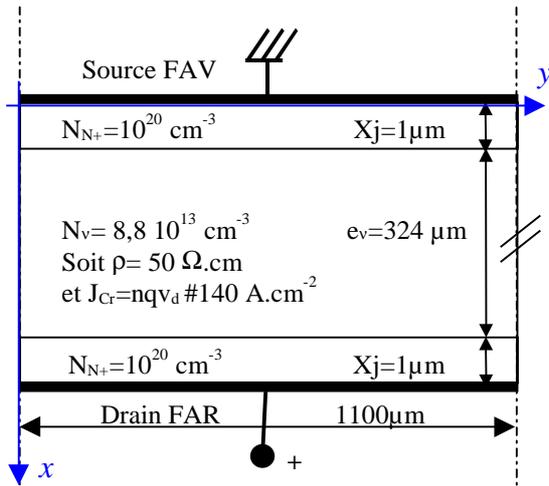


Figure 7 : Structure NvN pour la simulation 1D.

précédemment décrits sont repérés Fig.8 par des points :

- 1 : zone ohmique ;
- 2&3 : zone de résistance dynamique, ou ZCEM ;
- 4 : point d'inflexion ;
- 5 : point de retournement ;
- 6&7 : zone de résistance négative.

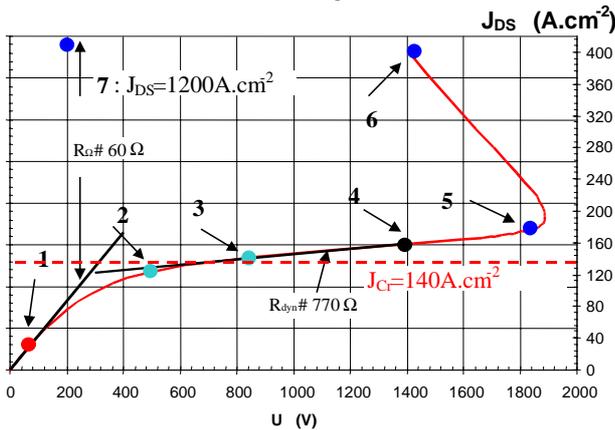


Figure 8 : Caractéristique $J_{DS}=f(U_{DS})$ pour la structure NvN 1D ($\rho_v=50\Omega.cm$).

Les points 4 à 7 n'existent que si au moins l'un des deux coefficients d'ionisation est pris en compte. Le point d'inflexion 4, vérifié mathématiquement, est représentatif du début d'ionisation. Les points suivants montrent un emballement dû à l'ionisation, suffisante à partir du point 5 pour provoquer un retournement de la caractéristique $I_{DS}=f(U_{DS})$, synonyme de résistance négative ($R<0$). D'un point de vue pratique, ce retournement signifie la fin prochaine du composant, par striction filamentaire fusionnante et dévastatrice. Seule l'ionisation semble permettre de justifier ce retournement. Cette hypothèse pouvait être rejetée au vu des faibles champs; mais il ne faut pas oublier qu'étant en ZCEM, il y a alors beaucoup d'électrons imposés par le courant existant.

Afin de préparer une modélisation, nous avons étudié l'évolution du champ électrique E_x à la verticale (axe x de Fig.7) de la structure, ainsi que les différentes concentrations (électrons, trous, et somme algébrique des

porteurs) des 7 points indiqués sur la Fig.8 et répertoriés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Points d'étude de la Fig.8.

Point	1	2	3	4	5	6	7
$J_{DS}(A.cm^{-2})$	20	120	140	160	180	400	1200
$U_{DS}(V)$	50	500	850	1400	1850	1410	200

Les figures suivantes (Fig.9 à 12) présentent ces résultats de simulation 1D.

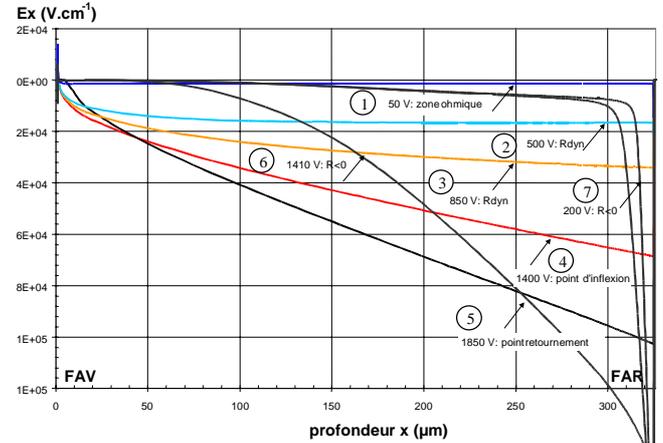


Figure 9 : Champ électrique dans la structure complète.

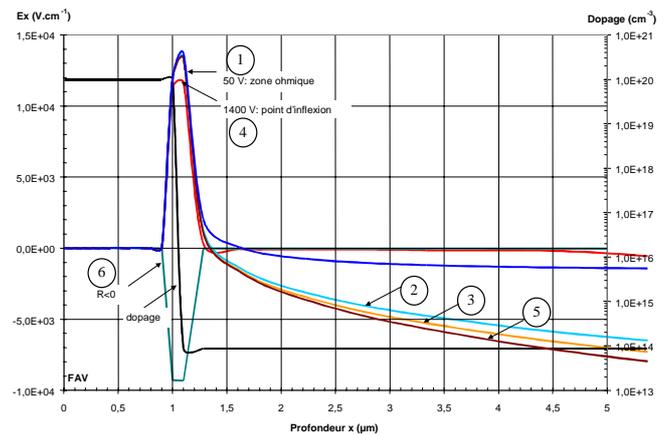


Figure 10 : Détail du champ électrique en Face Avant.

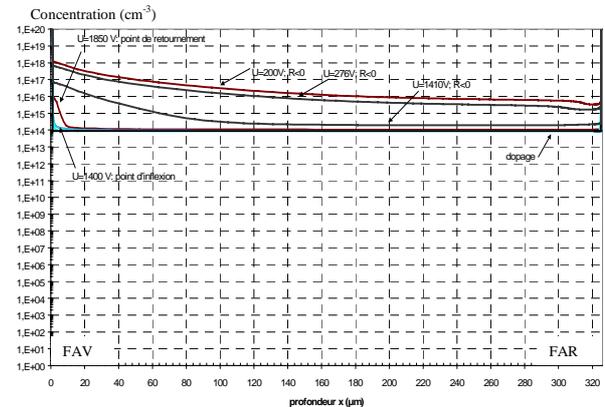


Figure 11 : Concentrations d'électrons dans la structure complète.

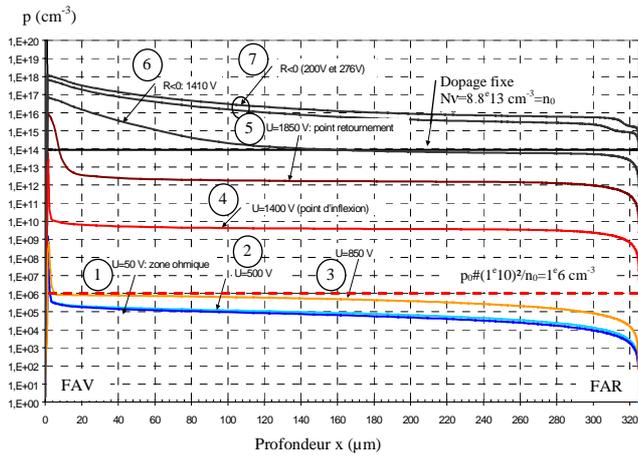


Figure 12 : Densité de trous dans la structure complète.

Les Fig.9 et 10 montrent un retournement du champ E_x . Le champ devient maximal en face arrière, dès le régime dynamique (points 2 à 7). La Fig.10 révèle un passage à 0 du champ E_x en face avant, au niveau de la jonction N+/v. Les Fig.11 à 13 mettent en évidence qu'à partir du régime de ZCEM, la densité d'électrons vérifie la relation : $n(x) > N_D$, ou sous une autre forme : $N_D - n(x) + p(x) \neq 0$. La Fig.12 montre aussi qu'à partir du point d'inflexion, la densité de trous augmente de façon importante (10^5 trous. $cm^{-3} < p(x) < 10^6$ trous. cm^{-3} pour $U_{DS} < 800V$, et 10000 fois plus pour $U_{DS} = 1400V$). Le point d'inflexion semble bien traduire le début de l'ionisation, avec génération de paires électron/trou conduisant au delà du point de retournement à l'avalanche.

3.2. Simulations 2D

La structure simulée en 2D est présentée Fig.13. Son comportement électrique (Fig.14) quant à la caractéristique $I_{DS} = f(U_{DS})$ est analogue à celui obtenu en simulation 1D et de manière expérimentale. Il faut toutefois constater une amélioration de la tenue en tension (point de retournement à 2450V au lieu de 1850V) pour une tenue en courant moindre (2,8A contre 7A en 1D). L'épanouissement des lignes de courant au sein de la structure 2D impose des densités de courant variables, donc des résistances différentes.

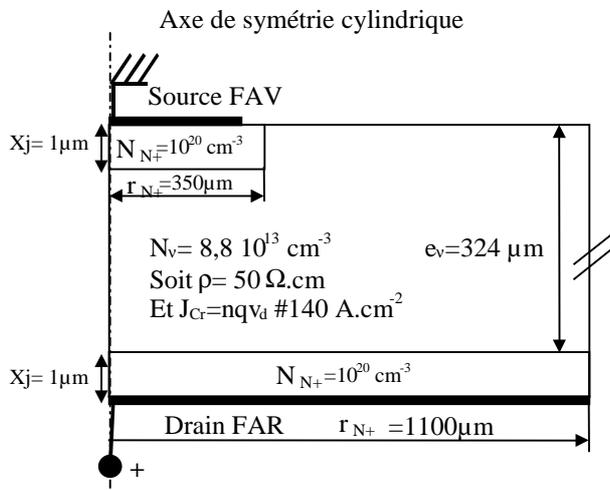


Figure 13 : Structure NvN pour la simulation 2D.

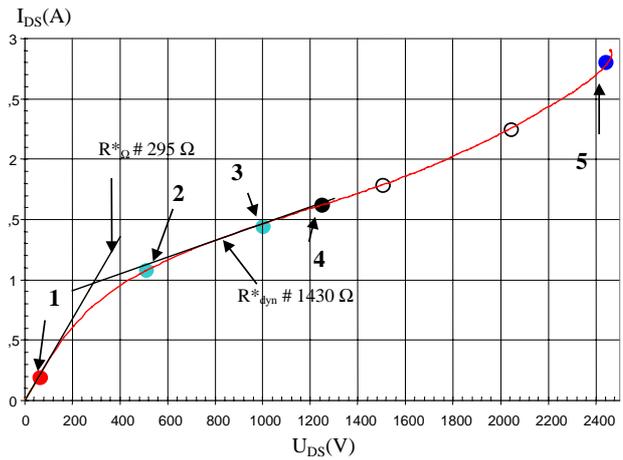


Figure 14 : Caractéristique $I_{DS} = f(U_{DS})$ pour la structure NvN 2D.

Tableau 2 : Points d'étude de la Fig.14.

Point	1	2	3	4	5
$I_{DS}(A)$	0.2	1.1	1.5	1.6	2.8
$U_{DS}(V)$	50	500	1000	1260	2450

De manière analogue aux simulations 1D, l'étude du champ électrique (Fig.15) et celle de la densité de courant dans la structure (Fig.16) ont été réalisées.

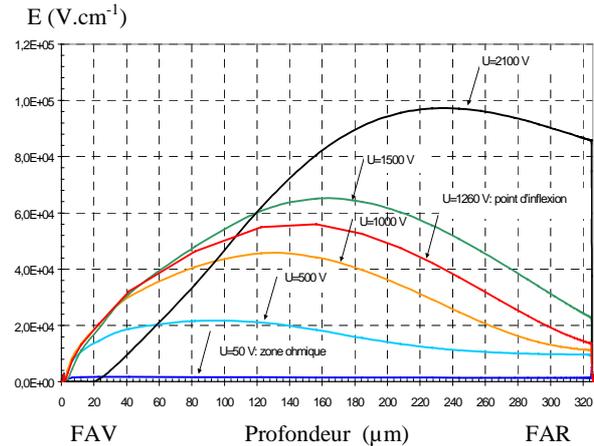


Figure 15 : Module du champ électrique dans la structure NvN 2D.

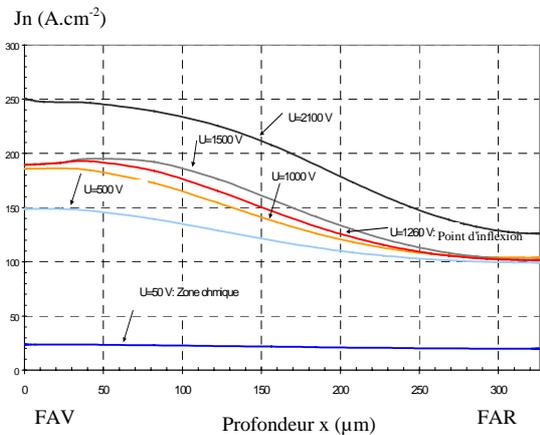


Figure 16 : Densité de courant d'électrons J_n dans la structure 2D.

Le champ maximal dans la structure 2D (Fig.15) est identique à celui relevé pour le dispositif 1D ($\#10^5 \text{V.cm}^{-1}$). Par contre, ce maximum de champ atypique n'est plus en face arrière du composant, mais se déplace de la face avant vers la face arrière (Fig.9) lorsque la tension U_{DS} augmente. De plus, la densité de courant d'électrons n'est plus constante. Il y a donc compétition entre densité de courant et champ électrique maximal à l'intérieur de la structure.

La comparaison entre les simulations 1D et 2D permet de déduire quelques influences qualitatives de certains paramètres de la structure NvN :

- amélioration de la tenue en tension avec l'augmentation de l'épaisseur de la zone v (point de retournement obtenu pour des valeurs plus élevées de U_{DS}) ;
- indépendance de la résistance dynamique (notamment en 2D) vis-à-vis de l'épaisseur e_v à partir d'une certaine valeur ;
- augmentation de la tenue en tension avec la réduction du rayon N+ en face avant.

4. MODELISATION

Des réseaux expérimentaux $I_{DS}=f(U_{DS}, U_{GS})$ obtenus sur les composants MOS de puissance émergent 5 régions :

- 1 : zone ohmique ;
- 2 : ZCEM ;
- 3 : plateau de canal ;
- 4 : ionisation à faible champ ;
- 5 : ionisation à fort champ entraînant le retournement.

Les 3 premières zones mentionnées ont déjà fait l'objet de travaux de modélisation. Notre étude s'est donc portée sur les zones 4 et 5 (ionisation), avec épanouissement 2D.

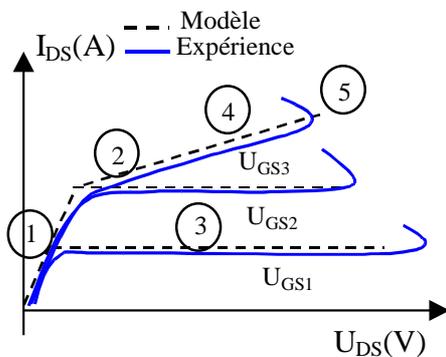


Figure 17 : Schéma des 5 zones pour la modélisation du MOS.

Ces structures ne possédant pas d'électrodes de commande sont indépendantes d'une éventuelle tension U_{GS} . La première étape est l'application du modèle ZCEM issu des précédentes études. Ayant ainsi défini les résistances de zone ohmique $R\Omega$ et de ZCEM $R_{v\text{dyn}}$, nous avons ajouté l'effet de saturation de la vitesse des porteurs en présence d'un champ électrique longitudinal $E_{//}$ intense [REF CAQ] :

$$(1) \quad \mu_n = \mu_{0n} / \sqrt{1 + (E_{//} / E_0)^2}$$

où $\mu_{0n} \# 1420 \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ correspond à la mobilité en champ faible. Ceci conduit à :

$$(2) \quad J_{DS} = \frac{\mu_{0n} \cdot J_0 \cdot U_v}{\sqrt{(v_{sat} \cdot e_v)^2 + (\mu_{0n} \cdot U_v)^2}} + \frac{U_v}{R_{dyn}^*}$$

où $U_v=U_{DS}$ à la chute de tension du canal près, et $J_0=N_v q v_d$, densité de courant critique.

Viennent ensuite les équations d'ionisation. Pour une structure NvN, supposant que seule l'ionisation par des électrons intervient pour générer des paires électron/trou, ceci conduit à :

$$(2) \quad \alpha_n = A \cdot E^\delta = 3 \cdot 10^{-35} \cdot E^7 \quad \text{et} \quad \alpha_p \approx 0$$

La simulation 1D vérifie effectivement qu'au point de retournement, les trous représentent 1% de la population des charges fixes du substrat.

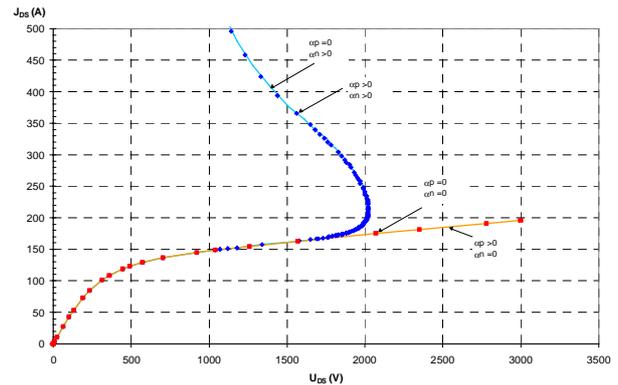


Figure 18 : Caractéristique $I_{DS}=f(U_{DS})$ pour différents coefficients d'ionisation α_p & α_n .

De plus, la Fig.18 montre que le coefficient d'ionisation des trous ne modifie pas la caractéristique $I_{DS}=f(U_{DS})$. Réciproquement, $\alpha_n \neq 0$ s'avère être une condition suffisante pour observer ionisation et retournement de la caractéristique. (NB: pour $\alpha_n=0$ et $\alpha_p \neq 0$, le retournement s'effectue pour une tension U_{DS} plus importante, voisine de 4000V).

Une seconde hypothèse est de considérer une ionisation effective sur une zone réduite à 10% de l'épaisseur e_v , avec un champ effectif E_{eff} , équivalent, constant, et égal au champ maximal E_M (Fig.19).

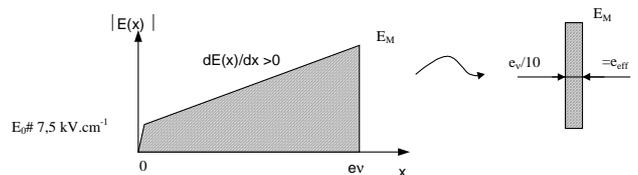


Figure 19 : Hypothèse simplificatrice de la zone d'ionisation.

Ces hypothèses conduisent alors à l'équation analytique :

$$(3) \quad J_{DS} = \frac{\mu_{0n} \cdot J_0 \cdot U_v}{\sqrt{(v_{sat} \cdot e_v)^2 + (\mu_{0n} \cdot U_v)^2}} + \frac{U_v}{R_{dyn}^*} - J_0 + n_0 \cdot \left(1 + e_{\text{eff}} \cdot A \cdot \left(\left(2 \cdot U_{DS} / e_v\right) - E_0\right)^7\right) \cdot q \cdot v_{sat}$$

Enfin, il faut passer de cette expression de la densité de courant J_{DS} à celle du courant I_{DS} avec son épanouissement, qui, pour commencer, peut être simplifié à 45°, avec une

section équivalente égale à la moyenne géométrique des 2 surfaces en regard (Fig. 20).

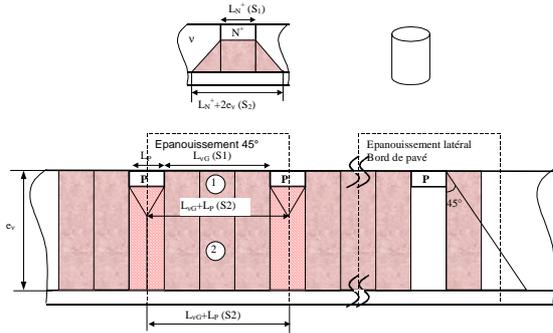


Figure 20 : Epanouissement dans la structure.

Par contre, un épanouissement plus réaliste avec un angle arbitraire α nécessite de redéfinir les résistances $R\Omega$ et $R_{v\text{dyn}}$, au moyen des résistances équivalentes de zone. De cette manière, la résistance totale d'une cellule est la somme de ces 2 résistances : $R_{Tc}=R_1+R_2$, et la résistance totale du composant R_T correspond à la mise en parallèle de ces résistances R_{Tc} . Il est important à ce niveau de dissocier $R\Omega$ (fonction linéaire de l'épaisseur e_v) de $R_{v\text{dyn}}$ (variation avec le carré de e_v). L'ensemble "modèle ZCEM+modèle de mobilité+ionisation+épanouissement" conduit aux résultats des Fig.21 pour la structure NvN et Fig.22 pour le MOS.

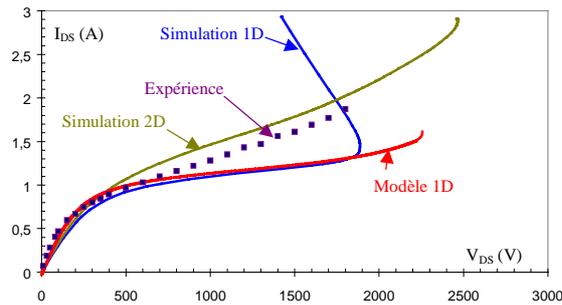


Figure 21: Comparisons simulations / modèle / expérience sur une structure NvN.

La Fig.21 montre un bon accord entre simulation 2D et mesures, et entre simulation 1D et modèle. Le décalage entre 2D et 1D résulte d'un choix de surface inadéquat dans le cas dynamique. La Fig.22 montre pour le MOS un bon accord entre la mesure et le modèle ; le décalage provient

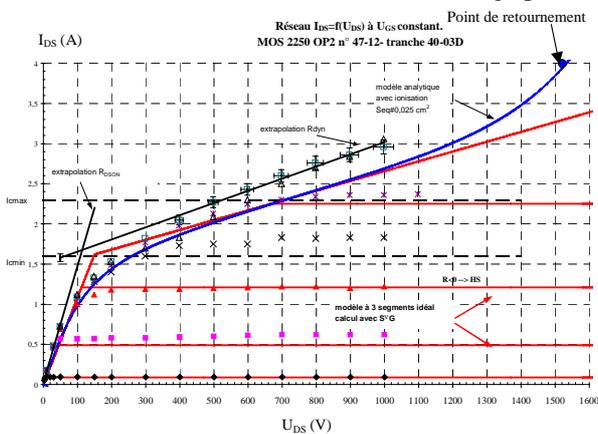


Figure 22: Comparaison modèle / expérience sur une structure MOS.

d'une erreur d'estimation des surfaces mises en jeu (notamment au niveau des cellules périphériques).

5. CONCLUSION

Ce travail sur les structures NvN permet une meilleure compréhension de la ZCEM, en montrant l'importance de paramètres physiques tels que :

- l'effet de saturation de la vitesse des porteuses de charges n et p ,
- l'ionisation par impact,
- la distance inter-cellulaire,
- et l'épanouissement vertical du courant à travers le composant MOS vertical de puissance.

De plus, cette étude se révèle intéressante dans la mesure où elle a permis de comprendre et d'isoler le retournement ($R<0$) de la caractéristique $I_{DS}=f(U_{DS}, U_{GS})$ pour des valeurs élevées de tensions U_{DS} . L'introduction des points de retournement et d'inflexion permet de définir de manière plus précise l'Aire de Sécurité (SOA) des transistors MOS (Fig.23), augmentant ainsi la fiabilité de mise en œuvre de ces derniers. D'autres développements existent dans la thèse de l'un d'entre nous [4]; elle constitue la charpente de la synthèse présentée ici.

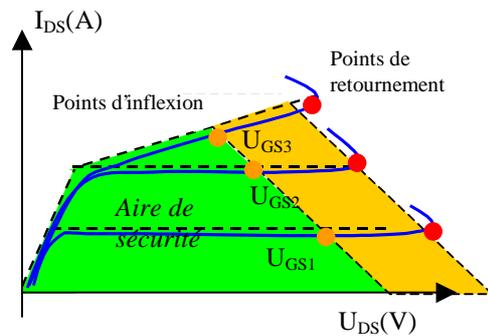


Figure 23 : Nouvelle Aire de Sécurité du composant.

6. REFERENCES

- [1] F. NALLET, J. ARNOULD, D. PLANSON, L. ROUX, J.P. CHANTE, Zone de Charge d'Espace Mobile dans un transistor VDMOS haute tension 2000V, EPF'98 – Belfort, pp.47-52, 1998.
- [2] T. BOUCHET, G. VERNEAU, F. TORREGROSA, J. ARNOULD, Striction unicellulaire dans les MOS Haute Tension. Modèle ZCEM en remplacement de celui du TEC à jonction parasite vertical, EPF'00 - Lille, pp.83-91, 2000.
- [3] L. AUBARD, "Modélisation des transistors MOS de puissance pour l'électronique de commutation", thèse de doctorat INPG, 1999.
- [4] T. BOUCHET, "Zone de Charge d'Espace Mixte (ZCEM) dans le drain des MOS haute tension", thèse de doctorat de l'Université des Sciences d'Aix-Marseille III, 2001.