

Sommaire

Introduction	- 2 -
Chapitre 1 : Rappels	- 3 -
I- Piégeage dans le MOS	- 4 -
A- Dégradations transitoires	- 4 -
B- Dégradations permanentes	- 4 -
1- Effets de la charge dans l'isolant	- 5 -
2- Effets de la charge à l'interface	- 6 -
II- Dépiégeage dans un transistor MOS	- 6 -
III- Etude expérimentale	- 8 -
IV- Résultats obtenus	- 12 -
Chapitre 2 : Le mailleur	- 15 -
I- Fonctionnement du mailleur	- 15 -
II- Résolution du problème de discontinuité	- 18 -
Chapitre 3 : L'optimiseur	- 21 -
I- Méthode de Newton-Raphson	- 21 -
A- Théorie	- 21 -
B- Application au programme "Balayeur"	- 22 -
II- Algorithmes génétiques	- 25 -
A- Définition	- 25 -
B- Mise en oeuvre	- 25 -
1- Définition d'un alphabet de base	- 25 -
2- Définitions des fonctions de bases	- 26 -
3- Exemple d'application	- 27 -
C- Application à la recherche dans les oxydes	- 29 -
1- Validation de l'algorithme sur un oxyde de 80 nm	- 30 -
2- Validation de l'algorithme sur un oxyde de 95 nm	- 30 -
3- Essai de recherche avec 4 paramètres	- 31 -
Conclusion	- 33 -
Bibliographie	- 34 -

Introduction

La plupart des transistors utilisés dans l'électronique moderne sont des transistors MOS (Métal Oxyde Semi-conducteur).

Les circuits comprenant ces composants sont ainsi utilisés dans des domaines de plus en plus vastes, du spatial à la micro-informatique, en passant par l'aviation, l'électronique embarquée (démarrage électronique), la télévision (les alimentations à découpage) etc...

Ces composants utilisent l'oxyde de silicium SiO_2 comme couche isolante. Il est impossible de fabriquer un matériau sans aucun défauts. Ces défauts peuvent être occasionnés par une impureté (atome étranger dans la fabrication de l'oxyde), on parle alors de défauts extrinsèques, ou à une imperfection due à la nature même du matériau, on parle alors de défauts intrinsèques. Une association de matériaux de nature différentes sont à l'origine des défauts localisés à l'interface ou au voisinage immédiat de l'interface de chacun des matériaux. Une irradiation par rayonnement ionisant engendre des défauts équivalents à ceux de la fabrication.

Ces défauts sont à l'origine du piégeage de charges (positives ou négatives) dans les oxydes.

Les expériences que l'on peut effectuer sur les oxydes (excepté la méthode de l'onde thermique) permettent de déterminer les dérives de tension seuil, les densités de charges surfaciques équivalentes, mais elles ne permettent pas de connaître la distribution spatiale des charges piégés dans l'oxyde.

Notre travail aura pour but de déterminer la distribution spatiale des pièges dans les oxydes par simulation numérique.

Nous effectuerons dans un premier temps un rappel succinct du fonctionnement d'un Transistor MOS, suivit d'un rappel des expériences effectuées par le C.E.A, qui serviront de base à notre recherche, ainsi qu'un résumé du stage de DEA de Pascal Izzo (*qui à effectué son stage sur le même sujet l'an dernier*).

Dans le chapitre 2, nous étudierons le fonctionnement du mailleur, les problèmes qu'il a posé, ainsi que les solutions que l'on peut apporter au programme.

Dans le chapitre 3, nous étudierons deux méthodes d'optimisation, la méthode de Newton-Raphson qui est actuellement utilisée, ainsi que la méthode des Algorithmes Génétiques qui sera pour la première fois appliquée à une optimisation à ce type de problème.

Chapitre 1

Les défauts créés par les interactions entre le rayonnement et la matière dépendent du nombre de particules, de leur énergie, et du matériau. Mais c'est avant tout, l'énergie qu'il faudra céder au matériau, pour produire une défaillance, qui est importante.

C'est pour cela que l'on parlera de "dose": quantité d'énergie déposée par unité de volume ou plutôt énergie déposée par unité de masse ex : 1 rad(Si) \leftrightarrow 100 erg par gramme de Silicium, un erg correspondant à 10^{-7} J.

On parlera également de "débit de dose": une unité de dose (rad, erg...) par unité de temps ex : 1 rad(Si)s⁻¹.

On peut distinguer 2 zones de piégeage (Fig: I.1) dans le transistor MOS, qui seront la source de 2 grands types d'effets :

* dans le conducteur (Fig: I.1 Zone 1), et dans le semi-conducteur (Fig: I.1 Zone 3), lieu d'apparition des phénomènes d'upset, de latch-up, et de SEU (Single Event Upset).

* dans le SiO₂ (Fig: I.1 Zone 2), où le phénomène de dose est primordial, et donne lieu à des accumulations de charges piégées pour de très longues durées.

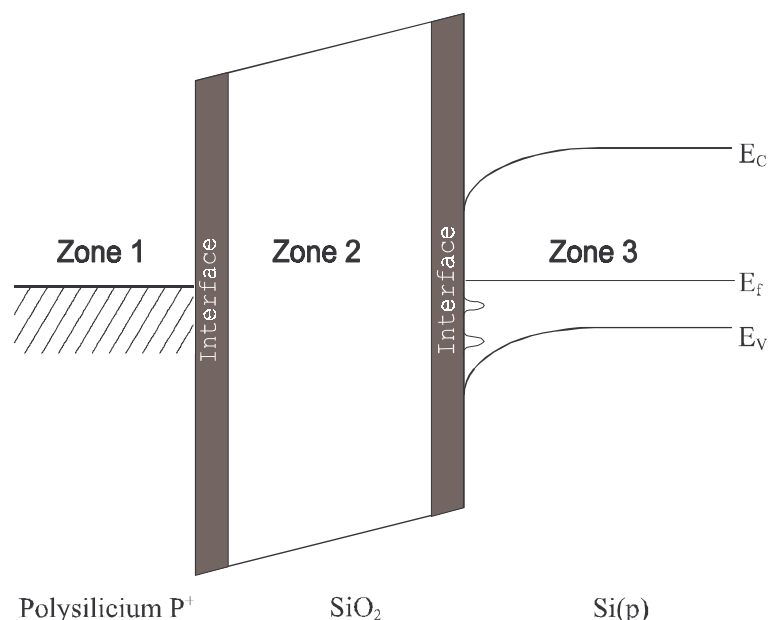


Fig: I.1 Localisation des zones pièges

I- Piégeage dans le MOS :

Un Gray (Joule/kg) correspond à une énergie cédée de 6.10^{15} eV/gr, ce qui permet la génération d'environ 4.10^{15} paires électrons trous/cm³ dans le silicium. Si on

considère que lors d'une mission spatiale, une sonde reçoit 1kGy (au maximum) cela permet de créer environ 6.10^{18} paires/cm³.

A- Dégradations transitoires :

Dans les métaux sachant qu'il y a environ 10^{22} charges par cm⁻³, le déséquilibre apporté par l'irradiation sera très rapidement résorbé, voire même dans la quasi-totalité des cas, passera inaperçu.

Dans la zone de charge d'espace, et dans la zone neutre (semi-conducteur) compte tenu que la densité de charge varie de 10^{14} à 10^{19} cm³, le retour à l'équilibre se fera par recombinaison, ou par libération thermique. Le temps nécessaire au retour à l'équilibre sera de l'ordre de la seconde.

Les dégradations transitoires induisent les phénomènes suivant :

* **L'UpSet** : c'est le changement accidentel d'un niveau logique dans les mémoires et les microprocesseurs. Ce phénomène arrive par la propagation dans le circuit des perturbations provoquées par l'irradiation. Il occasionne une diminution temporaire de la tension V_D-V_S appliquée aux bornes de la cellule mémoire. En effet, l'augmentation de l'intégration des composants dans les circuits intégrés implique, la diminution des tensions d'alimentations pour éviter toute surchauffe. Les MOS commutent donc avec des tensions de plus en plus faibles; un rayonnement qui jusque là n'était pas suffisant pour déclencher l'Upset, le devient.

* **SEU** : phénomène identique à l'UpSet mais qui réside dans le caractère localisé de la zone de génération des charges. Dans ce cas le changement du niveau logique est provoqué par le passage d'une seule particule.

* **Latch Up** : Il s'agit de la mise en conduction du thyristor parasite dans la structure de l'inverseur CMOS. Après le passage de l'irradiation un courant auto-entretenu (par l'alimentation) se maintient entre V_D et V_S , et peut provoquer jusqu'à la destruction du circuit.

B- Dégradations permanentes :

Par dégradations permanentes, on entend les dégradations à constantes de temps très longues (quelques secondes à plusieurs années). Ces dégradations (création d'états pièges) se situent dans la silice et à l'interface Si/SiO₂ et sont dues aux impuretés et aux défauts inhérents aux matériaux.

Dans la silice, la création de paires électrons trous est 5 à 10 fois moins importante que dans le silicium, soit, dans le cas précédent près de 6.10^{17} paires. Les charges créées dans l'isolant ne peuvent pas se recombinaisonner comme dans les métaux ou dans les semi-conducteurs, le retour à l'équilibre ne peut se faire que par libération thermique. Les paires se trouvent séparées par le champ électrique dû à la polarisation appliquée et à la structure de bande d'énergie. Du fait de la grande mobilité des électrons il est généralement admis que ceux-ci sont très rapidement évacués, et les trous se retrouvent piégés sur des zones de piégeages avec une probabilité de piégeage f_t (qui varie de 10^{-2} pour une technologie durcie, 0,85 pour les composants du commerce, à 0,9 et plus pour les dosimètres). La charge piégée est donc de

manière générale toujours positive.

1- Effets de la charge dans l'isolant :

Les charges ainsi piégées sont à l'origine entre autre de la dérive de la tension de seuil du transistor.

On peut l'écrire sous la forme suivante (Eq: 1.1) pour une distribution quelconque de charges dans l'oxyde :

$$\Delta V(t) = \int_0^d \frac{\rho(x,t) \cdot x \cdot dx}{\epsilon} \text{ si } \rho(x,t) = \rho(t) \text{ on obtient} \quad \text{Eq: 1.1}$$

$$\Delta V(t) = \frac{\rho(t) \cdot d^2}{2 \cdot \epsilon} = \frac{\rho(t) \cdot S \cdot d}{2} \cdot \frac{d}{\epsilon \cdot S} = \frac{Q_e}{C_{ox}}$$

- * C_{ox} : capacité de l'oxyde.
- * Q_e : charge équivalente qui située aux limites de l'oxyde produirait la même dérive de tension .
- * d: épaisseur de l'oxyde.
- * S: surface de la capacité MOS.
- * $\rho(x,t)$: densité de charges piégées fonction de la position et du temps.

Dans le cas où les charges séparées se trouvent à l'interface Si/SiO₂ de l'oxyde la dérive de tension devient maximale. Son expression devient (Eq: 1.2) :

$$\Delta V_{max} = \frac{Q \cdot d^2}{\epsilon} \text{ avec } Q = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \alpha \cdot D \cdot t_i \quad \text{Eq: 1.2}$$

$$\Delta V_{max \text{ SiO}_2} \text{ (Volt / krad)} = 3,6 \cdot d^2$$

- * Q_i : la quantité de charge totale dans l'oxyde, générée par une irradiation d'une durée t_i (Cb.cm⁻³).
- * d: l'épaisseur de l'oxyde (µm).
- * D: dose (Gy).
- * α : coefficient de génération de paires électrons/trous.

En cas d'irradiation à forte dose, la variation de la tension de seuil sature à une valeur maximale due à :

- * un épuisement des sites pièges
- * l'annulation du champ électrique dans la zone de collection de l'isolant.

Comme nous l'avons vu précédemment la charge piégée est généralement positive, elle amène une diminution de tension de grille, ce qui implique :

- * Réduction de l'immunité au bruit (inverseur CMOS),
- * Accroissement du courant de fuite stationnaire (inverseur CMOS),
- * Réduction de la vitesse de commutation,
- * Blocage en position 'on' (MOS à canal n, il faut une tension de plus en plus basse pour arrêter la conduction),
- * Blocage en position 'off' (MOS à canal p, il faut une tension de plus en plus élevée pour rendre le transistor passant).

2- Effets de la charge à l'interface :

Outre une dérive de tension induite, les charges à l'interface provoquent une diminution de la mobilité des porteurs dans le canal. La mobilité des porteurs dans le canal est conditionnée par leur diffusion sur les états de surface de Si/SiO₂. Plus la densité de ces états de surface sera grande plus la mobilité des porteurs diminuera. Les irradiations ont pour propriété d'accroître la densité superficielle de ces états.

Outre le fait que la charge influence la tension de seuil, elle peut réduire jusqu'à 60% la mobilité des électrons, ce qui diminue la vitesse de réaction des circuits.

II- Dépiégeage dans un transistor MOS [CIRBA 96]:

Le dépiégeage consiste en la libération d'un porteur, piégé dans la bande interdite, vers la bande de conduction pour les électrons, ou vers la bande de valence pour les trous.

On peut ainsi dans la silice libérer les charges par plusieurs processus:

- * par réémission par effet thermique (a),
- * par recombinaison (b).

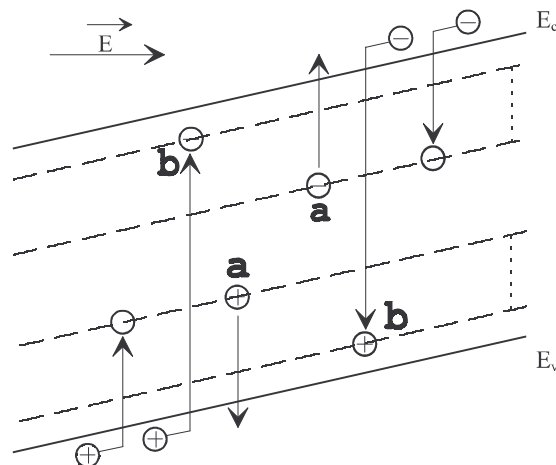


Fig: I.2 Mécanisme de piégeage et dépiégeage dans le SiO₂

* par une libération du porteur par effet tunnel (Fig: I.3),

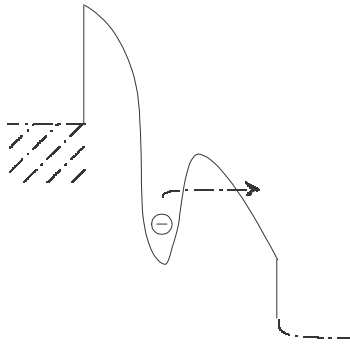


Fig: I.3 Libération de porteur par effet tunnel

L'importance de l'effet tunnel est inversement proportionnel à la diminution de l'épaisseur d'oxyde. C'est un phénomène qui n'est pas influencé par la température mais qui l'est de manière importante par le champ électrique.

L'effet tunnel vide les pièges quelque soit leur niveau d'énergie, seul importe la distance avec l'interface. On remarque que le front de dépiégeage s'enfonce dans l'oxyde au cours du temps, c'est une technique qui permet de déterminer la densité des pièges en fonction de la distance à l'interface.

Les pièges ont des niveaux énergétiques situés dans la bande interdite, on parle alors d'**énergie d'activation** (énergie nécessaire à la libération du trou). On parle aussi de **facteur de fréquence** (inverse du temps nécessaire à la libération du trou). On écrit ainsi le temps de stockage de charges sur les défauts du niveau i par l'équation suivante (Eq: I.3) :

$$V(E_i, T) = T^{-1}(E_i, T) = v_i \cdot e^{\left(\frac{E_i}{k.T}\right)} \quad \text{Eq: I.3}$$

- avec * E_i l'énergie du niveau i .
- * T la température en kelvin de l'expérience.
- * U_i facteur de fréquence variant de 10^7 à 10^{14} s^{-1} .

Supposons qu'une charge soit piégée au milieu du gap, soit environ 4,25eV dans la silice, on connaît le facteur de fréquence qui est de 10^{-12} , et on laisse le circuit à la température ambiante cad 300°K . Après calcul, la durée de vie est de 10^{60} secondes soit plus de $3 \cdot 10^{52}$ années Il est particulièrement intéressant de connaître les niveaux qui seront libérés pour des durées et des température données. On peut ainsi savoir comment va se régénérer un composant.

Ci-après se trouve un exemple récapitulatif des niveaux qui seront dépiégés, pour une durée de fonctionnement à une température donnée (Tab: I.1) :

	1 sec	1 h	1 jour	168 h	1 mois	1 an	5 ans	10 ans	100 ans
300	0,71	0,93	1,01	1,06	1,10	1,16	1,20	1,22	1,28
325	0,77	1,00	1,09	1,15	1,19	1,26	1,30	1,32	1,39

373	0,89	1,15	1,25	1,32	1,36	1,44	1,49	1,52	1,59
423	1,01	1,31	1,42	1,49	1,55	1,64	1,70	1,72	1,80

Tab: I.1 exemple de dépiégeage (temps fonction de la température)

Il faut savoir que lors d'une mission spatiale il n'est pas rare que certains circuits fonctionnent sous des températures voisines de 80°C, voire parfois plus. Ces circuits sont donc moins sensibles aux radiations puisqu'ils subissent un recuit "naturel". C'est donc une information importante que l'on se doit de connaître lorsque l'on doit choisir et caractériser des composants pour un projet spécifique.

III- Etude expérimentale ^{[PAILLET 95]:}

Nous utiliserons afin de valider nos simulations, les résultats du C.E.A (Commissariat à l'Energie Atomique) du centre d'étude de Bruyère le Chatel.

Le but étant d'avoir la répartition en volume des charges piégées dans un oxyde SIMOX¹, le C.E.A. a posé comme hypothèse que les distributions de pièges sont les mêmes pour une épaisseur d'oxyde commune (Fig: I.3 page suivante).

Afin de déterminer la répartition en volume des charges piégées d'un oxyde de 400 nm, on étudiera la dérive de tension seuil sous polarisation afin de créer un champ positif de 1MV/cm, un champ négatif de -1MV/cm, et nul dans des oxydes de 80, 95, 121.5, et 400 nm.

On pourra ainsi après la mesure de la dérive de la tension seuil de l'oxyde 80 nm et de 95 nm en déduire la répartition des charges piégées dans 95-80 =15 nm. on appliquera la même méthode pour les oxydes de 121.5 nm et 95 nm, puis entre 400 nm et 121.5 nm.

Les oxydes sont fabriqués de la manière suivante (Tab: I.2 page suivante):

- l'oxyde de 80 nm (mince) à subi un bombardement d'ions oxygène (fluence de 4.10^{17}) suivit d'un recuit à 1320° pour réorganiser sa structure cristalline.
- l'oxyde de 95 nm (moyen I) a subit le même traitement que l'oxyde de 80nm mais on a rajouté une implantation supplémentaire d'ions oxygène (fluence 10^{17}) suivie un nouveau recuit.
- l'oxyde de 121.5 nm à subit exactement le même traitement que l'oxyde de 95nm si ce n'est que la deuxième implantation a été effectuée sous une fluence de 4.10^{17} .
- l'oxyde de 400 nm n'a lui subit qu'une seule implantation à $1.8.10^{17}$ et un seul recuit à 1320°C.

¹ l'oxyde SIMOX est une couche de silicium dans laquelle on a implanté par bombardement ionique des atomes d'oxygènes, à bas niveaux d'énergie.

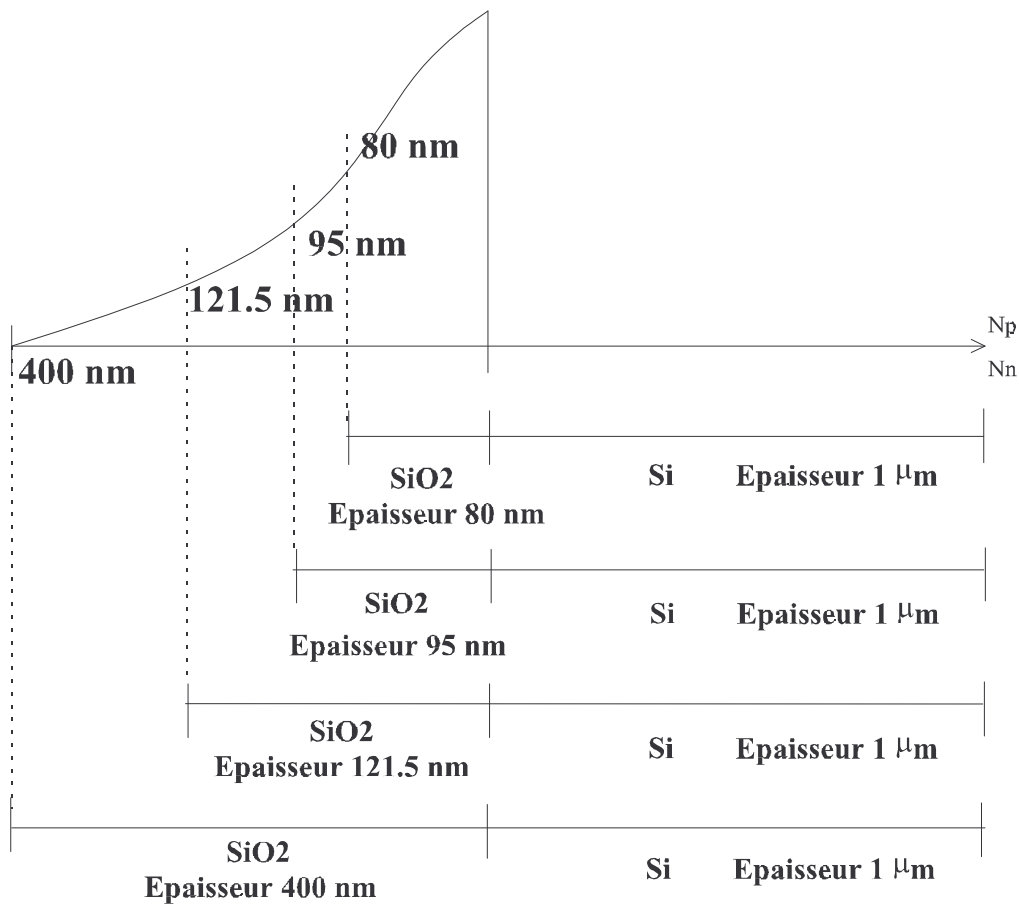


Fig: I.3 Distributions des pièges dans l'oxyde

Type d'oxyde	Epaisseur d'oxyde (nm)	Flux (cm ⁻²)	Energie (keV)	Température (°C)	Temps (h)
Mince	80	4*10 ¹⁷	120	1320	6h Ar/O ₂
Moyen I	95	4*10 ¹⁷	120	1320	6h Ar/O ₂
		+ 10 ¹⁷	120	1320	6h Ar/O ₂
Moyen II	121.5	4*10 ¹⁷	120	1320	6h Ar/O ₂
		+ 4*10 ¹⁷	120	1320	6h Ar/O ₂
Epais	400	1.8*10 ¹⁸	190	1320	6h Ar/O ₂

Tab: I.2 Données technologiques

Pour chacun de ces oxydes on effectuera l'irradiation à champ nul, à champ positif, et à champ négatif, le C.E.A. a donc obtenu les résultats suivant :

- En champ nul (Fig: I.4) on constate que la dérive de tension seuil est très importante pour les oxydes de 400 nm (32 volts), par contre elle ne dépasse pas le 15 volts pour les oxydes allant de 80 nm à 121.5 nm.

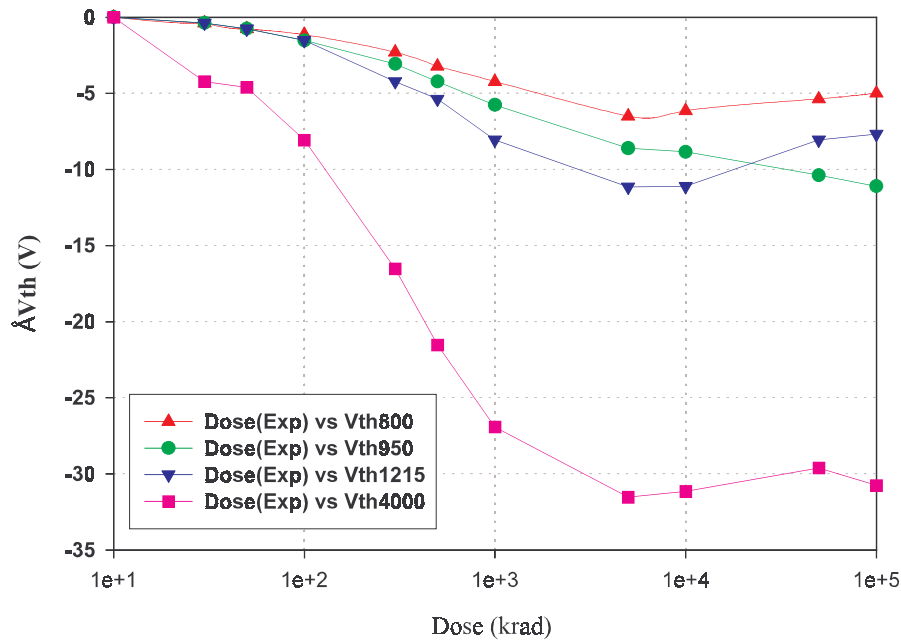


Fig: I.4 Dérive de la tension seuil en fonction de la dose pour un champ nul (0MV/cm)

● En champ négatif (Fig: I.5 page suivante) on constate une dérive de tension seuil “importante” au début de l’expérience due au piégeage plus rapide des trous par rapport aux électrons.

Puis on observe une zone constante vers la fin de l’irradiation due au fait que lorsque l’on a terminé de remplir les pièges à trous on continue à remplir les pièges à électrons jusqu’à obtenir un équilibre entre recombinaison et réémission.

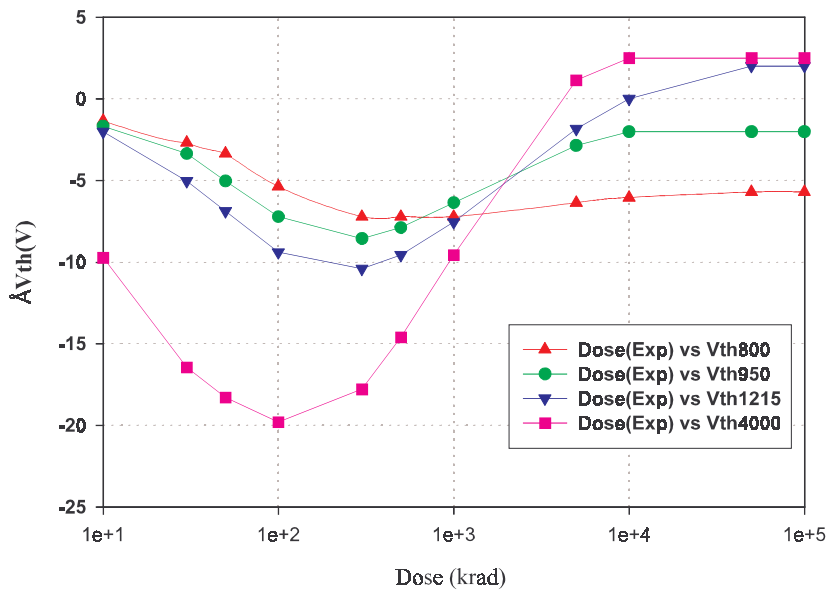


Fig: I.5 Dérive de la tension seuil en fonction de la dose pour un champ négatif (-1MV/cm)

● En champ positif (Fig: I.6) on remarquera une dérive très importante de la tension seuil pour l'ensemble des oxydes (de l'ordre de 40 volts pour les oxydes de 80 et 95 nm, et de 70 volts pour l'oxyde de 121.5 nm). Il n'a pas été possible de mesurer la dérive de tension pour l'oxyde de 400 nm, car celle ci est trop élevée.

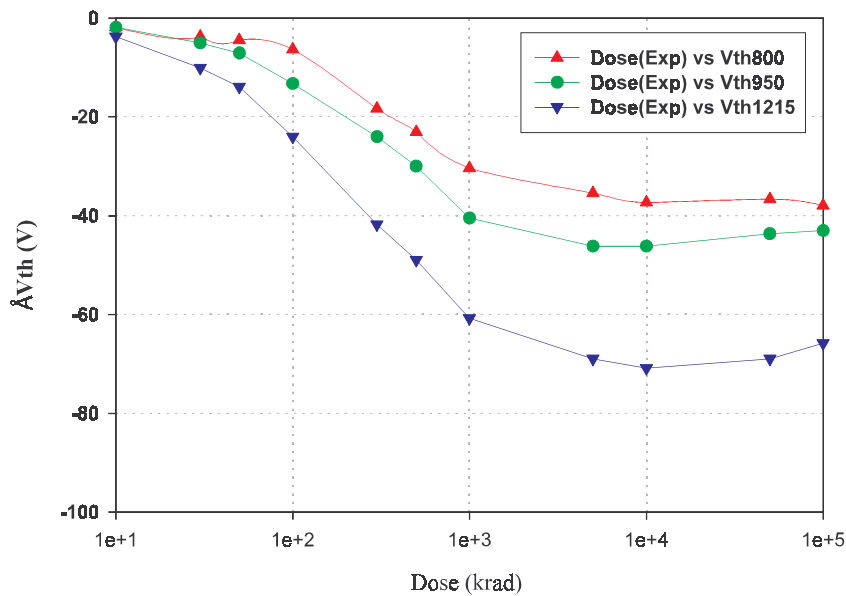


Fig: I.6 Dérive de la tension seuil en fonction de la dose pour un champ positif (+1MV/cm)

On peut ainsi en déduire pour chaque type d'oxyde la densité de piégeage des trous et des électrons, ainsi que la section efficace de capture pour les trous et les électrons (Tab: I.3).

Type d'oxyde	Trou N_t (cm ⁻²)	Trou σ_t (cm ⁻²)	Electron N_t (cm ⁻²)	Electron σ_t (cm ⁻²)
Mince	2.7 ± 0.3 $\cdot 10^{12}$	2.9 ± 0.3 $\cdot 10^{-13}$	7.1 ± 0.1 $\cdot 10^{11}$	28 ± 16 $\cdot 10^{-15}$
Moyen I	4.3 ± 0.2 $\cdot 10^{12}$	2.8 ± 0.2 $\cdot 10^{-13}$	2 ± 0.2 $\cdot 10^{12}$	15 ± 10 $\cdot 10^{-15}$
Moyen II	5.6 ± 2.2 $\cdot 10^{12}$	3.7 ± 1.7 $\cdot 10^{-13}$	2.4 ± 0.3 $\cdot 10^{12}$	7.9 ± 3.3 $\cdot 10^{-15}$
Épais	1.3 ± 0.4 $\cdot 10^{13}$	5.2 ± 1.3 $\cdot 10^{-14}$	2.5 ± 0.3 $\cdot 10^{12}$	5.4 ± 3.2 $\cdot 10^{-15}$

Tab: I.3 Valeurs technologiques

IV- Résultats obtenus [IZZO 97]:

Des courbes précédentes (Fig: I.4 à I.6), il est possible d'extraire les valeurs significatives suivantes des dérives de tension seuil (Tab: I.4). Ces valeurs seront utilisées par la suite dans le simulateur comme paramètres à retrouver.

	Polarisation positive +1MV/cm	Polarisation nulle	Polarisation négative -1MV/cm	
	$\Delta V_{th_{lim}}$ (V)	$\Delta V_{th_{lim}}$ (V)	$\Delta V_{th_{min}}$ (V)	$\Delta V_{th_{lim}}$ (V)
80nm	-37.97 V	-5 V	-7,215 V	-5.705 V
95nm	-43.03 V	-11.53 V	-8.557 V	-2.013 V
121.5nm	-65.82 V	-7.69 V	-10.403 V	2.016 V
400nm	/	30.38 V	-19.799 V	0 V

Tab: I.4 Dérives de tension seuil minimale et limites pour les diverses polarisations

Remarque :

- $\Delta v_{th_{min}}$: dérive de tension minimale (la plus négative).
- $\Delta v_{th_{lim}}$: dérive de tension pour une dose de 100 Mrad.

Le travail de Pascal IZZO fut de déterminer les paramètres de N_n , N_p , σ_n , σ_p permettant de retrouver les résultats du C.E.A. pour chaque oxydes. Pour effectuer ses simulations il a utilisé le dispositif expérimental suivant (Fig: I.7):

- un barreau de silicium (Si) de $1\mu\text{m}$ (10^{-6}m), dont le dopage est de 1.10^{18}cm^{-3} (soit de 1.10^{24}m^{-3}). Une de ses extrémités est placée à la masse.

- un barreau de SiO_2 d'épaisseur variable 80 nm, 95 nm, 121.5 nm et 400 nm. Ce barreau sera polarisé à ± 8 V, ± 9.5 V, ± 12.15 V et ± 40 V pour les oxydes respectifs, ceci permettant de recréer à l'intérieur du SiO_2 un champ constant de $\pm 1\text{MV/cm}$. La distribution des pièges à l'intérieur de l'oxyde sera fixé par une gaussienne centrée à l'interface Si/SiO_2 et dont la largeur est $\sigma_n = \sigma_p = 0.05 \mu\text{m}$.

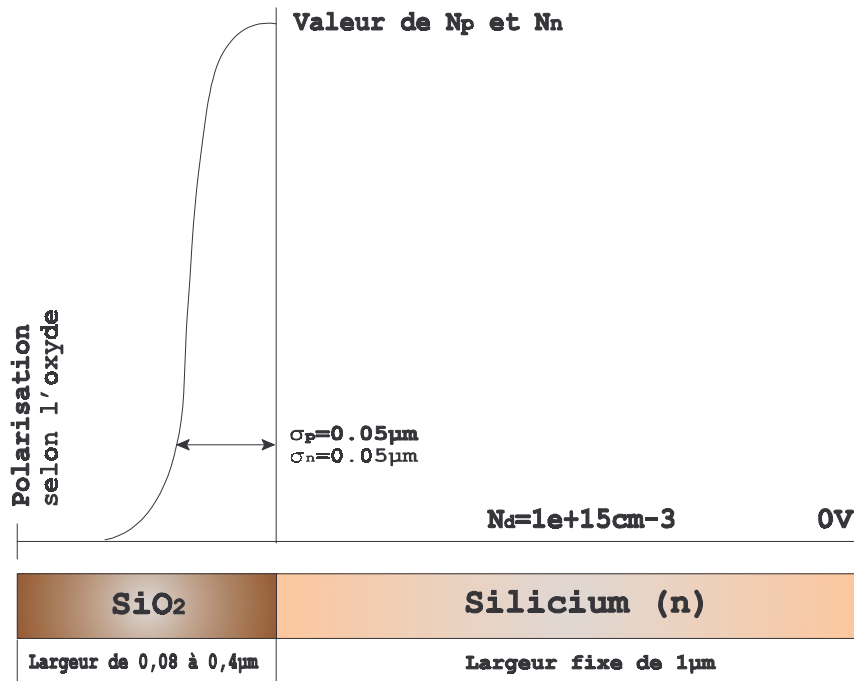


Fig: I.6 Dispositif expérimental

Il a pu à partir de ces données de base déterminer les valeurs de N_p et N_n permettant de retrouver les valeurs du C.E.A. Il a ainsi obtenu, pour une polarisation négative assurant un champ constant de 1MV/cm à l'intérieur de l'oxyde (Tab: I.4):

	80nm	95nm	121.5nm	400nm
$N_p(\text{cm}^{-3})$	$3.78 \cdot 10^{18}$	$1.15 \cdot 10^{19}$	$2.00 \cdot 10^{19}$	$2.00 \cdot 10^{19}$
$N_n(\text{cm}^{-3})$	$6.00 \cdot 10^{17}$	$2.88 \cdot 10^{17}$	$4.35 \cdot 10^{18}$	$3.063 \cdot 10^{18}$

Tab: I.4 Récapitulatif des valeurs

Les résultats présentés, laissent alors prévoir qu'il semblait possible de pouvoir optimiser les 4 oxydes ensemble. Pour cela on utilisera comme variables :

- les pièges à trous.
- la gaussienne des pièges à trous.
- les pièges à électrons.
- la gaussienne des pièges à électrons.

Voici les résultats tels qu'ils furent présentés (Tab: I.5) :

	$N_p(\text{cm}^{-3})$	$N_n(\text{cm}^{-3})$	$\sigma_p(\text{nm})$	$\sigma_n(\text{nm})$	$V_{th_{min}}(\text{V})$	$V_{th_{lim}}(\text{V})$	Champ
80nm	$4.35 \cdot 10^{18}$	$5.7 \cdot 10^{18}$	100	50	-7.228	-5.777	Négatif
80nm	$4.35 \cdot 10^{18}$	$5.7 \cdot 10^{18}$	100	50	/	-35.663	Positif
95nm	$4.00 \cdot 10^{18}$	$5.7 \cdot 10^{18}$	100	50	/	-43.78	Positif
121.5nm	$3.75 \cdot 10^{18}$	$5.7 \cdot 10^{18}$	80	50	/	-58.921	Positif

Tab: I.5 Résultats de simulations

Cependant il n'a pas été possible, de retrouver les bons paramètres de N_p , N_n , σ_p , σ_n permettant d'obtenir les bonnes dérivées de tensions mesurées par le C.E.A., pour les 4 oxydes ensemble (80, 95, 121.5, 400nm).

En résumé, il a été possible de retrouver les dérivées de tensions seuil pour les oxydes de :

- 80nm en champ positif et négatif.
- 95nm simplement en champ positif
- 121.5nm en champ positif.

Des problèmes de convergences dûs au programme de simulation ACCES et, ou au programme de recherche des paramètres N_p , N_n , σ_p , σ_n (Balayeur, programme basé sur la méthode de Newton-Raphson), n'ont pas permis de mener à bien ce travail.

Chapitre 2

Examinons pour trouver une explication à ces problèmes de convergence la courbe suivante (Fig: II.1).

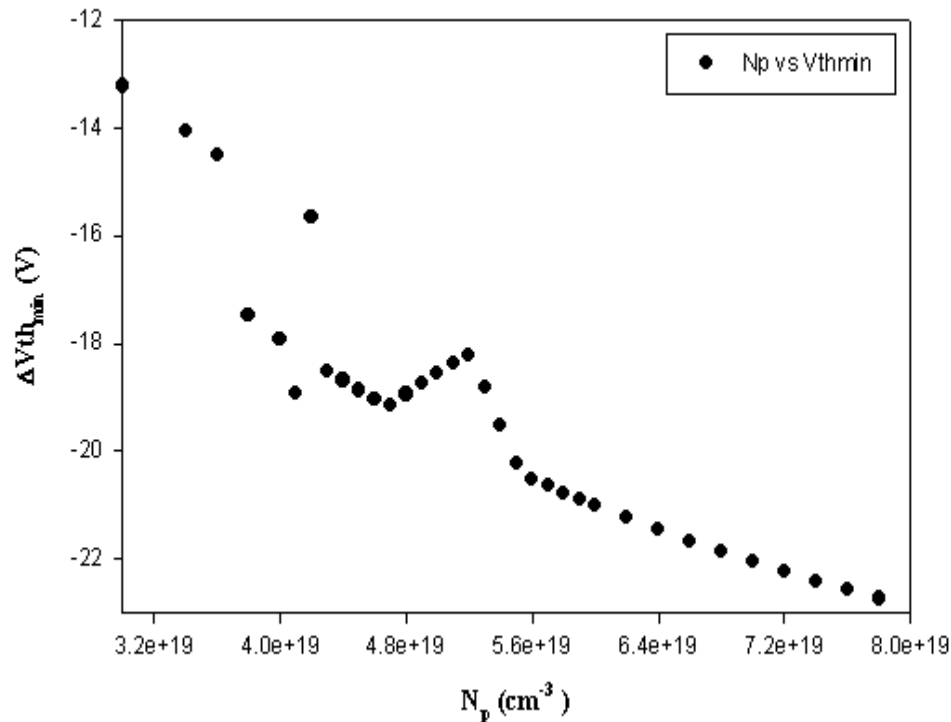


Fig: II.1 Simulation $\Delta V_{th_{min}}$ fonction de N_p à N_n constant

Sur cette courbe se trouve décrit le comportement de $\Delta V_{th_{min}}$ en fonction de N_p . Les valeurs de N_n , σ_n , σ_p sont constantes et valent respectivement $4 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $0.05 \mu\text{m}$ et $0.05 \mu\text{m}$. Cette courbe présente des discontinuités qui paraissent anormales

Pourquoi de telles variations de $\Delta V_{th_{min}}$ lorsque N_p varie si peu?

I- Fonctionnement du mailleur :

Examinons de manière plus attentive le fonctionnement du logiciel lui même. Nous avons l'objet suivant à étudier (à une dimension Fig: II.2) :



Fig: II.2 Dispositif expérimental

Le transport et le piégeage, dans ces matériaux, obéit à des équations différentielles qui n'ont pas de solutions analytiques. Pour les résoudre, ACCES utilise la méthode des éléments finis qui impose de discrétiser le domaine spatial. Pour les calculs la capacité MOS est "découpée" en petits morceaux appelés éléments, l'ensemble des éléments s'appelant le maillage. Le nombre et la distribution des

éléments influencent de manière importante la précision des calculs.

Mais cette description n'est pas suffisante, en effet elle ne tient pas compte des variations de dopage dans le barreau, de la distribution des pièges...

Exemple :

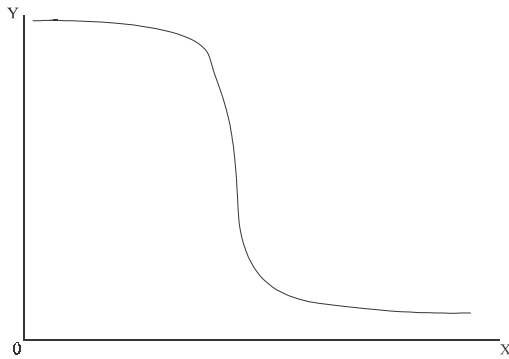


Fig: II.3 Courbe avant discrétisation

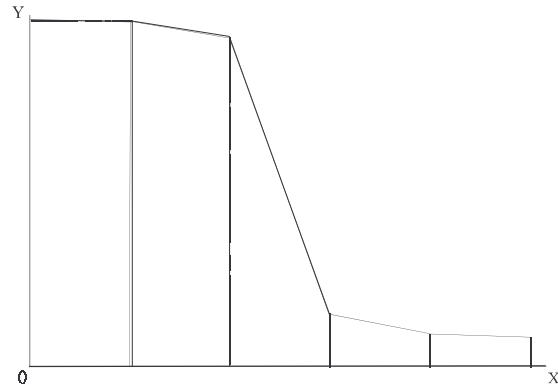


Fig: II.4 Courbe après discrétisation

Sur cet exemple (Fig: II.3), on décrit très mal avec un pas constant inadapté, la partie décroissante de la courbe (Fig: II.4). On risque de sous-estimer, ou de sur-estimer grandement, après calculs, les valeurs locales. Et par conséquent, de "minimiser", ou inversement de "maximiser" l'influence sur le composant. Pour cela il faut augmenter le maillage, donc diminuer l'espace entre 2 points de calculs. On pourra obtenir une valeur calculée proche de la valeur finale théorique (à la valeur de la précision demandée). Nous obtenons ainsi la courbe suivante :

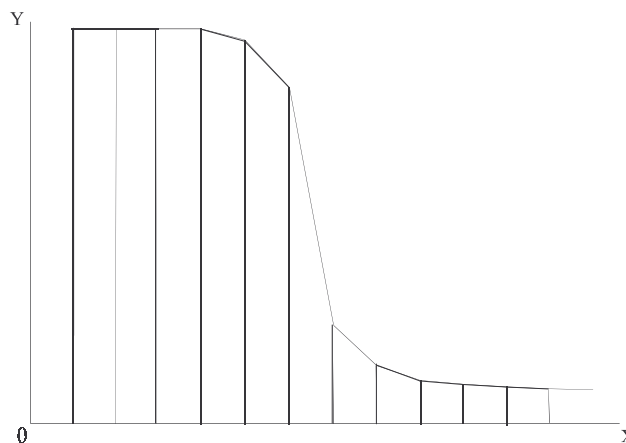


Fig: II.5 Courbe après une réduction du pas de discrétisation

Cependant, cette méthode possède un inconvénient majeur. Dans les zones où la densité de pièges est constante, il n'est pas nécessaire d'avoir un pas de calcul trop petit. On perd du temps de calcul, pour trouver un résultat qui sera quasiment identique.

Que fait le programme ?

1^{ère} étape :

Le programme effectue une discrétisation à pas constant, dans

tout le composant à étudier en fonction des paramètres qui ont été saisis (longueur minimale d'éléments, longueur maximale d'éléments, nombre de points maximums, précision...).

2^{ème} étape :

Le programme ajoute des éléments, cette fois en fonction de paramètres, de dopage N_n , N_p , des densités de dopages σ_n , σ_p , des défauts, d'éventuelles charges fixes etc... afin d'obtenir de meilleurs résultats.

Comment ?

Il effectue la comparaison entre la valeurs de 2 points consécutifs calculés précédemment, si la différence est supérieure à une valeur prédéfinie par l'utilisateur, il découpe en 2 l'intervalle et compare à nouveau. Tout cela jusqu'à la précision donnée, on obtient alors :

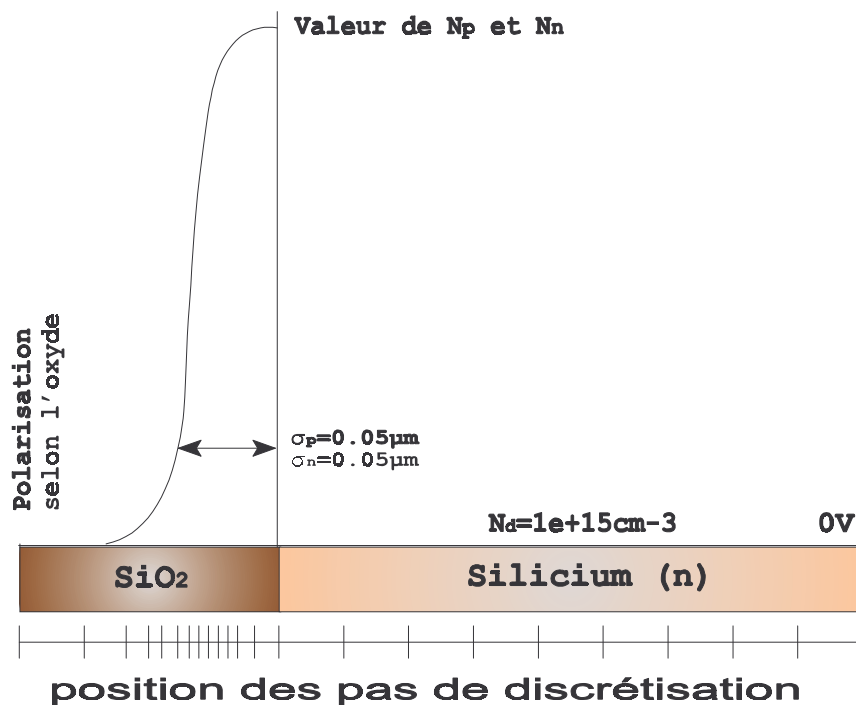


Fig: II.6 Discrétisation du dispositif à pas variable

Avantage de la méthode :

On peut ainsi discrétiser de manière optimale en fonction des différentes répartitions des grandeurs dans l'oxyde et le SiO_2 , il y aura donc une meilleure précision dans les résultats. Autre avantage, il permet un gain de temps dans les calculs. En effet le temps de calcul est proportionnel au carré du nombre d'éléments.

II- Résolution du problème de discontinuité :

Inhibons les fonctions du mailleur et imposons lui des paramètres fixes, ne lui laissant aucune possibilité de variations. Traçons ensuite l'évolution de $V_{th_{\min}}$ et de

$V_{th_{lim}}$, en fonction de N_p à N_n , σ_p , σ_n constants. Pour tous les dispositifs nous allons choisir les paramètres suivants :

- densité des pièges à trous N_p : variable.
- gaussienne des trous σ_p : fixé à $0.04\mu\text{m}$.
- position de la gaussienne : fixé à $x_{min} = x_{max} =$ position de l'interface Si/SiO₂.
- densité des pièges à électrons N_n : fixé à $6.10^{17}/\text{cm}^3$.
- gaussienne des trous σ_n : fixé à $0.04\mu\text{m}$.
- position de la gaussienne : fixé à $x_{min} = x_{max} =$ position de l'interface Si/SiO₂.
- dopage du silicium : dopé n, $N_d = 1.10^{16}/\text{cm}^3$.
- répartition du dopage dans le silicium : gaussienne.
- position de la gaussienne : fixé à $x_{min} =$ position de l'interface Si/SiO₂
 $x_{max} =$ position de l'interface Si/contact ohmique.

Les simulations ont été effectuées sur un oxyde de 80nm dans des conditions d'irradiations identiques à celle du CEA. Nous obtenons les 2 courbes suivantes (Fig: II.7 et II.8).

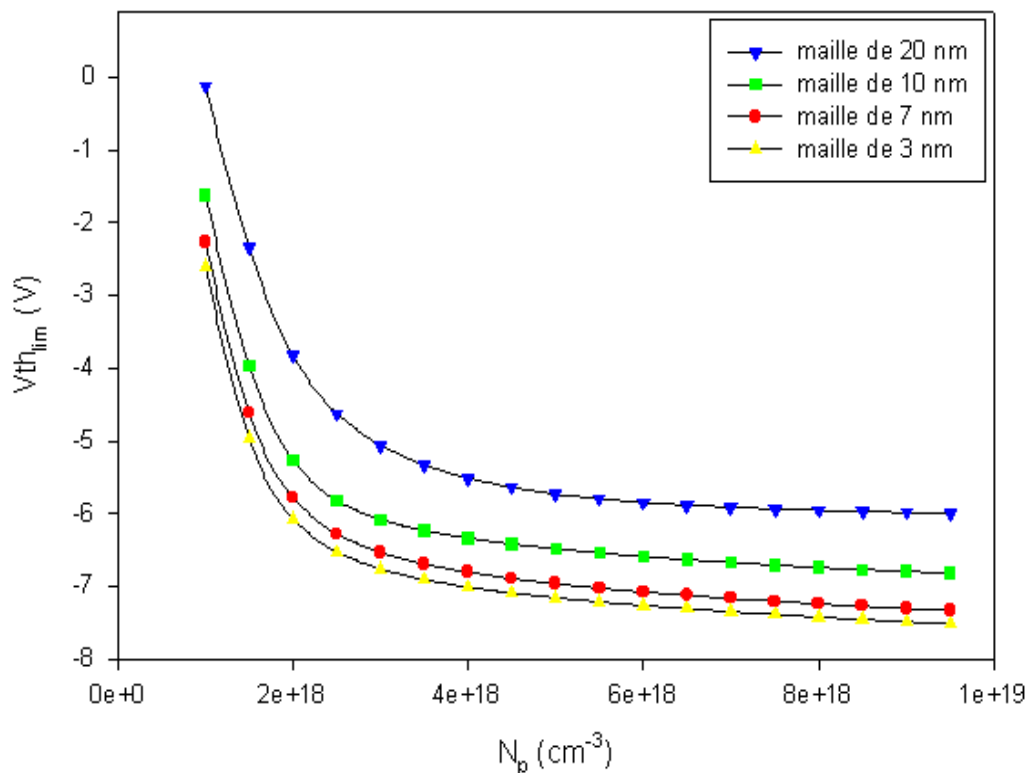


Fig: II.7 $V_{th_{lim}}$ en fonction de N_p pour différents paramètres de maille

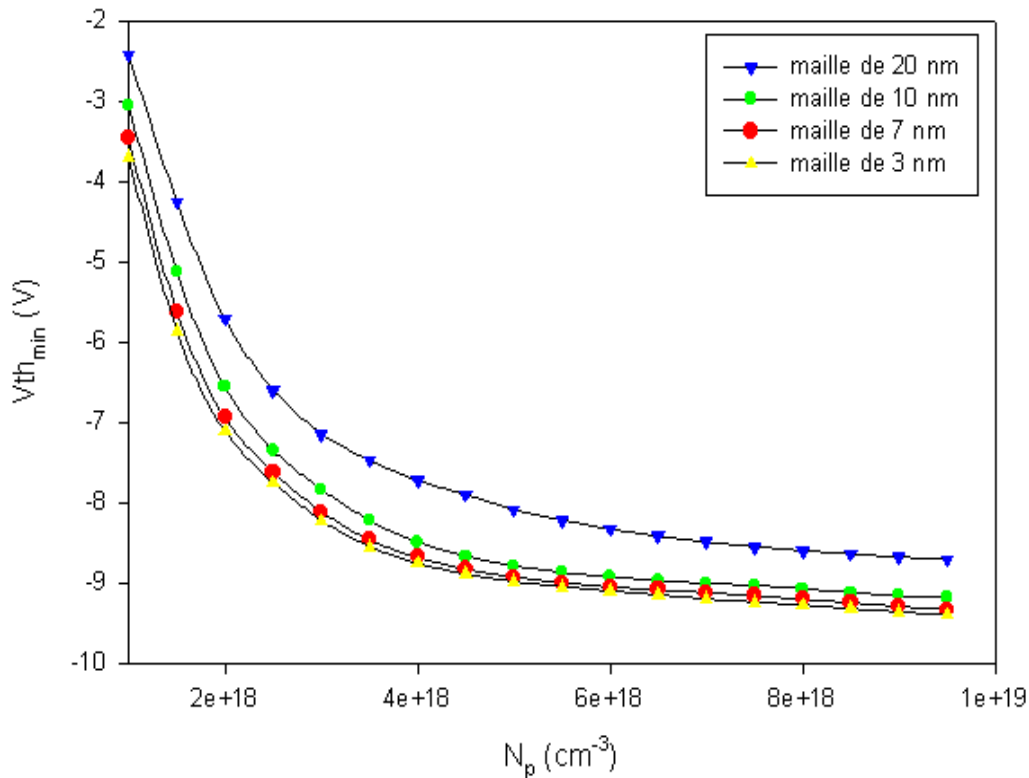


Fig: II.8 $V_{th_{min}}$ en fonction de N_p pour différents paramètres de maille

ces courbes a été fait pour 4 paramètres de mailles soit 70, 150, 270, 540 noeuds. Il faut dans tous les cas un maillage très serré dans le SiO_2 . Ce qui signifie un maillage comportant un nombre de points élevés, afin de décrire le plus correctement possible l'influence de l'oxyde dans la dérive de tension seuil, celui-ci ayant une influence prépondérante par rapport au Si.

Nous observons ici une continuité des courbes. Elles sont toutes identiques mais translatées les unes par rapport aux autres. Il semble que plus on augmente le nombre de noeuds, plus les valeurs de $V_{th_{min}}$ et $V_{th_{lim}}$ tendent vers des valeurs limites. Lorsque l'on effectue les calculs avec peu de noeuds, on se trouve "assez" loin de la valeur réelle. Et donc plus on augmente le nombre de noeuds plus les résultats semblent précis.

Le programme définit son maillage en fonction des paramètres rentrés. Pendant les simulations il vérifie à chaque étapes la validité des points du maillage. En supposant qu'il parte lors de la simulation n d'un nombre de points de calculs inférieur à ceux effectués lors de la simulation n-1, le programme va sous-estimer la valeur de la dérive de tension. Si pour la valeur de N_p suivante il repart avec un nombre de points supérieurs, le calcul sera plus précis que la valeur précédente. Ceci explique donc les problèmes de discontinuités (Fig: II.1).

Conclusion :

Nous allons à partir de maintenant inhiber la fonction de maillage automatique, pour cela nous fixerons des paramètres de taille minimum d'arête égale à la taille maximum d'arête. Le programme de maillage n'aura aucune possibilité de modifier le nombre de points de calculs. Nous perdrons en efficacité de calcul et donc en temps, puisque nous serons obligés d'augmenter le nombre de points de discretisation par rapport au système automatique, cela uniquement pour avoir une solution "assez" proche de la réalité. Il faudra cependant s'assurer de la régularité de la maille dans l'oxyde, afin d'être bien sûr qu'il n'existe pas d'autres problèmes.

Ci dessous se trouve le tableau récapitulatif des valeurs qui ont permis de réaliser les figures II.7 et II.8 (Tab: II.1) :

densité de trous N_p (cm ⁻³)	maille 20nm		maille 10nm		maille 7nm		maille 3nm	
	$V_{th_{min}}$ (V)	$V_{th_{lim}}$ (V)	$V_{th_{min}}$ (V)	$V_{th_{lim}}$ (V)	$V_{th_{min}}$ (V)	$V_{th_{lim}}$ (V)	$V_{th_{min}}$ (V)	$V_{th_{lim}}$ (V)
1e+18	-2.4205	-0.1284	-3.0526	-1.6162	-3.4664	-2.2769	-3.6878	-2.6059
1.5e+18	-4.2567	-2.3386	-5.1309	-3.9671	-5.6224	-4.6157	-5.8656	-4.9625
2e+18	-5.711	-3.8267	-6.5582	-5.2624	-6.9409	-5.7825	-7.1109	-6.0747
2.5e+18	-6.5977	-4.6272	-7.3567	-5.83	-7.6349	-6.2855	-7.7568	-6.5353
3e+18	-7.1448	-5.0645	-7.838	-6.0874	-8.1177	-6.5388	-8.2279	-6.7659
3.5e+18	-7.4739	-5.3326	-8.2242	-6.2347	-8.4674	-6.6957	-8.5494	-6.9091
4e+18	-7.7251	-5.5129	-8.4932	-6.3382	-8.6856	-6.8076	-8.7586	-7.0117
4.5e+18	-7.9022	-5.6408	-8.6685	-6.4182	-8.8309	-6.8945	-8.8934	-7.0919
5e+18	-8.0874	-5.7331	-8.7868	-6.485	-8.9298	-6.9658	-8.9837	-7.1581
5.5e+18	-8.2174	-5.7998	-8.8693	-6.5413	-8.9993	-7.0263	-9.0484	-7.215
6e+18	-8.3307	-5.8482	-8.9278	-6.5904	-9.0508	-7.0792	-9.1006	-7.265
6.5e+18	-8.4181	-5.8845	-8.9721	-6.6343	-9.0874	-7.1262	-9.1503	-7.3099
7e+18	-8.4905	-5.9128	-9.0054	-6.6738	-9.1234	-7.1684	-9.2005	-7.3509
7.5e+18	-8.5499	-5.9358	-9.032	-6.7093	-9.1616	-7.2068	-9.2408	-7.3887
8e+18	-8.5989	-5.955	-9.0743	-6.7411	-9.2069	-7.242	-9.2769	-7.4238
8.5e+18	-8.6409	-5.9715	-9.1215	-6.7694	-9.2487	-7.2748	-9.3219	-7.4567
9e+18	-8.6789	-5.9859	-9.1583	-6.7945	-9.2966	-7.3054	-9.3616	-7.4876
9.5e+18	-8.7074	-5.9986	-9.1892	-6.8172	-9.3349	-7.334	-9.4027	-7.517

Chapitre 3

La correction étant effectuée, on peut maintenant initier une recherche des paramètres $N_p, \sigma_p, N_n, \sigma_n$, permettant de retrouver les dérivés de tension seuil pour les oxydes de 80, 95, 121.5, et 400nm.

I- Méthode de Newton-Raphson [NOUGIER 93][VASSIERE 91].

A- Théorie :

Supposons que nous ayons 2 équations non linéaires à 2 inconnues, et qu'il existe une solution. Le but est de retrouver cette solution en partant d'une valeur suffisamment proche (x_0, y_0) . Le développement de Taylor à l'ordre 1 permet d'écrire (Eq: III.1)

$$\begin{aligned} \text{on pose } \begin{cases} x = x_0 + \Delta x \\ y = y_0 + \Delta y \end{cases} \text{ donc } \begin{cases} f(x, y) = f(x_0, y_0) + \Delta x \cdot f'_{x_0} + \Delta y \cdot f'_{y_0} \\ g(x, y) = g(x_0, y_0) + \Delta x \cdot g'_{x_0} + \Delta y \cdot g'_{y_0} \end{cases} \\ \text{en posant pour simplifier } \begin{cases} f_0 = f(x_0, y_0), f_x(x_0, y_0) \\ g_0 = g(x_0, y_0), g_x(x_0, y_0) \end{cases} \end{aligned} \quad \text{Eq: III.1}$$

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{g_0 \cdot f'_{y_0} - f_0 \cdot g'_{y_0}}{f'_{x_0} \cdot g'_{y_0} - g'_{x_0} \cdot f'_{y_0}} \\ \Delta y = \frac{f_0 \cdot g'_{x_0} - g_0 \cdot f'_{x_0}}{f'_{x_0} \cdot g'_{y_0} - g'_{x_0} \cdot f'_{y_0}} \end{cases} \text{ on obtient ainsi } \begin{cases} x_1 = x_0 + \Delta x \\ y_1 = y_0 + \Delta y \end{cases}$$

On répète le processus jusqu'à ce que (x_p, y_p) soit suffisamment proche de (x_{p-1}, y_{p-1}) .

On peut aisément généraliser au cas d'un système de n équations à n inconnues,

l'équation s'écrit alors (Eq: III.2):

$$F(X) = F(X_0 + \Delta X) = F(X_0) + [J(X_0)] \cdot \Delta X = 0 \quad \text{Eq: III.2}$$

ou $[J(X_0)]$ est la matrice jacobienne du système en $X=X_0$ (Eq: III.3)

$$[J(X)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial X_1} & \frac{\partial f_1}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial X_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial X_1} & \frac{\partial f_n}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial X_n} \end{bmatrix} \text{ soit } \Delta X = -[J(X_0)]^{-1} \cdot F(X_0) \text{ d'où } X_1 = X_0 + \Delta X$$

Eq: III.3

Avantages de la méthode :

- * précision.
- * convergence quadratique lorsque l'on est proche de la solution [NUMERICAL 92].

Inconvénients de la méthode :

- * nécessite l'écriture de chaque équation ainsi que ses dérivés partielles.
- * nécessite la connaissance d'un point de départ aussi proche que possible de la solution cherchée.

B- Application au programme “Balayeur” :

La méthode de Newton-Raphson est la technique qui est utilisée afin de déterminer les valeurs de N_p , σ_p , N_n , σ_n .

Dans notre cas nous nous sommes fixés les valeurs de $V_{th_{min}}$, $V_{th_{lim}}$, que nous tenterons de retrouver pour une taille d'oxyde, avec 3 polarisations -1MV/cm, 0MV/cm et +1MV/cm.

Nous obtenons le systèmes suivant à résoudre (Eq: III.4):

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial V_{th \min -1MV/cm}}{\partial N_p} & \frac{\partial V_{th \min -1MV/cm}}{\partial \sigma_p} & \frac{\partial V_{th \min -1MV/cm}}{\partial N_n} & \frac{\partial V_{th \min -1MV/cm}}{\partial \sigma_n} \\ \frac{\partial V_{th \lim -1MV/cm}}{\partial N_p} & \frac{\partial V_{th \lim -1MV/cm}}{\partial \sigma_p} & \frac{\partial V_{th \lim -1MV/cm}}{\partial N_n} & \frac{\partial V_{th \lim -1MV/cm}}{\partial \sigma_n} \\ \frac{\partial V_{th \lim 0MV/cm}}{\partial N_p} & \frac{\partial V_{th \lim 0MV/cm}}{\partial \sigma_p} & \frac{\partial V_{th \lim 0MV/cm}}{\partial N_n} & \frac{\partial V_{th \lim 0MV/cm}}{\partial \sigma_n} \\ \frac{\partial V_{th \lim +1MV/cm}}{\partial N_p} & \frac{\partial V_{th \lim +1MV/cm}}{\partial \sigma_p} & \frac{\partial V_{th \lim +1MV/cm}}{\partial N_n} & \frac{\partial V_{th \lim +1MV/cm}}{\partial \sigma_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta N_p \\ \Delta \sigma_p \\ \Delta N_n \\ \Delta \sigma_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{th \min -1MV/cm} - V_{th_{calculé}} \\ V_{th \lim -1MV/cm} - V_{th_{calculé}} \\ V_{th \lim 0MV/cm} - V_{th_{calculé}} \\ V_{th \lim +1MV/cm} - V_{th_{calculé}} \end{bmatrix}$$

Eq: III.4

Sur cet exemple chaque éléments de la matrice jacobienne représente une simulation il faut donc pour calculer le quadruplé suivant (ΔN_p , $\Delta \sigma_p$, ΔN_n , $\Delta \sigma_n$) soit 16 simulations. C'est à dire un temps de calcul très long, puisque chaque simulation dure en moyenne 20 minutes. Il faut ainsi près de $16 \times 20 \text{ minutes} = 320 \text{ minutes}$ pour calculer un point par la méthode de Newton-Raphson.

Après simulation sur un oxyde de 80nm, nous obtenons le tableau suivant (Tab:III.1):

Densité de pièges				Dérive de tension seuil (V)			
N_p (cm^{-3})	σ_p (10^{-10}m)	N_n (cm^{-3})	σ_n (10^{-10}m)	$V_{th_{min}}$ -1MV/cm	$V_{th_{lim}}$ -1MV/cm	$V_{th_{lim}}$ 0MV/cm	$V_{th_{lim}}$ +1MV/cm
3e+18	360	1.33e+18	219	-7.58	-6.04	0.771	-18.7
3.31e+18	349	1.25e+18	328	-7.64	-6.11	0.653	-19.5
4.18e+18	294	1.27e+18	493	-7.61	-6.1	0.587	-21.8
4.52e+18	270	1.18e+18	739	-7.6	-6.15	0.504	-22.4
4.45e+18	273	1.1e+18	1.11e+03	-7.63	-6.2	0.45	-22.2
4.61e+18	267	1.1e+18	1.66e+03	-7.65	-6.22	0.435	-22.7
4.24e+18	278	1.03e+18	2.49e+03	-7.64	-6.23	0.403	-21.5
3.95e+18	289	9.74e+17	3.74e+03	-7.63	-6.22	0.378	-20.5
3.52e+18	306	9.08e+17	1.87e+03	-7.61	-6.22	0.351	-19.1

Tab: III.1 Optimisation 4 variables

Le programme a été interrompu après 2 jours de calculs. En analysant les valeurs, on

s'aperçoit que le programme ne converge pas, pire il semble faire n'importe quoi.

Pourquoi ?

Examinons le cas suivant (Fig: III.1)

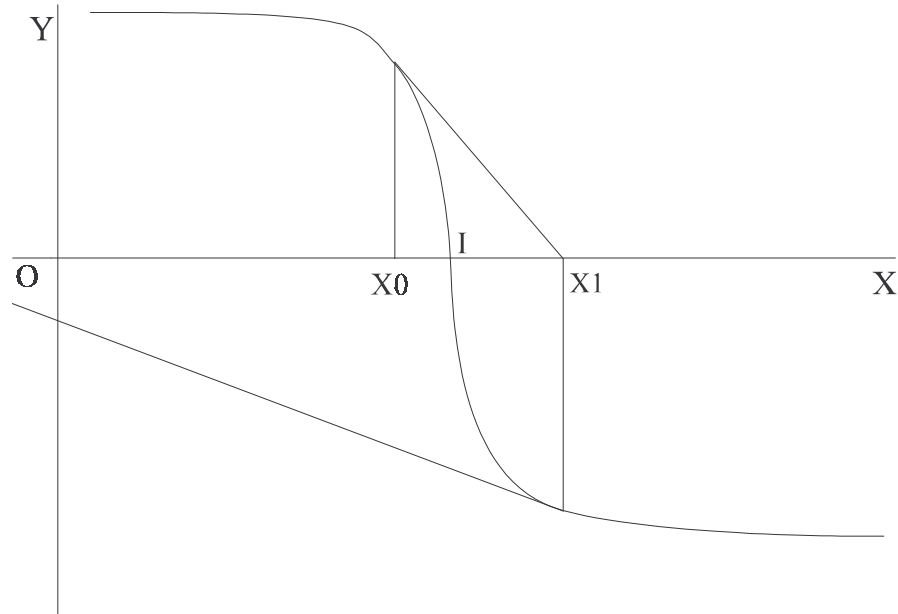


Fig: III.1 Système ne convergeant pas avec Newton-Raphson

Nous cherchons sur cet exemple à retrouver le point I. Nous commençons la résolution par le point X_0 . Le calcul de la tangente au point $(X_0, F(X_0))$, nous amène au point X_1 . Le calcul de la tangente au point $(X_1, F(X_1))$ donne la valeur 0, la méthode de Newton-Raphson ne peut continuer, elle se terminera très probablement par une division par zéro.

Il est donc possible que nous soyons face à un système oscillatoire ou possédant des discontinuités importantes.

Traçons donc les courbes suivantes (Fig: III.2) $V_{th_{min}}$ en fonction de σ_p

* oxyde de 95 nm:

$$N_p = 5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

σ_p : variable de 10 nm à 100 nm par pas de 2,5 nm

$$N_n = 5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$\sigma_n = 10 \text{ nm}$$

* oxyde de 80 nm courbe 1 :

$$N_p = 5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

σ_p : variable de 10 nm à 140 nm par pas de 5 nm

$$N_n = 5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$\sigma_n = 30 \text{ nm}$$

* oxyde de 80 nm courbe 2 :

$$N_p = 5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

σ_p : variable de 10 nm à 100 nm par pas de 5 nm

$$N_n = 5.10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$\sigma_n = 10 \text{ nm}$$

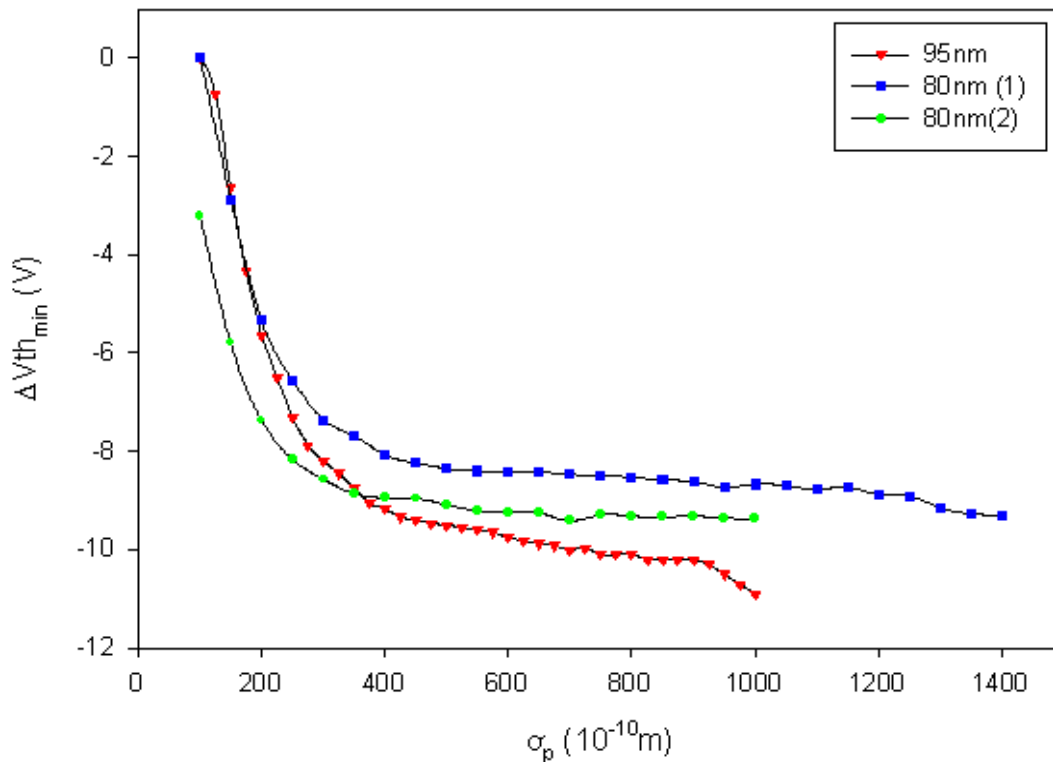


Fig: III.2 Dérive de tension seuil en fonction de σ_p

On observe très bien sur ces courbes que le système est oscillant sur certaines plages de fonctionnement (80 nm courbe 1 de σ_p variant de 90 nm à 100 nm, 80 nm courbe 2 de σ_p variant de 65 nm à 85 nm). Dans ces conditions il sera très difficile en utilisant simplement la méthode de newton-raphson de retrouver les valeurs cherchées du tableau I.4, si on ne se trouve pas au voisinage de la solution cherchée.

Nous sommes donc face à un système très instable, pour lequel une méthode de recherche traditionnelle ne pourra donner de bons résultats que si on possède une idée de la valeur cherchée, ce qui n'est pas le cas ici. Nous allons tenter de contourner les problèmes de convergences par la méthode des algorithmes génétiques.

II- Algorithmes génétiques [GOLDBERG 94][ME 94][OVIDIU 97].

Qu'est-ce qu'un algorithme génétique ?

A- Définition :

C'est une technique de calcul, développée entre autre par John HOLLAND (il en est considéré comme le père spirituel), utilisant des méthodes de sélection qui ressemblent à celles observées dans la nature, à savoir, l'individu le plus adapté est sensé survivre, le moins adapté est sensé disparaître. On génère des populations d'individus qui sont créées à partir des gènes des meilleurs individus de la génération précédente, avec à l'occasion une modification aléatoire des gènes.

Un individu sera composé d'un ou plusieurs gènes . Chaque individus représente une solution possible au problème donné. Il faut donc pas considérer l'algorithme génétique simplement comme une technique permettant de trouver la solution à un problème donné, mais plutôt comme une technique permettant de cerner l'ensemble des solutions d'un problème. C'est en cela que réside la différence primordiale avec les techniques traditionnelles.

B- Mise en oeuvre :

1- Définition d'un alphabet de base :

En biologie, un individu est caractérisé par son A.D.N. (Acide Désoxyribonucléique). L'A.D.N. comporte en son sein l'ensemble des gènes qui permettent de différencier un individu d'un autre (cheveux : brun, blond...; yeux : marron, bleu...). Un gène est constitué de 4 molécules de base qui sont l'adénine, la thymine, la guanine et la cytosine. Ces 4 molécules représentent l'alphabet de base de l'A.D.N.

Afin de caractériser notre problème, nous utiliserons comme alphabet de base l'alphabet binaire (Chaque composante du gène est appelé allèle, dans notre cas le 0 ou 1 est un allèle). Chaque gène c'est à dire chaque variables de recherche ($N_p, \sigma_p, N_n, \sigma_n, \dots$) sera codé en binaire.

Dans tous les exemples qui suivent tous les nombres binaires seront représentés du bit de poids le plus faible (LSB) vers le bit de poids le plus élevés (MSB).

ex :	décimal	binaire (LSB -> MSB)
	52	0 0 1 0 1 1

2- Définitions des fonctions de bases :

1- Fonction aptitude :

Un fois que nous avons créé nos individus, il nous faut savoir si ils sont adaptés ou pas à leur environnement. Tous les individus qui ne sont pas adaptés doivent disparaître petit à petit. Les individus présentant une aptitude au-dessus de la moyenne doivent se reproduire en priorité. Il faut donc définir une fonction qui aura une valeur voisine de 0 pour un individu inadapté et voisine de 1 pour un individu parfaitement adapté.

2- Fonction sélection :

Avant d'effectuer un mélange des gènes, nous devons choisir pour chaque individu de la population suivante, deux parents. Ceux-ci seront choisis de la manière suivante :

On crée ce que l'on appel une roue de loterie, pour laquelle chaque individu de la population occupe une section proportionnelle à son aptitude.

3- Exemple d'application :

Appliquons l'algorithme génétique à la fonction suivante :

$$y = 2 \cdot \sin\left(\frac{x}{400}\right) \cdot e^{\left(\frac{-x}{7500}\right)}$$

Nous allons rechercher quels sont les valeurs de x pour lesquels on obtient y=1. La courbe représentative de cette fonction est donnée ci-après (Fig: III.3)

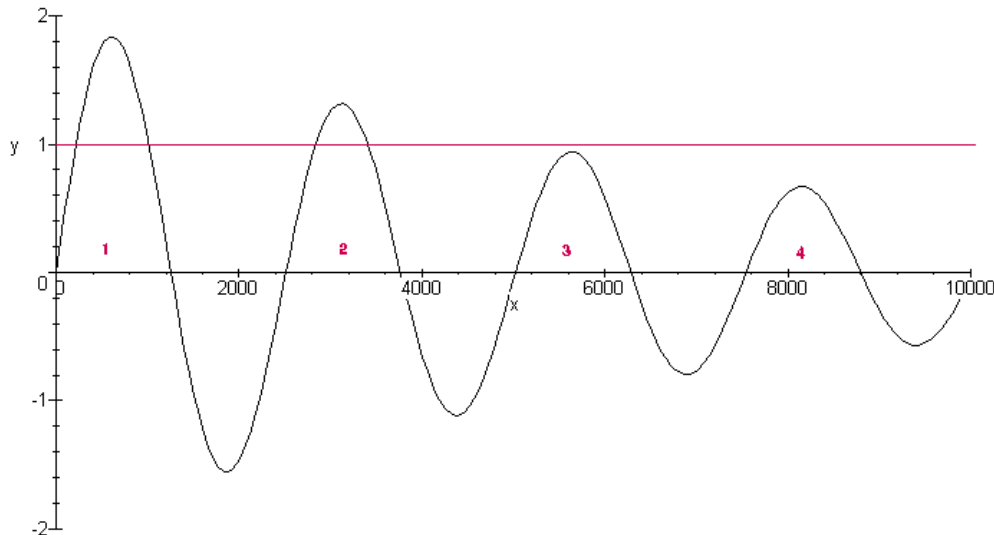


Fig: III.3 Fonction à optimiser

Nous utiliserons les paramètres suivants pour notre algorithme :

- * plage de recherche pour x, de 0 à 10000
- * nombre d'individus dans une population: 50
- * nombre de génération maximale: 100
- * probabilité de crossover: 0.6 (donnée extraite de la littérature)
- * probabilité de mutation: 0.003 (donnée extraite de la littérature)
- * fonction d'aptitude:

$$Aptitude = e^{\left(\frac{Valeur_{individu} - Valeur_{cherchée}}{\sigma^2}\right)} \text{ avec } \sigma = 0.5$$

note :

Au début de l'exécution d'un algorithme génétique, il est courant d'avoir quelques individus ayant une excellente aptitude dans une population médiocre. Ces individus vont générer la presque totalité de la génération suivante.

Ils vont alors regrouper la population sur une solution et empêcher la recherche des autres solutions si elles existent. Cela n'est pas souhaitable et s'avère être même la cause principale d'une convergence prématurée.

Cette correction permet lors de l'apparition de quelques individus extraordinaires, de voir leur adaptation diminuer, et les individus faibles voient la leur

augmenter. Ceci permet un meilleur brassage des individus, et évite que le programme se bloque dans une "vallée".

Voici donné ci-dessous le tableau représentatif des meilleurs individus (adaptation > 90%) de chaque générations.

N° de la génération	X	F(X)	aptitude	précision
0	5.44600e+03	0.838616	0.901064	1.75549e-01
0	2.92570e+03	1.16151	0.900913	1.49445e-01
0	5.6251e+03	0.942106	0.986683	5.96200e-02
0	2.85290e+03	1.0263	0.997237	2.59603e-02
1	2.8522e+03	1.02482	0.99754	2.45109e-02
2	2.257e+02	1.03786	0.994284	3.71539e-02
10	1.0068e+03	1.02262	0.997956	2.23642e-02
11	1.007e+03	1.02188	0.998087	2.16437e-02
13	2.251e+02	1.03548	0.994978	3.48606e-02
14	2.2e+02	1.01516	0.999082e	1.50415e-02
15	1.0103e+03	1.00969	0.999624	9.64738e-03
15	2.8445e+03	1.00824	0.999729	8.20264e-03
18	1.01160e+03	1.00488	0.999905	4.86558e-03
29	2.8378e+03	0.993478	0.99983	6.54355e-03
29	2.842e+03	1.00277	0.999969	2.76169e-03
39	2.184e+02	1.00874	0.999695	8.70152e-03
61	3.4067e+03	1.00103	0.999996	1.03366e-03
75	2.165e+03	1.0011	0.999995	1.0954e-03
80	5.6298e+03	0.942275	0.986760	5.94402e-02
81	5.6314e+03	0.942303	0.986773	5.94106e-02

Tab: III.2 Tableau des meilleurs individus

La solution à notre problème comporte 4 solutions représentées par l'intersection entre la droite $y=1$ et la courbe sur la figure III.3.

Génération n°0: nous obtenons 4 valeurs, deux sont situées dans la vallée n°2 ou il existe 2 solutions, nous avons d'ailleurs ici beaucoup de chance en trouvant déjà une solution à notre problème. Et deux dans la vallée n°3 qui ne possède aucune solution, cette vallée est une vallée piège, un programme traditionnel resterait coincé ici.

Génération n°1: les valeurs qui appartenait à la vallée n°3 ont disparu, et une

très légère amélioration de la valeur précédemment trouvée

Génération n°2: découverte de la première valeur dans la vallée n°1

Génération n°10-61: les dernières solutions ont été trouvées.

En l'espace de 11 générations, trois solutions à notre problème ont été découvertes. Il faudra attendre la génération n°61 avant d'obtenir la dernière solution. Mais valeur qui aura été trouvée avec une précision de 0,001.

Cet essai est concluant : l'algorithme génétique permet de situer avec une précision correcte toutes les valeurs cherchées. Contrairement à la méthode de Raphson-Newton, il est insensible aux fausses solutions.

Nous allons maintenant pouvoir appliquer ce nouvel algorithme à la recherche dans les oxydes.

C- Application à la recherche dans les oxydes :

Avant d'appliquer notre programme sur une optimisation à 4 paramètres nous devons valider son fonctionnement sur des valeurs déjà connues. Pour cela nous effectuerons des comparaisons avec des valeurs déjà trouvées par la méthode de Newton.

1- Validation de l'algorithme sur un oxyde de 80 nm :

Paramètres de simulations pour Newton-Raphson :

- * identiques à ceux décrits dans le chapitre 2
- * largeur de gaussienne $\sigma_p = 900.10^{-10}$ m
- * largeur de gaussienne $\sigma_n = 600.10^{-10}$ m
- * polarisation: négative -1MV/cm

N_p (cm ⁻³)	N_n (cm ⁻³)	$\Delta V_{th_{min}}$ (V)	$\Delta V_{th_{lim}}$ (V)
1.5e+18	1.07e+18	-7.46	-5.28
9.66e+17	5.35e+17	-6.4	-5.2
1.14e+18	6.42e+17	-7.11	-5.63
1.17e+18	6.57e+17	-7.21	-5.7

Tab: III.3 liste des points calculés par newton-raphson

Le tableau III.3 montre une convergence très rapide par la méthode de Newton-Raphson (4 itérations). Il est vrai que le programme a été aidé par une valeur initiale voisine de la solution.

Paramètres de simulations pour l'algorithme génétique :

- * paramètres identiques au paragraphe précédant exemple d'application (Chap 3)
- * paramètres concernant la simulation de l'oxyde : identique à Newton-Raphson

N° génération	N_p (cm ⁻³)	N_n (cm ⁻³)	$\Delta V_{th_{min}}$ (V)	$\Delta V_{th_{lim}}$ (V)	précision
---------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	-----------

2	1.5039e+18	8.604e+17	-7.4842	-5.8697	3.28e-02
20	2.1528e+18	1.2384e+18	-7.9634	-5.8778	7.2854e-02
43	4.1418e+18	2.2617e+18	-8,2323	-5.4911	9.6975e-02

Tab: III.4 Liste de valeurs trouvées par l'algorithme génétique

Convergence tout aussi rapide, de l'algorithme génétique. Une solution très proche de celle trouvée par Newton-Raphson est calculée dès la deuxième génération. Il faut cependant noter l'apparition de deux autres solutions aux générations 20 et 43.

2- Validation de l'algorithme sur un oxyde de 95 nm :

Paramètres de simulations pour Newton-Raphson:

- * identiques à ceux décrits dans le chapitre 2
- * largeur de gaussienne $\sigma_p = 900.10^{-10}$ m
- * largeur de gaussienne $\sigma_n = 600.10^{-10}$ m
- * polarisation: négative -1MV/cm

N_p (cm ⁻³)	N_n (cm ⁻³)	$\Delta V_{th_{min}}$ (V)	$\Delta V_{th_{lim}}$ (V)
3.62e+18	4.32e+18	8.65	-1.02
2.58e+18	3.03e+18	-8.51	-2

Tab: III.5 Liste de points calculés par Newton-raphson

Convergence très lente de Newton-raphson qui n'a pas pu être représenté ici. Il faudra près de 50 itérations afin de trouver une solution.

Paramètres de simulations pour l'algorithme génétique :

- * paramètres identiques au paragraphe précédent exemple d'application (Chap 3)
- * paramètres concernant la simulation de l'oxyde identique à Newton-Raphson

N° génération	N_p (cm ⁻³)	N_n (cm ⁻³)	$\Delta V_{th_{min}}$ (V)	$\Delta V_{th_{lim}}$ (V)	précision
1	6.0561e+18	6.0336e+18	-8.9390	-2.1225	4.8543e-02
2	5.6106e+18	5.7672e+18	-8.9521	-1.9098	4.9027e-02
8	4.5774e+18	4.8537e+18	-8.9922	-1.9921	3.5835e-02
9	8.4798e+18	8.0982e+18	-8.7799	-1.9741	2.2818e-02
38	3.996e+18	4.4307e+18	-8.868	-2.0257	2.5631e-02
46	1.7370e+18	2.0538e+18	-7.7793	-1.9307	7.3510e-02
54	2.9493e+18	3.3894e+18	-8.6957	-2.0473	1.6488e-02
68	7.1154e+18	6.9615e+18	-8,9834	-2.0161	3.4394e-02

Tab: III.6 Liste de valeurs trouvées par l'algorithme génétique

Une solution identique à celle de Newton été trouvé à la génération 54. Cependant on remarquera l'existence d'un très grand nombre de solutions voisines de celle trouvée.

Note :

Il a été choisi de présenter des résultats avec des valeurs de gaussienne $\sigma_p=900.10^{-10}m$, $\sigma_n=600.10^{-10}m$, car ce n'est qu'à partir de ces valeurs que Newton-Raphson a été capable de nous fournir des solutions pour les 2 oxydes.

3- Essai de recherche avec 4 paramètres :

Une tentative d'optimisation des 2 oxydes (80nm, 95nm), en polarisation négative a été effectuée. Les paramètres utilisés sont en tous points identiques à ceux utilisés pour la validation de l'algorithme. Aucune solution n'a été trouvée au bout d'une semaine de simulation. Le programme à été interrompu au bout de ce laps de temps.

Afin de faciliter la convergence de l'algorithme nous allons effectuer des recherches indépendantes avec des paramètres σ différents.

$10^{-10} m$	800 nm			950 nm		
	$N_p (cm^{-3})$	$N_n (cm^{-3})$	précision	$N_p (cm^{-3})$	$N_n (cm^{-3})$	précision
$\sigma_p=300$ $\sigma_n=300$	4.1994e+18	1.6128e+18	3.2685e-02	8.9325e+18	6.4881e+18	1.5550e-01
	6.5745e+18	2.7540e+18	8.6114e-02	6.9408e+18	5.3964e+18	1.9009e-01
	5.6493e+18	2.1033e+18	5,89e-02			
	8.3799e+18	2.6856e+18	8,50e-02			
	3.8007e+18	1.5606e+18	8,44e-03			
	2.8737e+18	9.9090e+23	4,96e-02			
$\sigma_p=900$ $\sigma_n=600$	1.5039e+18	8.6040e+23	3.2800e-02	6.0561e+18	6.0336e+18	4.8543e-02
	2.1528e+18	1.2384e+18	7.2854e-02	5.6106e+18	5.7672e+18	4.9027e-02
	4.1418e+18	2.2617e+18	9,70e-02	4.5774e+18	4.8537e+18	3.5835e-02
				8.4798e+18	8.0982e+18	2.2818e-02
				3.996e+18	4.4307e+18	2.5631e-02
				1.7370e+18	2.0538e+18	7.3510e-02
				2.9493e+18	3.3894e+18	1.6488e-02
			7.1154e+18	6.9615e+18	3.4394e-02	
$\sigma_p=1500$ $\sigma_n=1200$	1.5039e+18	8.6040e+23	4.9561e-02	1.7055e+18	1.8432e+18	4.3157e-02
	2.3922e+18	1.4382e+18	8.9463e-02	4.2957e+18	4.3479e+18	6.1945e-02
	9.5130e+17	3.5550e+17	6,25e-02	6.9417e+18	6.4314e+18	6.2354e-02
				7.9038e+18	7.2216e+18	5,48e-02
			8.86e+18	7.98e+18	5.04e-02	

Tab: III.7 Liste des solutions pour les deux oxydes pour des valeurs de gaussienne différentes

Pour ces séries de simulations, il n'existe pas de solutions communes aux deux

épaisseurs d'oxydes.

Toutefois, nous pouvons remarquer que pour $\sigma_p=1500 \text{ \AA}$ et $\sigma_n=1200 \text{ \AA}$ il existe pour les deux épaisseur d'oxyde, deux solutions très proches l'une de l'autre (Tab: III.7, solutions en rouge).

S'il existe une solution nous pouvons supposer qu'elle aura des largeurs de gaussienne voisines de celles-ci.

Conclusion

Ce stage avait pour but la détermination de la distribution spatiale des pièges dans des oxydes enterrés à partir de la mesure de la dérive de tension seuil de transistors irradiés.

Les problèmes rencontrés par Pascal IZZO lors de son stage ont pu être corrigés. Le mailleur avec un système de maillage fixe ne pose plus actuellement aucun problème.

Nous avons mis en oeuvre une nouvelle méthode d'optimisation présentant une meilleure stabilité que la méthode de Newton-Raphson.

Pour l'instant cette méthode ne nous a pas permis de trouver les paramètres dans les quatre oxydes ensemble. Mais l'algorithme génétique ne s'emploie pas comme une méthode classique. Elle utilise de nombreux paramètres (probabilité de mutation et de crossover, fonction d'aptitude, fonction de sélection) qu'il faut régler au mieux pour espérer trouver la solution avec des temps de calculs acceptables.

Par ailleurs il existe dans la littérature tout une série d'améliorations possibles permettant d'aboutir plus vite à la solution :

- fonction d'aptitude évolutive au cours des générations.
- fonction de sélection autre que la roue de loterie .
- probabilité de crossover et de mutation variables.
- crossover à points multiples.
- méthode d'apprentissage : cet apprentissage évitera de perdre les meilleurs individus calculés si la génération suivante s'avère médiocre. Il pourra aussi permettre d'extraire parmi les gènes des meilleurs individus l'information nécessaire afin d'augmenter la précision et la vitesse de convergence du système.

La méthode de Newton-Raphson n'est cependant pas à exclure : l'algorithme génétique permet de trouver l'ensemble des solutions avec une précision médiocre. La méthode de Raphson-Newton permet de trouver une solution avec une très bonne précision à condition d'avoir une valeur initiale suffisamment proche. L'utilisation couplée de ces deux méthodes devraient permettre de trouver la solution au problème posé, si elle existe...

Bibliographie

- [CIRBA 96] *“Simulation numérique du piégeage et du dépiégeage dans les oxydes de composants MOS”*
C. Cirba.
Thèse, Université Montpellier II, 1996.
- [GOLDBERG 94] *“Algorithmes génétiques”*.
David E. GOLDBERG
Titre original :
“Genetic Algorithms”, Addison-Wesley USA, (15767), 1991. ISBN : 2-87908-054-1, Code : 009817.
- [IZZO 97] *“Recherche de la distribution spatiale des pièges dans les oxydes par simulation numérique”*.
P. IZZO
DEA, Université de Montpellier II, 1997.
- [ME 94] *“Audit de sécurité par algorithmes génétiques”*
Ludovic ME.
Thèse, Université de Rennes 1, 1994.
- [NOUGIER 93] *“Méthodes de calcul numérique”*
J-P. Nougier.
Masson 1993, ISBN: 2-225-81086-9.
- [NUMERICAL 92] *“Numerical recipes in C”*
W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery.
Cambridge University Press 1992.
- [OVIDIU 97] *“Méthodes d’optimisation et dimensionnement d’une inductance à air”*.
C.C. OVIDIU
DEA, Université de Montpellier II, 1997.
- [PAILLET 95] *“Trapping-detraping properties of irradiated ultra-thin simox buried oxides”*
P. Paillet, J-L Autran, J-L Leray.
IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 42, N°6, December 1995.
- [VASSIERE 91] *“Programmes et exercices sur les méthodes numériques”*
J-C. Vassière, J-P. Nougier.
Masson 1991, ISBN: 2-225-81743-X.