

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR BATNA
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
INSTITUT D'ELECTRONIQUE



THESE

Présentée par : M^r BENBOUZA Mohamed Salah

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat d'Etat en Electronique

Spécialité : Composants

Sujet :

**CONCEPTION ASSISTEE PAR ORDINATEUR DES
CIRCUITS INTEGRES MESFET GaAs**

Soutenue publiquement le:

Jury:

N. BOUGUECHAL
C. AZIZI-KENZAI
M. ZAABAT
D. E. AMEDDAH
A. OUNISSI
Z. HAFDI

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

Professeur
Professeur
Maître de conférence
Maître de conférence
Maître de conférence
Maître de conférence

TABLE DE MATIERE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
I - LA DIODE SCHOTTKY	6
I – 1. INTRODUCTION	6
I – 2. LES HYPERFREQUENCES.....	6
I - 3. PROPRIETES PHYSIQUES DE L'ARSENIURE DE GALLIUM.....	8
I – 3 – 1. Structure des bandes d'énergie.....	8
I – 3 – 2. Propriétés électriques du Silicium, GaAs et SiC.....	9
I – 3 – 3. Le facteur de mérite.....	11
I – 4. TRANSPORT ELECTRONIQUE.....	12
I – 5. LES FONCTIONS PRINCIPALES DE L'ELECTRONIQUE	
ANALOGIQUE.....	15
I – 6. LES FAMILLES DE COMPOSANTS.....	16
I – 6 – 1. Transistors à effet de champ.....	16
I – 6 – 2. Transistors à effet de potentiel.....	17
I – 6 – 3. Les composants quantiques.....	18
I – 7. LES TECHNIQUES DE CAO.....	18
I – 8. LA DIODE SCHOTTKY.....	19
I – 8 – 1. Introduction.....	19
I – 8 – 2. La physique de la diode Schottky.....	19
I – 8 – 3. Barrière de potentiel et zone de charge d'espace.....	21
I – 8 – 4. Courants dans la diode Schottky.....	23
I – 8 – 5. Le claquage par avalanche.....	24
I – 8 – 6. La capacité de la diode Schottky.....	26
I – 8 – 7. Schéma équivalent linéaire.....	27
I – 8 – 7 – 1. Partie extrinsèque.....	28
I – 8 – 7 – 2. Partie intrinsèque.....	28
I – 8 – 8. Schéma équivalent non- linéaire.....	30
I – 8 – 9. L'hétéro- structure simple barrière.....	31
I – 8 – 10. Résistance différentielle négative.....	34
I – 9. SIMULATION DE LA DIODE SCHOTTKY A L'AIDE DE PSPICE....	35
I – 10. CONCLUSION.....	39
BIBLIOGRAPHIE.....	40
II – LE TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP MESFET GaAs.....	42
II – 1. GÉNÉRALITÉS SUR LES DISPOSITIFS MESFET GaAs.....	42
II – 2. LES DISPOSITIFS À EFFET DE CHAMP.....	43
II – 2 – 1. Méthode d'approche des paramètres fondamentaux....	43
II – 2 – 1 – 1. Contrôle du courant	43
II – 2 – 1 – 2. La charge et la capacité du canal	44
II – 2 – 1 – 3. Réversibilité du dispositif.....	45
II – 2 – 1 – 4. Notations.....	45
II – 2 – 1 – 5. Performances d'un composant à effet	
de champ.....	46
II – 2 – 2. LE TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP A	
BARRIERE METAL- SEMI-CONDUCTEUR (MESFET).....	48
II – 2 – 2 – 1. Structure générale et principe de	
fonctionnement du MESFET	48
II – 2 – 2 – 2. Tension de pincement, tension de seuil	49
II – 2 – 2 – 3. Fonctionnement du MESFET : aspects	
quantitatifs	49
II – 3. ÉQUATIONS FONCTIONNELLES DU MESFET GaAs	
RECHERCHE D'UN MODELE DECRIVANT LES	
PHENOMENES PHYSIQUES	57

II – 3 – 1. Équations fonctionnelles du MESFET intrinsèque à canal non uniformément dopé	57
II – 3 – 1 – 1. Saturation par pincement du canal pour des grilles longues	60
II – 3 – 1 – 2. Saturation pour des grilles microniques	60
II – 3 – 1 – 3. Saturation pour des grilles submicroniques	60
II – 3 – 2. MESFET à canal uniformément dopé	61
II – 3 – 2 – 1. Dispositif à canal normalement bloqué.....	61
II – 3 – 2 – 2. Dispositif à canal normalement conducteur..	62
II – 3 – 3. Recul de la frontière de canal libre en régime de saturation du courant.....	63
II – 3 – 4. Comportement au voisinage du blocage	66
II – 4. EFFETS DE GEOMETRIE : ZONES D'ACCES ET SUBSTRAT...	67
II – 4 – 1. Influence de la résistance d'accès source- canal.....	67
II – 4 – 2. Débordement de la zone de charge d'espace de grille (effet de bord). Longueur effective du canal	69
II – 4 – 3. Influence de l'interface couche active substrat.....	69
II – 4 – 4. Commandes parasites : «Back gating et Side gating»...	71
II – 4 – 5. Effets piézoélectriques induits dans les MESFET GaAs lors des procédés de fabrication.....	72
II – 5. SCHEMA EQUIVALENT DU MESFET GaAs [17], [18].....	74
II – 5 – 1. Transistor interne.....	74
II – 5 – 2. Éléments parasites.....	75
II – 6. ÉVOLUTION DU TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP A BARRIERES DE SCHOTTKY.....	75
II – 7. MODELE POUR- LE FONCTIONNEMENT EN PETITS SIGNAUX.....	77
II – 8. SIMULATION BIDIMENSIONNELLE DES CARACTERISTIQUES I-V DU TRANSISTOR MESFET GaAs.....	79
II – 8 – 1. Etude bidimensionnelle du transistor MESFET GaAs....	79
II – 8 – 2. Détermination de la tension bidimensionnelle dans la zone active.....	79
II – 8 – 3. Caractéristiques courant- tension I-V.....	80
II – 8 – 4. Détermination de l'équation générale du courant.....	81
II – 8 – 5. Effet de la loi de mobilité.....	82
II – 8 – 6. Effet de la tension $V_I(x, y)$	83
II – 8 – 7. Effet des éléments parasites.....	84
II – 8 – 8. Simulations.....	84
II – 9. EFFET NON LINEAIRE DE CAPACITE C_{GS} ET G_{GD}.....	88
II – 9 – 1. Détermination de la charge de la région de déplétion.....	88
II – 9 – 1 – 1. Régime linéaire.....	88
II – 9 – 1 – 2 - Mode de saturation.....	90
II – 9 – 2. Détermination des capacités.....	91
II – 9 – 2.- 1. La capacité grille – source.....	91
II – 9 – 2.- 2. La capacité grille drain.....	92
II – 9 – 3. Simulation des capacités C_{gs} et C_{gd}	93
II – 10. MISE EN EVIDENCE EXPERIMENTALE DES DIFFERENTS PHENOMENES LIES À L'INTERFACE.....	99
II – 10 – 1. Effet d'hystérésis et de coude sur le réseau de caractéristiques statiques de sortie.....	100

II – 10 – 2. Influence de la polarisation du substrat Sur les caractéristiques de sortie.....	100
II – 10 – 3. Influence de la polarisation du substrat sur la caractéristique de transfert à bas niveau de polarisation.....	101
II – 10 – 4. Influence de la polarisation du substrat sur la tension de seuil V_T	102
II – 10 – 5. Dispersion de la capacité d'entrée.....	103
II – 10 – 6. Dispersion de la conductance de sortie.....	103
II – 10 – 7. Interprétation des phénomènes.....	104
II – 11. INFLUENCE DE LA RESISTANCE DE GRILLE ET DU FACTEUR DE BRUIT.....	105
II – 11 – 1. Influence de la résistance de grille sur l'impédance d'entrée.....	105
II – 11 – 2. Influence de la grille sur le facteur de bruit.....	108
II – 12. CONCLUSION.....	109
BIBLIOPHAPHIE.....	111
III - CIRCUITS NUMERIQUES.....	117
III – 1. HISTORIQUE DES CIRCUITS INTÉGRÉS NUMÉRIQUES GaAs.	117
III – 2. RAPPEL DE QUELQUES PROPRIETES FONDAMENTALES DES CIRCUITS LOGIQUES	119
III – 2 – 1. Propriétés fondamentales.....	119
III – 2 – 1 – 1. Seuils logiques et niveaux logiques.....	119
III – 2 – 1 – 2. Graphes de transfert et marges de bruit.....	120
III – 2 – 1 – 3. Non- linéarité et gain de transfert.....	121
III – 2 – 1 – 4. Dissipation thermique.....	121
III – 2 – 1 – 5. Dynamique d'une porte le temps de propagation.....	121
III – 2 – 6. Entrance et sortance.....	122
III – 2 – 7. Chemin critique.....	122
III – 2 – 2. Intérêt du GaAs pour les circuits numériques.....	123
III – 2 – 3. Les contraintes liées à l'intégration des composants.....	124
III – 3. L'ASSEMBLAGE DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES SUR GaAs.....	125
III – 4. PARAMÈTRES ÉLECTRIQUES DES TRANSISTORS INTERVENANT DANS LA CONCEPTION D'UN CIRCUIT INTÉGRÉ	126
III – 4 – 1. Paramètres de conception.....	126
III – 4 – 2. Évaluation simplifiée des paramètres de la logique GaAs.....	129
III – 5. DETERMINATION DES PARAMETRES DOMINANTS DE TECHNOLOGIQUE	132
II – 5 – 1. Mesure des paramètres statiques sur une structure de tests associés.....	133
III – 5 – 2. Les méthodes utilisées pour l'extraction des principaux paramètres.....	135
III – 5 – 2 – 1. Tension de commande latérale parasite... ..	135
III – 5 – 2 – 2. Résistance de contact ohmique et résistance carrée de la couche active (R_c et R_{\square}).....	135
III – 5 – 2 – 3. Courant de saturation des MESFET (I_{dss})....	136
III – 5 – 2 – 4. Tension de seuil électrique (V_{ts}).....	136
III – 5 – 2 – 5. Conductance à saturation (G_{ds}).....	136
III – 5 – 2 – 6. Transconductance à saturation (g_{m0}).....	136
III – 5 – 2 – 7. Résistance d'accès (R_{sd}), conductance de canal (g_0) et tension de seuil faible champ (V_{t0}).....	137
III – 5 – 2 – 8. Paramètres des jonctions Schottky.....	137
III – 5 – 2 – 9. Détermination des profils de concentration de porteurs et de mobilité de la	

couche active.....	138
III – 5 – 3. Détermination du temps de propagation des portes.....	139
III – 5 – 4. Sensibilité des caractéristiques aux différents paramètres technologiques.....	141
III – 5 – 4 – 1. Incidence de l'assemblage des procédés.....	141
III – 5 – 4 – 2. Incidence de la longueur de grille.....	141
III – 5 – 4 – 3. Incidence de la commande latérale parasite..	142
III – 6. PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES DIFFÉRENTES FAMILLES LOGIQUES GaAs.....	143
III – 6 – 1. Les structures élémentaires, bases des familles logiques utilisant des MESFET.....	144
III – 6 – 2. Les différentes familles logiques.....	145
III – 6 – 2 – 1. La logique BFL (Buffered Fet Logic).....	145
III – 6 – 2 – 1 – 1. Caractéristiques statiques.....	146
III – 6 – 2 – 1 – 2. Caractéristiques dynamiques....	150
III – 6 – 2 – 2. La logique SDFL.....	151
III – 6 – 2 – 3. La logique DCFL.....	152
III – 6 – 2 – 3. La logique LPFL.....	152
III – 6 – 3. Caractéristiques générales de ces approches.....	153
III – 6 – 4. Performances des portes logiques.....	153
III – 7. ÉTAPES DE LA CONCEPTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR....	154
III – 7 – 1. Chaîne intégrée de logiciels : stations de travail.....	154
III – 7 – 2. Caractéristiques générales des différents niveaux de simulation.....	156
III – 7 – 2 – 1. La simulation fonctionnelle.....	156
III – 7 – 2 – 2. La simulation logique.....	156
III – 8. Modèles de MESFET utilisés en simulation électrique.....	157
III – 8 – 1. Modèle de MESFET.....	157
III – 8 – 2. Modèle des diodes Schottky.....	158
III – 8 – 3. Modèle des résistances.....	159
III – 9. REGLES DE DESSINS UTILISES DANS LES FILIERES DE FABRICATION DES CIRCUITS INTEGRES GAAS.....	160
III – 10. EXEMPLES DE RÉALISATIONS DE CIRCUITS INTÉGRÉS NUMÉRIQUES GaAs.....	161
III – 10 – 1. Les circuits à la demande.....	162
III – 10 – 2. La conception au micron d'un circuit intégré logique GaAs	164
III – 10 – 3. Exemples de réalisation de circuits intégrés.....	164
III – 10 – 3 – 1. Les diviseurs de fréquence GaAs à rang fixe.....	164
III – 10 – 3 – 2. L'additionneur à 4 bits GaAs.....	167
III – 11. INDUCTANCES ACTIVES CONTROLEES EN TECHNOLOGIE MESFET GaAs.....	169
III – 11 – 1. Introduction.....	169
III – 11 – 2. Inductances actives en technologie GaAs.....	169
III – 11 – 3. Inductances actives en technologie bipolaire silicium....	171
III – 11 – 3 – 1. Généralités.....	171
III – 11 – 3 – 2. Modèle de R. Kaunisto [30].....	172
III – 11 – 4. Modèles proposée.....	173
III – 11 – 4 – 1. Première inductance proposée.....	173
III – 11 – 4 – 2. Deuxième inductance proposée.....	174
III – 12. Comparaison des topologies figure III – 54 et figure III – 58.....	176
III – 13. CONCLUSION.....	177
BIBLIOGRAPHIE.....	178
CONCLUSION GENERALE.....	182
PUBLICATION EN RELAIION AVEC CE TRAVAIL.....	184

RESUME

L'essor exceptionnel que connaît l'industrie des circuits intégrés repose actuellement sur la réduction des dimensions des dispositifs et des composants actifs tels que les transistors à effet de champ à grille Schottky à l'arséniure de gallium dits MESFET GaAs. L'évolution des technologies d'intégration à très grande échelle à marquer l'épanouissement de la microélectronique moderne. La conception assistée par ordinateur est au cœur des recherches mondiale d'une part le développement considérable des logiciels pour composant intégré submicronique et d'autre part par la préoccupation première des facteurs des circuits complexes intégrant ces composants.

Au cours de ce travail nous avons été amenés à étudier et proposer un modèle de base du transistor MESFET GaAs afin de disposer d'outils efficaces pour la CAO des circuits intégrés microondes et logiques.

C'est dans ce cadre qu'au premier chapitre, nous avons étudié les propriétés physiques et électriques de l'arséniure de Gallium et présente les différentes familles des transistors MESFET GaAs. La diode Schottky de grille, son fonctionnement et les problèmes de polarisations liées à l'ensemble des phénomènes physiques et géométriques, est caractérisée et simulée.

Au deuxième chapitre, l'étude des propriétés statiques et dynamiques du composant MESFET nous a conduit à définir le système d'équations générales régissant le comportement de la zone active sont établis. L'ensemble des éléments parasites qu'interviennent dans le fonctionnement du modèle proposé du transistor sont identifiés et caractérisés.

Au troisième chapitre, les procédés de fabrication des technologies des transistors et circuits intégrés des MESFET GaAs ont été définies. Les paramètres dominants qui caractérisent ces composants sont établis et simulés. Ensuite l'étude de l'impédance et ainsi que la résistance de sortie des circuits MESFET GaAs sont établis.

CONCEPTION ATTENDED BY COMPUTER OF THE INTEGRATED CIRCUIT MESFET GaAs

ABSTRACT

The exceptional flight that the industry of the integrated circuits knows based currently on the reduction of the measurements of the devices and the active components as the field effect transistors to grid Schottky to the gallium arsenide MESFET GaAs. The evolution of the very large scale integration technologies to mark the blossoming of the modern microelectronics. The conception reached by computer CAO

In the present of this work we have been brought to study and to propose a model of basis of the transistor MESFET GaAs in order to have some efficient tools for the CAO of the integrated circuits microwave and logical.

In the first chapter, we studied the physical and electric properties of the gallium arsenide and present the different families of the transistors MESFET GaAs. The diode Schottky of grid, its working and the problems of linked polarizations to the set of the physical and geometric phenomena, is characterized and affected.

In the second chapter, observation of the static and dynamic properties of the MESFET component push us to define the system of general equations governing the behaviour of the active zone are established. The set of the parasitic elements that intervenes in the working of the model proposed of the transistor is identified and characterized.

To the third chapter, the production methods of the technologies of the transistors and integrated circuits of the MESFET GaAs are defined. The dominant parameters that characterize these components are established and simulated. Then the survey of input impedance and the output resistor of the circuits MESFET GaAs are established.

Mots clés

Transistor à effet de champ
Modèle électrique
Éléments parasites internes et externes
Modèle non-linéaire
Diode Schottky
Inductance active

Keywords

Field effect transistor
Elements parasitic internal and external
Model nonlinear
Diode Schottky
Active Inductance