

# ANALYSE NUMÉRIQUE A DEUX DIMENSIONS DE TRANSISTORS MOS PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

THÈSE N° 518 (1984)

PRÉSENTÉE AU DÉPARTEMENT D'ÉLECTRICITÉ

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

FOUAD RAHALI

Ingénieur-électricien EPFL  
originaire d'Algérie

acceptée sur proposition du jury :

Prof. R. Dessoulavy, rapporteur

M. J.-D. Chatelain, corapporteur

Dr M. Dutoit, corapporteur

Dr G. Merkel, corapporteur

Lausanne EPFL

1984

TABLE DES MATIERES

ANALYSE NUMERIQUE A DEUX DIMENSIONS DE TRANSISTORS MOS  
PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

	Page	
1.	INTRODUCTION	1
1.1	HISTORIQUE DU TRANSISTOR MOS	1
1.2	NECESSITE D'UNE MODELISATION BIDIMENSIONNELLE DU TRANSISTOR MOS	2
2.	DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT D'UN TRANSISTOR MOS	3
2.1	GEOMETRIE ET DOPAGE	3
2.2	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN MOST	6
2.3	PRINCIPES DE MODELISATION ANALYTIQUE DU MOST ET SES LIMITATIONS	8
2.3.1	Résolution de l'équation de Poisson	8
2.3.2	Résolution de l'équation de continuité du courant	11
3.	MODELES PHYSIQUES	12
3.1	HYPOTHESES FONDAMENTALES	12
3.2	EQUATIONS FONDAMENTALES	12
3.3	CONDITION A L'INTERFACE Si/SiO <sub>2</sub> ET TENSION DE FLAT-BAND	13
3.4	MODELE DE MOBILITE	16
3.5	NORMALISATION	18
4.	APPROCHE D'UNE SIMULATION NUMERIQUE 2-D DU MOST	20
4.1	HYPOTHESES SUPPLEMENTAIRES ET PARTICULIERES AU MOST	20
4.1.1	La densité de courant des majoritaires est nulle	20
4.1.2	Le taux de recombinaisons excédentaires des paires électrons-trous est nul	20
4.2	INTRODUCTION DES QUASI-POTENTIELS DE FERMI	21
4.3	CHOIX DES VARIABLES	22
4.3.1	( $\Psi, N, P$ ) inconnues	22
4.3.2	( $\Psi, \phi_n, \phi_p$ ) inconnues	23
4.3.3	( $\Psi, \lambda, \rho$ ) inconnues	24
4.4	SOLUTION 1-D OU 2-D DE L'EQUATION DE CONTINUITE	25
4.4.1	Différences entre les solutions 1-D et 2-D	26
4.4.2	Résolution 1-D de l'équation de continuité des minoritaires	28
4.5	SOLUTION DE L'EQUATION DE CONTINUITE DES MINORITAIRES	30
4.6	RESUME	30

TABLE DES MATIERES

	Page
5. METHODE DE RESOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS DIFFERENTIELLES	32
5.1 DESCRIPTION DE LA METHODE UTILISEE	32
5.2 ACCELERATION DE LA CONVERGENCE DU TRANSISTOR MOS	35
5.3 PROCESSUS ITERATIF UTILISE DANS PTIMOS	36
5.4 CRITERES D'ARRET DES ITERATIONS	37
5.4.1 Critère-1	38
5.4.2 Critère-2	39
6. DISCRETISATION ET RESOLUTION DES EQUATIONS	40
6.1 GENERALITES SUR LES METHODES DE DISCRETISATION	40
6.1.1 La méthode des différences finies	41
6.1.2 La méthode des éléments finis	42
6.2 LA METHODE DES ELEMENTS FINIS APPLIQUEE A L'EQUATION DE POISSON	43
6.2.1 Domaine d'intégration et conditions aux limites	43
6.2.2 Formulation variationnelle	46
6.2.3 Loi de conservation de la charge	48
6.2.4 Equations discrétisées	49
6.2.5 Commentaires et interprétation des équations discrétisées	51
6.3 LA METHODE DES ELEMENTS FINIS APPLIQUEE A L'EQUATION DE CONTINUITÉ DES MINORITAIRES	55
6.3.1 Domaine d'intégration et conditions aux limites	55
6.3.2 Formulation variationnelle	55
6.3.3 Loi de continuité du courant	56
6.3.4 Equations discrétisées	58
6.3.5 Commentaires et interprétations des équations discrétisées	61
6.4 MAILLAGE	63
6.4.1 Généralités	63
6.4.2 Particularités au MOST	66
6.4.3 Méthode de maillage	68
6.5 RESOLUTION DES SYSTEMES D'EQUATIONS DISCRETISEES	71
6.5.1 Généralités	71
6.5.2 Résolution des équations discrétisées de l'équation de Poisson	72
6.5.3 Résolution des équations discrétisées de l'équation de continuité des minoritaires	75
6.6 PREMIERE SOLUTION	78
6.6.1 Influence de la source et du drain	78
6.6.2 Influence de la grille	80

TABLE DES MATIERES

	Page	
7.	TENSION DE SEUIL ET AUTRES PARAMETRES DU MOST	84
7.1	TENSION DE SEUIL	84
7.1.1	Définition	84
7.1.2	Calcul de la tension de seuil	85
7.2	AUTRES PARAMETRES DU MOST	88
7.2.1	Paramètre de faible inversion	88
7.2.2	Facteur de transconductance	89
7.2.3	Transconductances et conductances de sortie	92
8.	PROGRAMME DE SIMULATION PTIMOS	94
8.1	GENERALITES	94
8.2	FICHER D'ENTREE DE PTIMOS	94
8.2.1	Description générale	94
8.2.2	Interfaces avec les données technologiques	97
8.3	FICHER DE SORTIE	98
8.4	DETECTION D'ERREURS	99
8.4.1	Erreurs sur le fichier d'entrée	99
8.4.2	Erreurs relatives à la physique du MOST	99
8.4.3	Erreurs d'informatique	100
8.5	ROUTINES PRINCIPALES ET ORGANIGRAMME DE PTIMOS	100
8.6	ORGANISATION DES MEMOIRES DE DONNEES	103
9.	RESULTATS ET PERSPECTIVES D'UTILISATION DU PROGRAMME PTIMOS	106
9.1	UTILISATION DE PTIMOS POUR LA SIMULATION DE TRANSISTORS REELS	106
9.2	EXEMPLE D'INFLUENCE DE LA PRECISION DU DOPAGE SUR LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UN MOST	118
9.3	CALCUL DES TENSIONS DE SEUIL	124
9.4	SIMULATIONS 2-D ET MODELES ANALYTIQUES	127
9.4.1	MOST à canal long	127
9.4.2	MOST à canal court	128
9.4.3	Utilisation de PTIMOS pour le développement de modèles analytiques	130
9.5	EFFETS BIDIMENSIONNELS DANS UN MOST	140
10.	CONCLUSIONS	144

TABLE DES MATIERES

	Page
ANNEXE I DEVELOPPEMENT DES EQUATIONS DISCRETISEES DE L'EQUATION DE POISSON LINEARISEE	146
ANNEXE II DECOMPOSITION INCOMPLETE DE CHOLESKI DES MATRICES DE RIGIDITE	149
ANNEXE III MANUEL D'UTILISATION DU PROGRAMME PTIMOS	151
REFERENCES	164