



**Mémoire de Projet de fin d'étude**

**Préparé par**

**FARTI Azzeddine**

**Pour l'obtention du diplôme**

*Master Sciences et Techniques*

*Electronique, Signaux et Systèmes Automatisés*

*(E.S.S.A)*

**Intitulé**

**Analyse des défauts de grille des transistors  
MOS par la méthode de Terman**

**Encadré par :**

**Pr. AHAITOUF Ali**

**Soutenu le 14 Juin 2016, devant le jury composé de :**

Pr. A.AHAITOUF.....: **Encadrant**

Pr. N.AMRANI ..... : **Examinateur**

Pr. M.BOUYAD ..... : **Examinateur**

## Remerciements

*Je tiens à remercier en premier lieu mon dieu le tout puissant qui m'a donné la force d'accomplir ce travail.*

*Je tiens à remercier monsieur le professeur **AHAITOUF Ali**, pour avoir assuré l'encadrement de ce travail. Sa disponibilité, son soutien attentif, ses encouragements, ses conseils judicieux, son expérience, son savoir scientifique et ses qualités professionnelles ont été déterminants dans l'aboutissement de ce travail.*

*J'exprime aussi ma profonde gratitude au Pr. Hassan Maher et Pr : JAOUAD Abdelatif les professeurs de l'université de **SHERBROOKE** Canada (groupe GaN) pour me fournir les mesures expérimentales de la capacité.*

*Je remercie vivement tous les membres du jury, qui ont accepté de juger ce travail et me fait l'honneur d'assister à mon soutenance.*

*Je remercie également tous les professeurs du département de génie électrique, qui ont assuré efficacement ma formation. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute mon gratitude.*

*Enfin, mes remerciements les plus sincères s'adressent à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# Dédicace

*Je dédie ce projet de fin d'études :*

*A*

*Mes très chers parents*

*Pour leur amour, sacrifices*

*et encouragements*

*A*

*Mes chers frères et sœurs*

*Pour leur affection, compréhension et patience*

*A*

*Mes chers amis*

*A*

*Tous ceux qui me sont chers*

# Résumé

Ce travail concerne la détermination de la densité de défauts à l'interface d'une structure de grille MOS d'un transistor à Base de GaN destiné aux applications hautes fréquences.

La méthode de Terman est appliquée pour extraire la densité d'états d'interface dans une structure MOS Al/SiO<sub>2</sub>/GaN à partir de la caractéristique Capacité-tension mesurées à hautes fréquences.

La modélisation théorique de caractéristique capacité tension a été effectuée sous MATLAB, ensuite une comparaison avec les résultats expérimentaux pour différentes fréquences (1MHz, 500 kHz, 100 kHz, 10 kHz) a été effectuée pour évaluer la densité d'états d'interface Dit pour chaque structure.

Les résultats obtenus pour la fréquence de 1MHz, montrent un minimum de  $2.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$  et un maximum de  $6.65 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ . Ceci montre que les fréquences utilisées peuvent toutes être considérées comme des hautes fréquences pour les structures étudiées étant donné que La densité d'état d'interface dépend fortement de la fréquence appliquée pour la mesure de la capacité. En effet parfois, la densité d'états d'interface qui arrivent à suivre le signal alternatif peut être non négligeable.

# Abstract

This work concerns the determination of the defects density in the interface of a MOS structure in a GaN transistor for high frequency applications.

The Termann analysis is used to extract the interface states density in an Al/SiO<sub>2</sub>/GaN MOS structure from the measured capacitance-voltage characteristics at 1MHz.

Theoretical models for the capacitance was developed in MATLAB, and compared to the measurements performed at several frequencies (1MHz, 500 kHz, 100 kHz, 10 kHz).

Results show, for 1MHz, a minimum of  $2.5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$  and a maximum of  $6.65 \times 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ . These results show that all the used frequencies can be considered as high because the interface state density does not change anyway. In fact, sometimes the interface states who can follow the ac signal frequencies can be more important and consequently the determined densities changes.

# Liste des acronymes

$V_G$  : tension de la grille

$V_S$  : tension du semi-conducteur

$C_{OX}$  : capacité de l'isolant

$C_{SC}$  : capacité du semi-conducteur

$C_T$  : capacité total

$C_{it}$  : capacité d'états d'interface

ZCE : zone de charge d'espace

$e\phi_m$  : Le travail de sortie du métal

$e\phi_S$  : Le travail de sortie du semi-conducteur

$e\phi_B$  : Barrière de potentiel

$e\chi_S$  : Affinité électronique du SC

$e\chi_i$  : Affinité électronique du l'isolant

$E_{FM}$  : Niveau de Fermi du métal

$E_{SC}$  : Niveau de Fermi du semi-conducteur

$E_i$  : Niveau de Fermi intrinsèque du semi-conducteur

$E_C$  : Bande de conduction

$E_V$  : Bande de valence

NV : Niveau du vide

$E_g$  : Energie du gap

$\epsilon_{OX}$  : Permittivité de l'isolant

$\epsilon_{SC}$  : Permittivité du semi-conducteur

d : Épaisseur de l'isolant

K : Constant de Boltzmann

T : Température absolue en Kelvin

$\rho(x)$  : Densité totale de charge d'espace

$Q_{SC}$  : Charge de semi-conducteur

$L_D$  : Longueur de Debye extrinsèque pour les électrons

$q$  : Charge électronique

$n_{n0}, p_{n0}$  : Densités des électrons et des trous en équilibre

$N_{ss}, D_{it}$  : Densité d'état d'interface

# Liste des figures

Figure 1: Structure hexagonale würtzite idéale de nitrure de Gallium (GaN)....	17
Figure 2: Structure de type cubique de nitrure de Gallium.....	17
Figure 3: Structures Métal Isolant Semi-conducteur .....	23
Figure 4: Diagramme détaillé de bande d'une structure MIS de type N .....	23
Figure 5: Contact métal semi-conducteur avec $e\phi_m < e\phi_s$ .....	25
Figure 6: Contact métal semi-conducteur avec $e\phi_m > e\phi_s$ .....	26
Figure 7: Diagramme de bande d'énergie $V_G=0$ .....	27
Figure 8: Structure MIS de type N polarisée positivement.....	27
Figure 9: Densité de charge d'une structure MIS de type N en régime d'accumulation .....	27
Figure 10: Diagramme des bandes d'énergie en régime d'accumulation.....	28
Figure 11: Densité de charge d'une structure MIS de type N en régime de déplétion .....	29
Figure 12: Structure MIS de type N polarisée négativement.....	29
Figure 13: Diagramme des bandes d'énergie en régime de déplétion.....	29
Figure 14: Diagramme de bande d'énergie en régime de faible inversion.....	30
Figure 15: Coupe transversale de la structure MIS faible inversion.....	30
Figure 16: Densité de charge d'une structure MIS de type N en régime de faible inversion .....	31
Figure 17: Densité de charge d'une structure MIS de type N en régime de forte inversion .....	31
Figure 18: Diagramme de bande d'énergie en régime de forte inversion.....	32
Figure 19; Différents régimes en fonction de la tension appliquée ( $V_G$ ) et de la chute de potentiel dans le semi-conducteur ( $V_S$ ). .....	33
Figure 20: Caractéristique C-V théorique pour une structure MIS sur un semi-conducteur type N .....	36
Figure 21: Pièges électroniques présent dans la couche diélectrique et à l'interface isolant/semi-conducteur.....	37
Figure 22: Caractéristique capacité-tension théorique (gauche) et réelle (droite) .....	40
Figure 23: Caractéristique $V_S(V_G)$ obtenu par la technique de Terman .....	41
Figure 24: Caractéristique capacité tension 1MHz .....	43
Figure 25: Caractéristique capacité-tension théorique.....	44
Figure 26: Variation du potentielle $V_s$ en fonction du $V_G$ 1MHz.....	44
Figure 27: Densité d'état d'interface de l'échantillon 1 avec $f=1\text{MHz}$ en fonction de la tension du SC et l'énergie.....	45
Figure 28: Densité d'état d'interface de l'échantillon 2 et 3 avec $f=1\text{MHz}$ en fonction de la tension du SC ( $V_S$ ) et l'énergie ( $E_C-E_T$ ).....	46
Figure 29: Caractéristique capacité-tension réelle pour plusieurs fréquences....	47

Figure 30: Densités d'état d'interface  $D_{it}$  pour plusieurs fréquences en fonction de la tension de SC ( $V_S$ ) et l'énergie ( $E_C - E_T$ )..... 48

# Liste des tableaux

Tableau 1: Les principales propriétés électriques et thermiques des semi-conducteurs.....	19
Tableau 2: Les principales applications associées au semi-conducteur GaN.....	20
Tableau 3: Affinité électronique de quelques semi-conducteurs.....	24
Tableau 4: travail de sortie de quelques métaux.....	24
Tableau 5: Résultats de densité d'états d'interface Dit pour l'échantillon 2 (E730MJ_1MHz) et 3 (E730MH_1MHz).....	46
Tableau 6: Résultats expérimentaux pour différentes fréquences.....	48

# Table de matière

Remerciements .....	1
Dédicace .....	2
Résumé .....	3
Abstract.....	4
Liste des acronymes .....	5
Liste des figures.....	7
Liste des tableaux .....	9
Table de matière .....	10
Introduction .....	12
Organigramme du Laboratoire Energies Renouvelables et systèmes Intelligents (LERSI) .....	13
Chapitre 1 : Généralité de la Niture de Gallium .....	15
<b>I- Introduction</b> .....	16
<b>II- Niture de Gallium</b> .....	16
1- Définition .....	16
2- Les propriétés électriques du GaN.....	16
3- Propriété thermique du GaN.....	19
4- Les avantages et les domaines d'application associée du GaN .....	20
<b>III- L'isolant SiO<sub>2</sub></b> .....	20
1- Propriété électrique de l'isolant SiO <sub>2</sub> .....	20
2- Différents types de charges dans l'oxyde .....	21
<b>IV- Conclusion</b> .....	21
Chapitre 2 : Structure Métal/Isolant/Semi-conducteur (MIS).....	22
<b>I- Introduction</b> .....	23
<b>II- Concepts de base</b> .....	23
1- Diagramme de bande .....	23
2- Contact ohmique : Contact SCHOTTKY .....	24
<b>III- Structure Métal/isolant/semi-conducteur (MIS) idéale</b> .....	26
1- Définition .....	26
2- Régime d'équilibre thermodynamique.....	26

3-	Régime d'accumulation.....	27
4-	Régime de déplétion.....	28
5-	Régime de forte inversion .....	31
6-	Modélisation .....	32
7-	Résumé.....	33
IV-	Capacité de la structure .....	33
1-	Capacité de semi-conducteur : .....	33
2-	Capacité de l'isolant : .....	35
3-	Capacité total .....	36
4-	Caractéristique C-V théorique pour une structure MIS.....	36
V-	Structure MIS réelle .....	37
1-	Définition .....	37
VI-	Méthode de Terman .....	38
1-	Introduction .....	38
2-	Propriété des états d'interface.....	38
3-	Effet des états d'interface sur la courbe C-V .....	38
4-	Capacité d'états d'interface.....	39
5-	Méthode de haute fréquence (méthode de Terman) .....	40
VII-	Conclusion .....	41
Chapitre3 : Résultats expérimentaux et analyse.....		42
I-	Introduction.....	43
II-	Résultats de la capacité-tension pour 1MHz.....	43
1-	Caractéristique capacité-tension $C(V_G)$ .....	43
2-	Caractéristique $V_s(V_G)$ .....	44
3-	Densité d'état d'interface pour 1MHz.....	45
III-	Comparaison des résultats pour différence fréquence .....	47
1-	Caractéristique capacité tension $C(V_G)$ .....	47
2-	Densité d'état d'interface .....	47
3-	Comparaison des résultats.....	48
IV-	Conclusion .....	48
Conclusion générale .....		49
Référence bibliographique .....		50

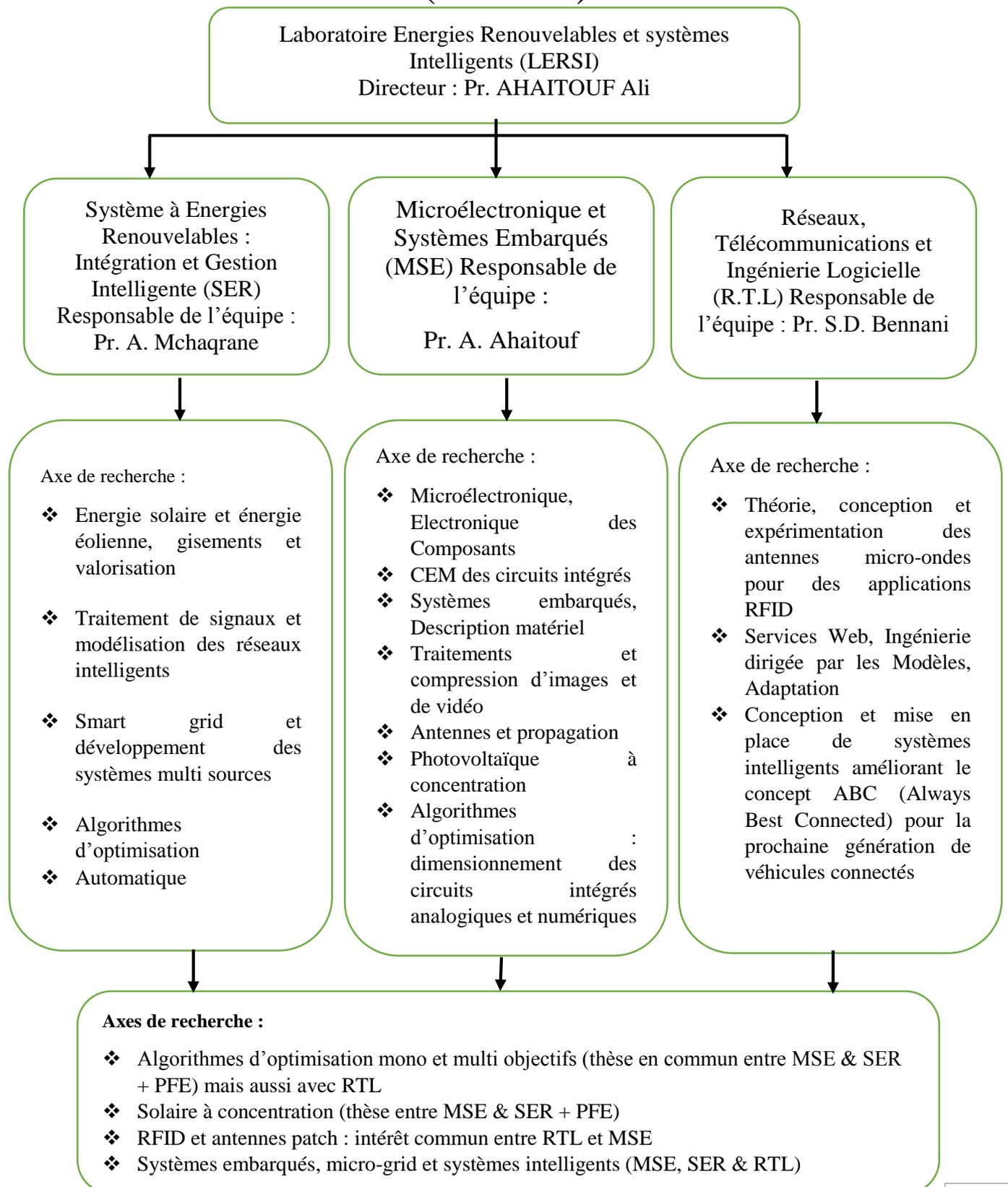
# Introduction

La diversité et la facilité des moyens de communication moderne sont dues aux énormes progrès réalisés sur les composantes électroniques à base de semi-conducteur. Malgré le succès formidable de l'électronique à base de silicium, l'exigence technologique actuelle en matière de rapidité et de miniaturisation de circuits pour la microélectronique ont permis de mettre en évidence la limite des dispositifs à base de silicium, et d'orienter les chercheurs de penser à d'autres alternatives pour surpasser les limites actuelles du Si. Une des voies de recherche, qui intéresse de plus en plus la communauté scientifique, serait d'introduire de nouveaux matériaux semi-conducteurs plus performants ayant des propriétés plus intéressantes.

Ceci étant même pour ces matériaux qui vont remplacer le silicium on se trouvera toujours confrontés aux problèmes liés aux états d'interfaces (défauts entre l'isolant et semi-conducteur) à cause de la discontinuité du cristal semi-conducteur. Ces défauts limitent les performances des transistors MOS. La percée de ces transistors au niveau industriel ne peut se faire que par une diminution de ces défauts à l'interface. Dans la littérature il y a plusieurs méthodes d'analyser ces défauts parmi elles la technique de Terman à haute fréquence, cette technique permet d'effectuer une estimation rapide de ces défauts sur une large gamme d'énergie.

Ce stage a été effectué au sein du laboratoire Energies renouvelables et Systèmes intelligents. Ce laboratoire de la faculté des sciences et Techniques ouvre dans différents domaines complémentaires et innovants. Il est constitué de trois équipes comme le montre l'organigramme ci-dessous. Il est formé de **34** personnes au jour d'aujourd'hui, dont **13** permanents et **21** doctorants. J'ai effectué mon stage au sein de l'équipe Microélectronique et Systèmes Embarqués (MSE) dirigée par le Pr. A. AHAITOUF).

# Organigramme du Laboratoire Energies Renouvelables et systèmes Intelligents (LERSI)



Ce projet est réparti comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à l'introduction des propriétés électriques et thermiques du nitrure de gallium (GaN). Les domaines d'application et les avantages que présente ce matériau. Ainsi une brève présentation des propriétés électriques de l'isolant SiO<sub>2</sub> et ses différents types de charges.

Dans le deuxième chapitre nous allons s'intéresser à l'étude de la structure métal/isolant/semi-conducteur (MIS) où l'isolant est le SiO<sub>2</sub>. On commence par définir quelques concepts de base (diagramme de bande, travail de sortie, affinité électronique, contact ohmique, contact Schottky), une étude plus détaillée concernant la structure MIS idéale et réelle pour différentes polarisations sera présentée, par la suite une introduction des états d'interface, ses propriétés et ses effets sur la caractéristique capacité-tension, la méthode de Terman (méthode haute fréquence) pour analyser ces défauts.

Dans le dernier chapitre, nous présentons une interprétation de nos résultats obtenus en utilisant la méthode de Terman.

# Chapitre 1 : Généralité de la Nitrure de Gallium

## I- Introduction

Le monde des semi-conducteurs est dominé en terme de marché par le silicium (Si). Grâce à sa grande abondance, son faible coût de production, il est considéré comme le matériau semi-conducteur de premier choix et est le plus utilisé dans le domaine de la microélectronique. Cependant, les besoins de l'humanité en constante augmentation, et la recherche incessante de plus de performances, d'efficacité énergétique et de miniaturisation font que les limites théoriques de ce matériau sont pratiquement atteintes. Ce qui pousse plusieurs candidats de remplacement à apparaître, dont les matériaux III-V. Ces derniers se caractérisent par leurs propriétés électroniques, physiques et thermiques très importantes, qui ouvrent un champ d'applications en électronique et en optoélectronique très vaste.

Le nitrure de gallium (GaN) fait partie de ces candidats grâce à ses propriétés intéressantes, il est l'un des matériaux d'avenir. Sa large bande interdite, sa forte conductivité thermique et sa vitesse de saturation élevée font de lui un matériau de choix pour des applications d'électronique de puissance et de hautes fréquences [1].

## II- Nitrure de Gallium

### 1- Définition

Le nitrure de gallium est un matériau semi-conducteur composé, de la famille III-V, les éléments qui le composent sont : le Gallium (Ga) et l'azote (N) appartiennent à la 3<sup>ème</sup> (Ga) et à la 5<sup>ème</sup> (N) colonne de la classification périodique de Mendeleïev. Du fait de sa large bande interdite il a un champ de claquage très élevé d'ordre de  $3\text{MV}\cdot\text{cm}^{-1}$  permet l'utilisation de ce matériau pour la réalisation de dispositifs optoélectroniques de haute efficacité tels que les lasers [2].

### 2- Les propriétés électriques du GaN.

#### a- Structure cristalline

Le nitrure de gallium (GaN) cristallise sous deux formes différentes à la température ambiante : la structure hexagonale ou würtzite et la structure cubique (dite Zinc Blende).

**La structure de type würtzite ou hexagonale (h-GaN) :** c'est une structure thermodynamiquement très stable, constituée par deux sous-réseaux hexagonaux compacts, l'un contenant les atomes de gallium (Ga) et l'autre les atomes d'azote (N) [3].

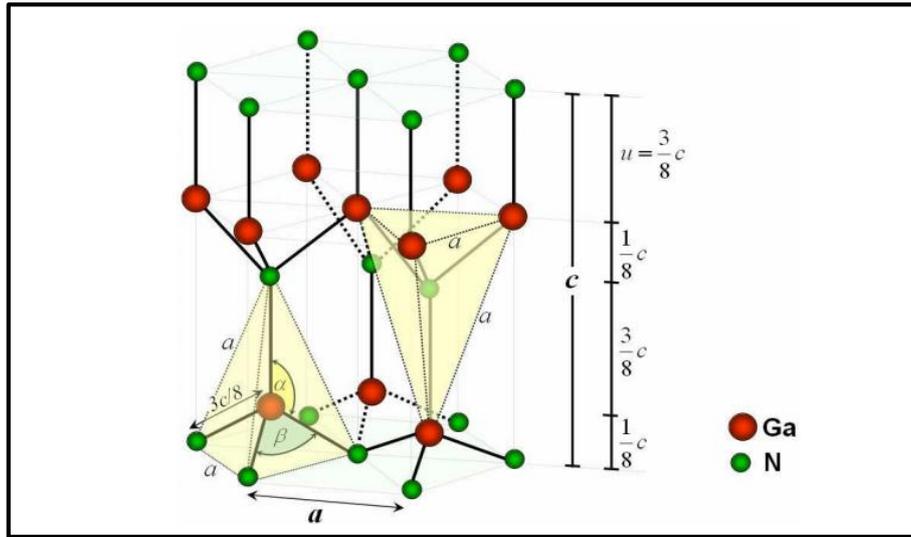


Figure 1: Structure hexagonale würtzite idéale de nitrure de Gallium (GaN)

**La structure de type blende de zinc ou cubique (c-GaN) :** thermodynamiquement métastable, est constituée de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées d'atomes de gallium et d'azote décalés d'un quart par rapport à la diagonale de la maille :

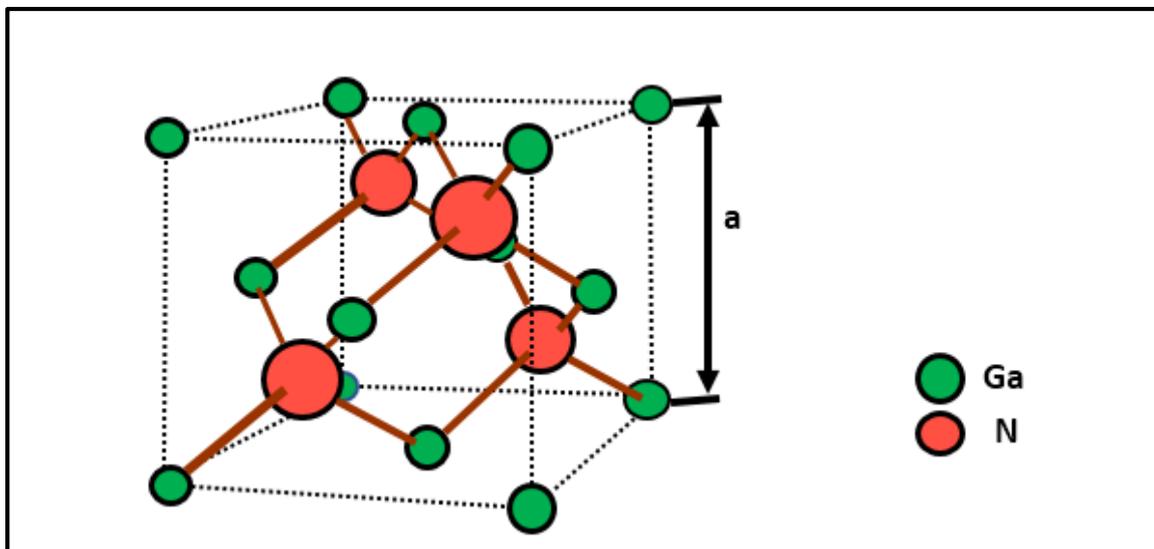


Figure 2: Structure de type cubique de nitrure de Gallium

### **b- Structure de bande**

Par définition, la bande interdite représente l'énergie nécessaire à un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction.

La largeur de bande interdite varie avec la température suivant la formule décrite par Varshni :

$$E_g = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (1.1)$$

$\alpha$  et  $\beta$  sont des constantes, elles sont respectivement de l'ordre de 1 meV/K et de 1000 K respectivement pour GaN de type wurtzite [4].

### **c- Densité de porteurs intrinsèques**

Du fait de sa large bande interdite, les densités intrinsèques des porteurs dans le GaN sont très faibles, de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^{-3}$  à 300K [5]. La densité de porteurs intrinsèques dans le GaN wurtzite (hexagonal) varie en fonction de la température comme suit [2].

$$n_i = (N_C \cdot N_V)^{1/2} \exp\left(\frac{qE_g}{2KT}\right) \quad (1.2)$$

Avec  $T$  la température et  $E_g$  la bande interdite de GaN

### **d- Mobilité des électrons et des trous**

La mobilité des électrons du GaN du type N atteint son maximum  $950 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  pour une température 150K. À température ambiante (300K) la mobilité des électrons vaut  $568 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .

La mobilité des trous dans le GaN atteint son maximum ( $500 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) pour une température d'environ 250K [2].

### **e- Champs de claquage**

Comme pour tous les matériaux à large bande interdite, le champ de claquage du GaN est très élevé.

On l'estime à environ  $3.3 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Cette valeur est comparable à celle qui est obtenue avec les SiC et à peu près 10 fois supérieures à celle du GaAs ou du Si [5].

### 3- Propriété thermique du GaN

#### a- Conductivité thermique.

La conductivité thermique d'un matériau est la propriété cinétique déterminée par les contributions des degrés de liberté électronique, rotationnelle et vibrationnel des molécules [5].

La conductivité thermique du GaN est de  $1,3 \text{ W K}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  [6], Cette valeur est très proche de celle du Si et elle est trois fois supérieure à celle du GaAs ou du saphir. Cette propriété est capitale pour des applications où une forte dissipation thermique est nécessaire. C'est le cas en particulier des dispositifs de puissances hyperfréquence où la température dans le canal peut atteindre  $400^\circ\text{C}$  [2]. Une bonne évacuation de la chaleur est donc nécessaire.

#### b- Coefficient de dilatation thermique

Lorsque la température d'un solide augmente, les distances interatomiques, et par suite la densité du solide se modifient sous l'effet des vibrations.

Les coefficients de dilatation thermique du GaN varient entre  $4,3 \cdot 10^{-6}$  à 300K et  $5,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  à 1000K dans la direction a, et de  $3,2 \cdot 10^{-6}$  à  $4,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  dans la direction c. [2].

Le tableau ci-dessous résume les principales propriétés électriques et thermiques du GaN en comparaison avec les matériaux semi-conducteurs les plus communs [1].

Matériau	Bande interdite (eV) à T=300 k	Champs Critique ( $\text{MV.cm}^{-1}$ )	Mobilité Des électrons $\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$	Mobilité Des trous $\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$	Permittivité $\epsilon_r$	Conductivité thermique ( $\text{W K}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ )
Si	1.11	0.3	1400	600	11.8	1.5
Ge	0.67	0.1	3900	1900	16	0.6
GaAs	1.43	0.4	8500	400	12.8	0.5
<b>GaN</b>	<b>3.39</b>	<b>3</b>	<b>950</b>	<b>350</b>	<b>9.5</b>	<b>1.3</b>
C	5.47	10	2200	1600	5.5	20

Tableau 1: Les principales propriétés électriques et thermiques des semi-conducteurs

## 4- Les avantages et les domaines d'application associée du GaN

La technologie GaN bénéficie d'une combinaison remarquable des caractéristiques des matériaux à large bande interdite qui la prédestine naturellement à des applications de forte puissance :

- ❖ un champ de claquage élevé associé à un faible taux d'ionisation par impact, permet d'obtenir des puissances de sortie élevées (8 fois supérieur aux technologies III-V GaAs).
- ❖ la forte conductivité thermique du GaN,  $1.3 \text{ WK}^{-1}\text{cm}^{-1}$  contre  $0.5 \text{ WK}^{-1}\text{cm}^{-1}$  pour le GaAs et de certains substrats comme le diamant  $> 9 \text{ WK}^{-1}\text{cm}^{-1}$  est avantageuse pour l'évacuation des calories.
- ❖ la forte bande interdite rend les dispositifs plus immunes aux agressions de type électromagnétiques.
- ❖ des vitesses de saturation relativement importantes ( $3.10^7 \text{ cm/s}$ ) favorisent les applications à haute fréquence.

Les principales applications associées sont reportées dans le tableau ci-dessous [7].

Propriété	Applications
Bande interdite (eV)	Hautes températures Fortes tensions
Champs Critique ( $\text{MV}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	Fortes tensions
Mobilité Des électrons ( $\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$ )	Hautes fréquences
Mobilité Des trous ( $\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$ )	Hautes fréquences
Vitesse de saturation (cm/s)	Hautes fréquences

Tableau 2: Les principales applications associées au semi-conducteur GaN

### III- L'isolant $\text{SiO}_2$

#### 1- Propriété électrique de l'isolant $\text{SiO}_2$

A température ambiante, les valeurs de la conductivité et de la diffusivité thermique, sont assez faibles (respectivement  $0,014 \text{ Wcm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$  et  $0,006 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ ). La mobilité des porteurs dans le  $\text{SiO}_2$  à température ambiante est de 10 à  $20 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  pour les électrons et de l'ordre de  $10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  pour les trous [8].

## **2- Différents types de charges dans l'oxyde**

On distingue différents types de charges dans L'isolant  $\text{SiO}_2$  : la charge fixe, la charge mobile et la charge des états d'interface.

Dans le chapitre suivant (structure MIS réelle) on va détailler ces Différents types de charges et leur influence sur la caractéristique Capacité-tension  $C(V)$  de la structure métal isolant semi-conducteur.

## **IV- Conclusion**

Au cours de ce premier chapitre, nous avons introduit le matériau nitrure de gallium (GaN), ses propriétés intéressantes, ses avantages et les domaines d'application. Ensuite une brève description de l'isolant  $\text{SiO}_2$ , ses propriétés électriques et les charges ce qu'il pourrait contenir.

## Chapitre 2 : Structure Métal/Isolant/Semi-conducteur (MIS)

## I- Introduction

Le métal-isolant- semi-conducteur (MIS) est le dispositif le plus utile et la structure la plus très répandue en microélectronique et en électronique de puissance car elle constitue une partie fondamentale du transistor. Présentée dans la figure 3 ci-dessous, elle se compose d'un semi-conducteur, un isolant d'épaisseur  $d$ , le tout étant surmonté d'une électrode métallique dénommée grille.

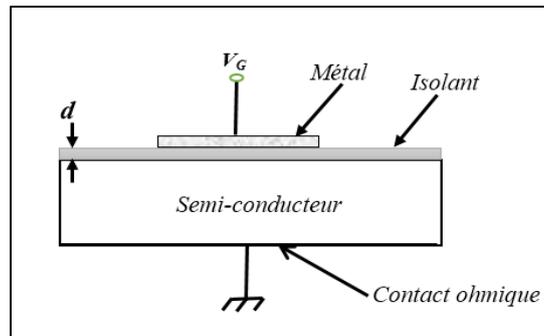


Figure 3: Structures Métal Isolant Semi-conducteur

## II- Concepts de base

### 1- Diagramme de bande

Le diagramme de bande de la structure MIS doit prendre en compte les niveaux de Fermi de chaque matériau, ainsi que l'effet du champ électrique sur les porteurs dans le semi-conducteur. Le schéma ci-dessous présente un diagramme de d'énergie détaillé d'une structure métal/isolant/semi-conducteur de type N.

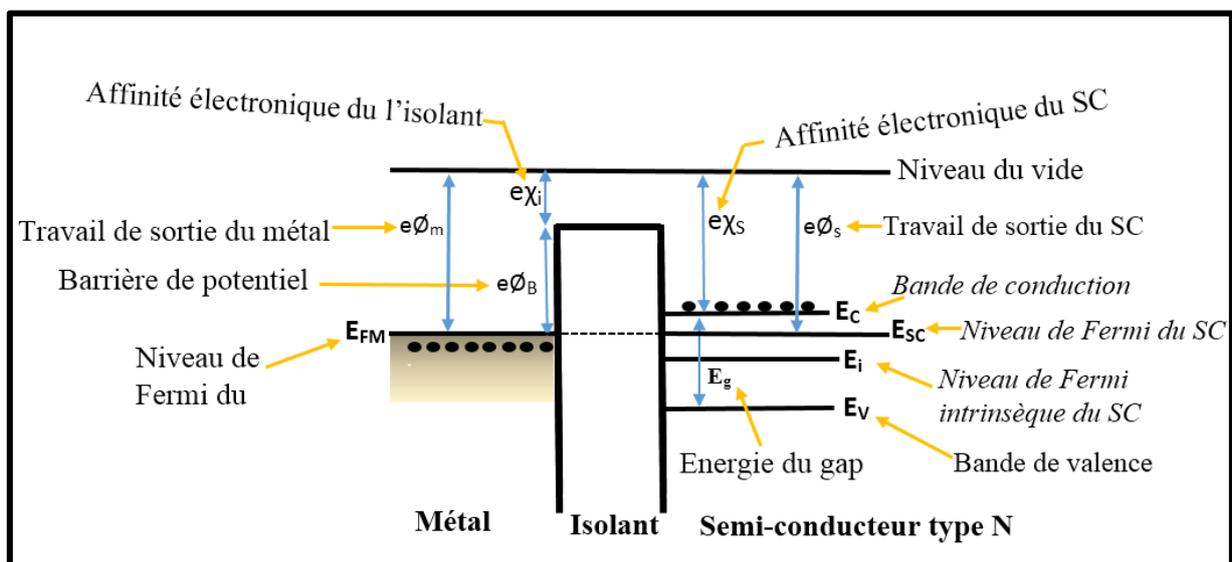


Figure 4: Diagramme détaillé de bande d'une structure MIS de type N

### a- Niveau de Fermi

Le niveau d'énergie le plus haut occupé par les électrons à 0 Kelvin est le niveau de Fermi.

### b- Travail de sortie

C'est l'énergie nécessaire pour arracher un électron depuis le niveau de Fermi du métal et l'amener dans le vide, cette énergie est appelée travail de sortie, on le notera  $e\phi_m$ .

### c- Affinité électronique

On définit le semi-conducteur par un autre paramètre qui est l'énergie qu'il faut fournir à un électron situé au bande de conduction, pour l'extraire du semi-conducteur et l'amener dans le vide, cette énergie est appelée affinité électronique, on la notera  $e\chi$ . On définit aussi cette énergie pour un isolant. Ce paramètre est une grandeur spécifique du semi-conducteur ou de l'isolant.

Ainsi, pour extraire un électron de conduction du métal et l'amener dans le vide, il faut lui fournir une énergie  $e\phi_m$ , pour extraire un électron de conduction du semi-conducteur et l'amener dans le vide il faut lui fournir une énergie  $e\chi$ . Imaginons que le métal et le semi-conducteur soient séparés par un intervalle très faible que l'on fait tendre vers une distance interatomique. Il faut fournir l'énergie  $e\phi_m$  pour extraire l'électron du métal. Cet électron restitue l'énergie  $e\chi$  en entrant dans le semi-conducteur.

Les tableaux ci-dessous donnent quelques valeurs des travaux de sortie et de l'affinité électronique pour les métaux et semi-conducteurs usuels [9].

#### *Métaux*

Métal	$e\phi_m$ (eV)
Li	2,3
Al	4,3
Fe	4,4
Au	4,8
Pt	5,3

Tableau 4: travail de sortie de quelques métaux

#### *Semi-conducteur*

SC	$e\chi_S$ (eV)
Si	4,01
Ge	4,13
GaAs	4,07
InP	4,38
GaN	4,1

Tableau 3: Affinité électronique de quelques semi-conducteurs

## 2- Contact ohmique : Contact SCHOTTKY

### a- Contact ohmique

Un contact ohmique est un contact métal-semi-conducteur avec une très faible résistance de contact. Il est dit ohmique lorsque le courant  $I$  est proportionnel à la

tension  $V$  avec un facteur de proportionnalité  $1/R_C$ . Quand le travail de sortie du métal est inférieur à celui du semi-conducteur, il en résulte que les électrons passent du métal vers le semi-conducteur, le système reste en évolution jusqu'à l'alignement des niveaux de fermi.

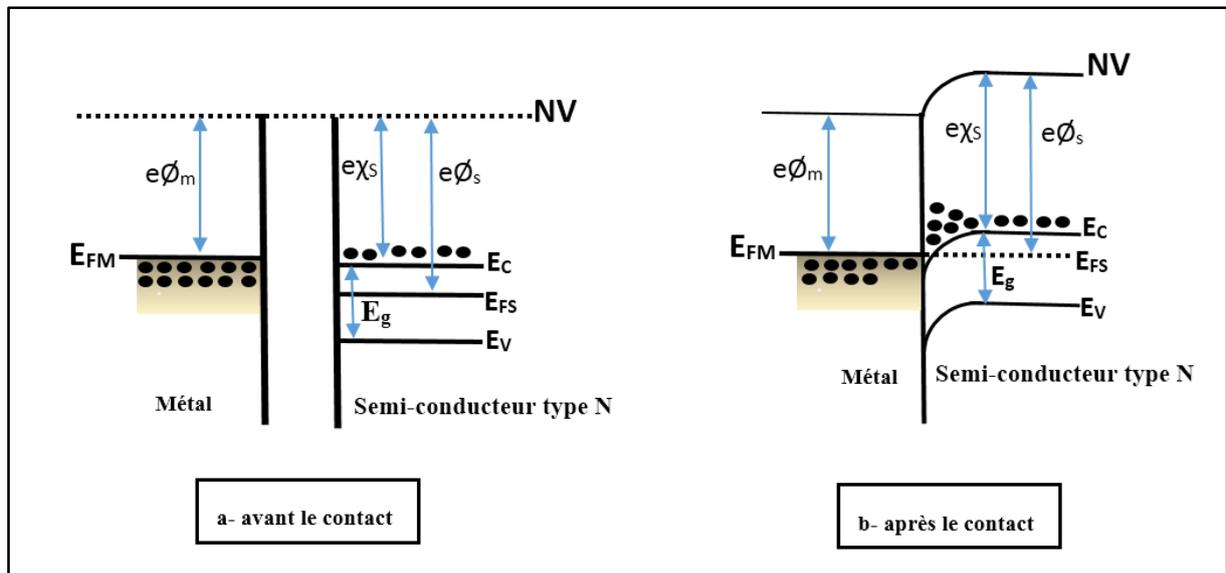


Figure 5: Contact métal semi-conducteur avec  $e\phi_m < e\phi_s$

D'après la figure 5-b ci-dessus nous observons que les électrons qui passent du métal vers le semi-conducteur font apparaître un manque des électrons dans le métal et une zone d'accumulation des électrons à l'interface dans le semi-conducteur.

Le contact ohmique sert à diminuer la résistance de contact entre le semi-conducteur et le métal, notons que pour réaliser un contact ohmique on sur-dope le semi-conducteur à l'interface, dans ce cas les porteurs traversent la barrière par effet tunnel.

### b- Contact SCHOTTKY

SCHOTTKY a établi le premier modèle pour décrire le contact métal semi-conducteur dans ce modèle, il s'établit au contact métal semi-conducteur une barrière du potentielle dite barrière de SCHOTTKY est donne par :

$$e\phi_B = e\phi_m - e\chi_s$$

Quand le travail de sortie du semi-conducteur étant inférieur à celui du métal, le système se stabilise à un régime d'équilibre définit par l'alignement des niveaux de fermi du métal et semi-conducteur.

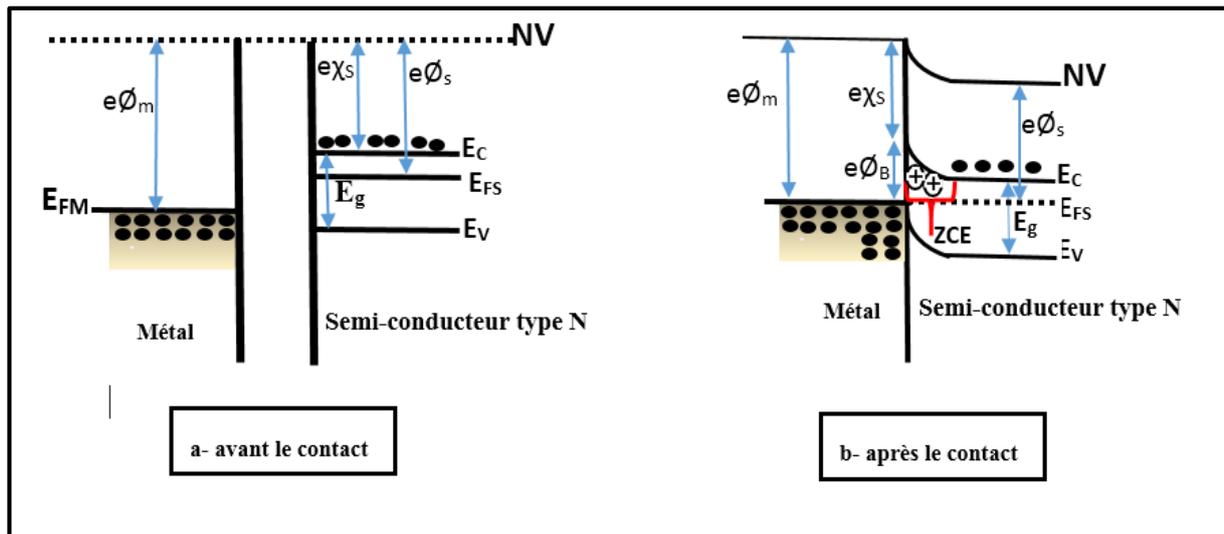


Figure 6: Contact métal semi-conducteur avec  $e\phi_m > e\phi_s$

D'après la figure 6 ci-dessus nous observons que Les électrons qui passent du semi-conducteur vers le métal entraînent une modification dans la structure, dans le semi-conducteur qui fait apparaître une formation d'une zone de charge d'espace ZCE à l'interface, et dans le métal il apparaît une zone d'accumulation des électrons à l'interface [9].

### III- Structure Métal/isolant/semi-conducteur (MIS) idéale

#### 1- Définition

Une structure MIS est dite idéale lorsque :

- Les travaux de sortie du métal ( $e\phi_m$ ) et du semi-conducteur ( $e\phi_s$ ) sont égaux, dans ces conditions, les niveaux de Fermi du métal de grille et du semi-conducteur sont alignés à l'équilibre thermodynamique.
- La résistivité de la couche isolante est infinie (pas de courant de fuite)
- Il n'existe pas de pièges à l'interface isolant/semi-conducteur ni à l'interface métal/isolant.

La structure MIS idéale n'existant pas dans la réalité, permet de décrire une interface avec de très bonnes propriétés électroniques.

#### 2- Régime d'équilibre thermodynamique

En absence de polarisation extérieure ( $V_G = 0$  et  $V_S = 0$ )

$$V_G = V_S + V_{OX} \quad (2.1)$$

$V_G$  : tension de la grille

$V_{OX}$  : tension de l'isolant

$V_S$  : tension du semi-conducteur

D'après la figure 7 ci-dessous, nous observons un régime de bande plate, les niveaux de Fermi du métal et du semi-conducteur sont alignés.

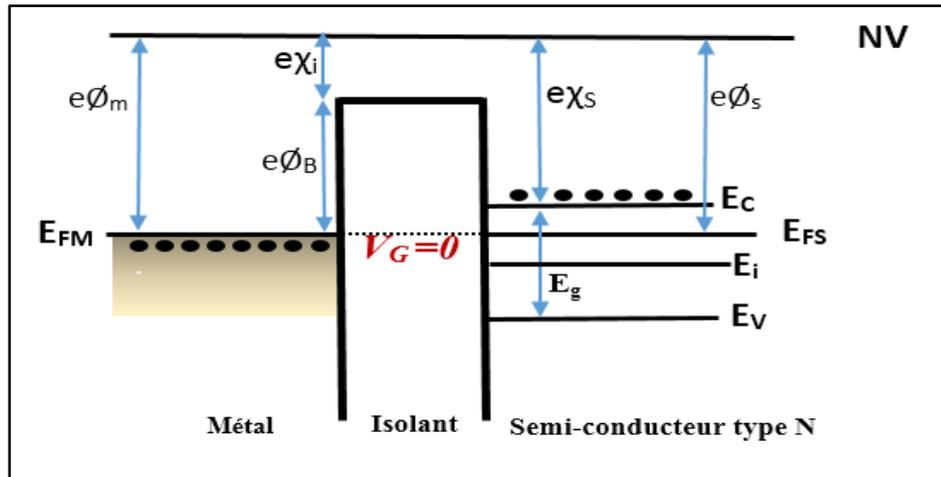


Figure 7: Diagramme de bande d'énergie  $V_G=0$

### 3- Régime d'accumulation

#### a- Densité de charge

En polarisant la structure avec une tension positive ( $V_G > 0$ ) le niveau du Fermi du semi-conducteur augmente par rapport au niveau du Fermi du métal entraînant une translation des niveaux d'énergie vers le haut, cette tension ( $V_G$ ) va créer un champ orienté dans la structure de la gauche vers la droite.

Les électrons du semi-conducteur sont soumis à une force orientée vers la gauche (coté isolant/semi-conducteur) : une zone d'accumulation des électrons se formera en surface du semi-conducteur, par ailleurs les trous du métal vont être soumis à une force orientée vers la droite (cf. figure 8 ci-dessous), nous aurons donc une zone d'accumulation des trous en surface métal/isolant, la figure (9) ci-dessous montre la densité de charge dans la structure.

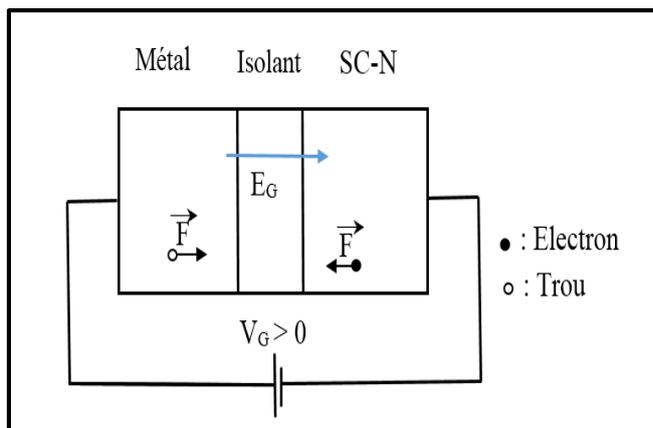


Figure 8: Structure MIS de type N polarisée positivement

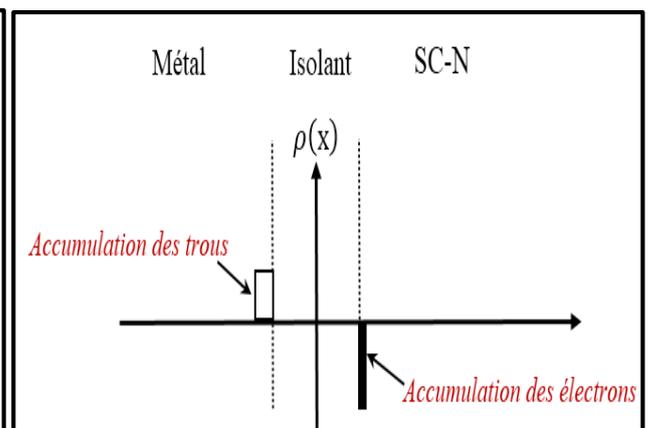


Figure 9: Densité de charge d'une structure MIS de type N en régime d'accumulation

## b- Diagramme de bande d'énergie

En régime d'accumulation ( $V_G > 0$  et  $V_S > 0$ ),  $V_S$  représente la tension de surface du semi-conducteur, la tension  $V_G$  crée une courbure des bande d'énergie à la surface du semi-conducteur (la bande de conduction s'approche du niveau du fermi du semi-conducteur  $E_{FS}$ ).

Au niveau de l'interface isolant/semi-conducteur, les bandes d'énergie se courbent vers le bas et plus on se rapproche de l'interface, plus la densité de électrons augmente (le semi-conducteur devient de plus en plus de type N localement), le diagramme des bandes d'énergie est donné sur la figure 10 ci-dessous.

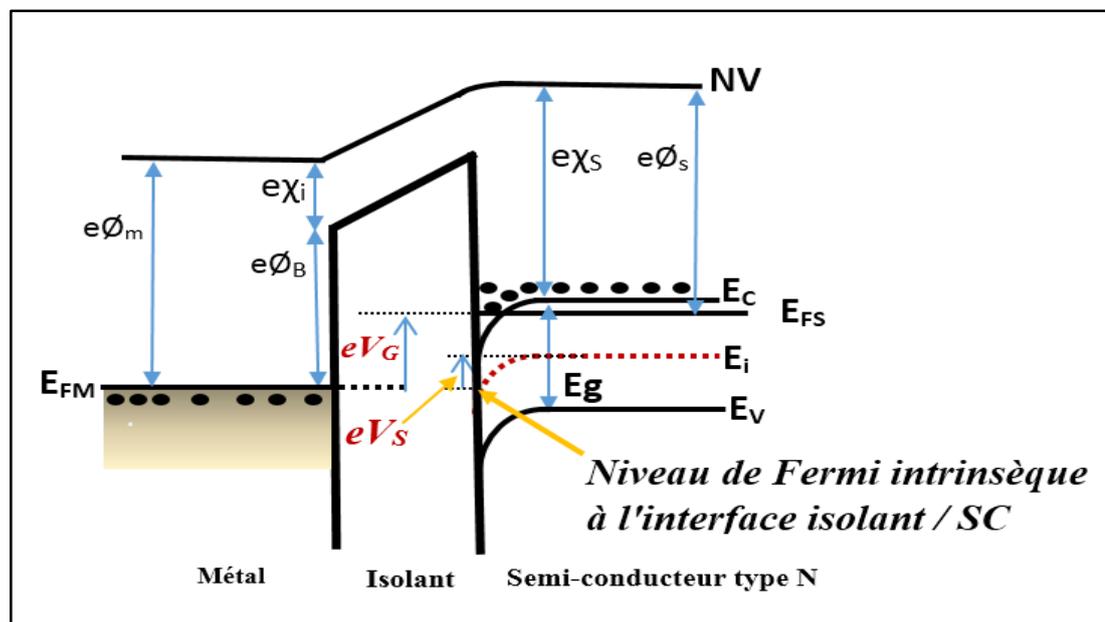


Figure 10: Diagramme des bandes d'énergie en régime d'accumulation

## 4- Régime de déplétion

### a- Densité de charge

En appliquant une tension négative, Un champ électrique est créé dans la structure, orienté de la droite vers la gauche, (cf. figure 12 ci-dessous). Les trous du métal du voisinage de l'interface vont subir une force orientée vers la gauche, ce départ des trous va créer une zone chargée négativement en surface métal, par ailleurs les électrons du semi-conducteur vont subir une force orientée vers la droite : une zone de charge d'espace apparait en surface du semi-conducteur. La figure 11 ci-dessous montre la densité de charge dans la structure.

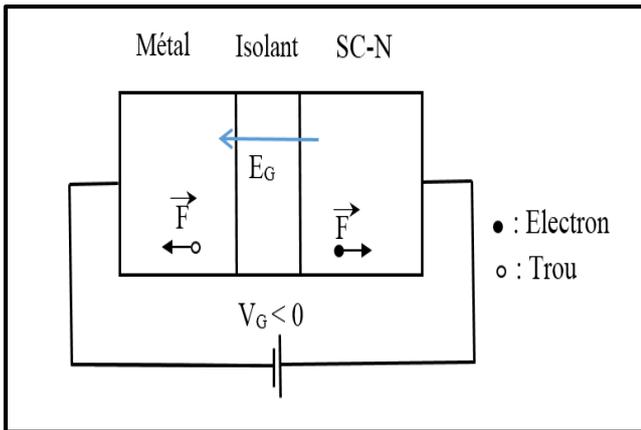


Figure 12: Structure MIS de type N polarisée négativement

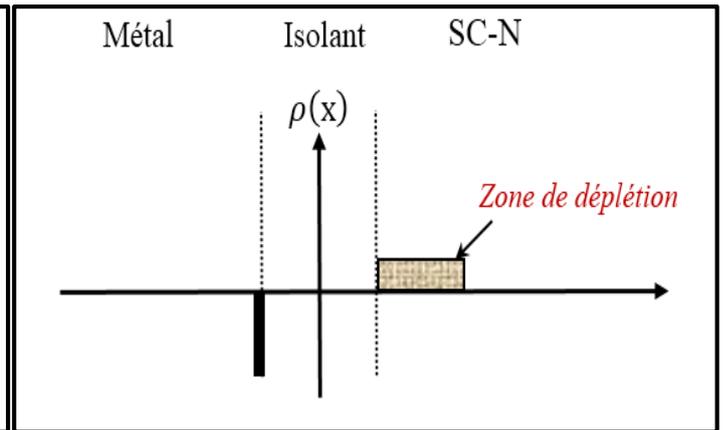


Figure 11: Densité de charge d'une structure MIS de type N en régime de déplétion

## b- Diagramme de bande d'énergie

Lorsque la tension  $V_G$  est comprise entre la tension de bande plate ( $V_{FB}=0$  dans le cas idéal) et la tension de seuil ( $V_{th}$  : seuil inversion) ( $V_{FB} > V_G > V_{th}$ ), le niveau du fermi du semi-conducteur diminue d'un facteur  $eV_G$  par rapport au niveau du fermi du métal

Pour une tension au niveau du semi-conducteur :  $-V_s < e\phi_{Fi}$ ,  $V_s$  négative avec :  $e\phi_{Fi}$  étant la différence de potentiel entre le niveau de Fermi du SC et le niveau de Fermi intrinsèque ( $e\phi_{Fi} = E_{FS} - E_i$ ). Au niveau de l'interface isolant/semi-conducteur les bandes d'énergie du semi-conducteur se courbent vers la haut il en résulte le repoussement des charges majoritaires loin de la surface, d'où zone de charge d'espace (ZCE) se crée, c'est le régime de déplétion (appelé aussi régime d'appauvrissement et ne comportant que des ions chargés positivement), le semi-conducteur est devenu moins de type N en surface (dû au départ des électrons). Le diagramme des bandes d'énergie est donné sur la figure (13) ci-dessous

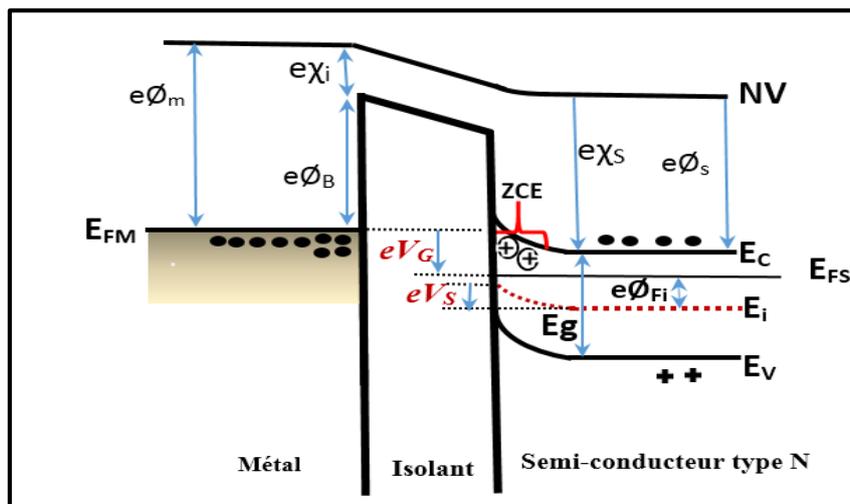


Figure 13: Diagramme des bandes d'énergie en régime de déplétion



On a donc deux zones de charge d'espace (coté semi-conducteur) chargées positivement : une zone de charge d'espace (zone de déplétion) dû aux atomes donneurs ionisés et une zone de charge d'accumulation des trous (couche d'inversion  $Q_{inv}$ ) dû à la génération thermique, ceci est résumé sur la figure 16 ci-dessous.

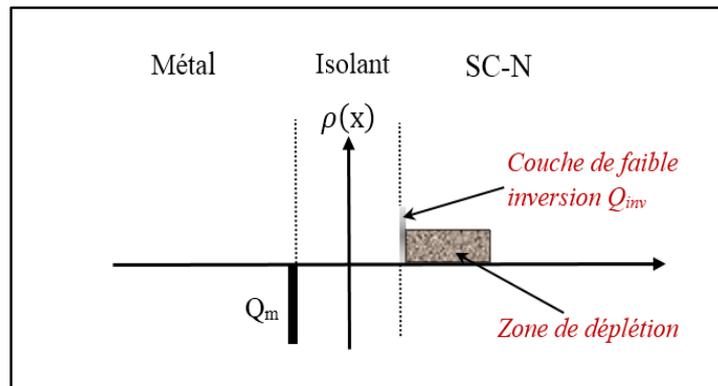


Figure 16: Densité de charge d'une structure MIS de type N en régime de faible inversion

## 5- Régime de forte inversion

### a- Densité de charge

Lorsque la tension de polarisation de grille inférieure à celle de seuil ( $V_G < V_{th}$ ), ( $-V_S > 2 e\phi_{Fi}$ ), la densité des trous devient plus important que celle des électrons, le semi-conducteur dans ce cas devient localement de type P, la figure 17 illustre la densité de charge dans la structure.

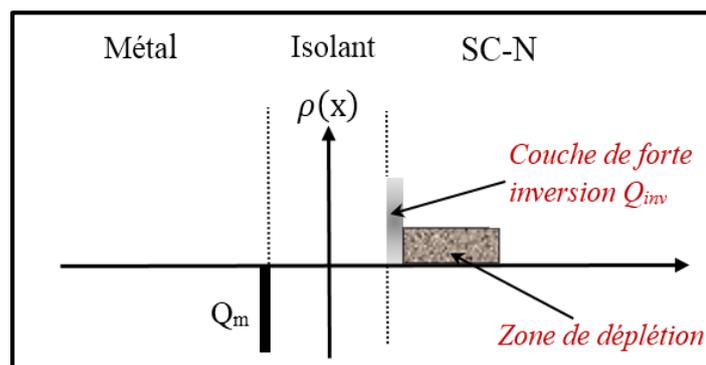


Figure 17: Densité de charge d'une structure MIS de type N en régime de forte inversion

## b- Diagramme de bande

D'après le diagramme de bande ci-dessous (cf. figure 18), on observe que les porteurs minoritaires s'accumulent à la surface, une couche d'inversion se forme à la surface du semi-conducteur, c'est le régime dit d'inversion.

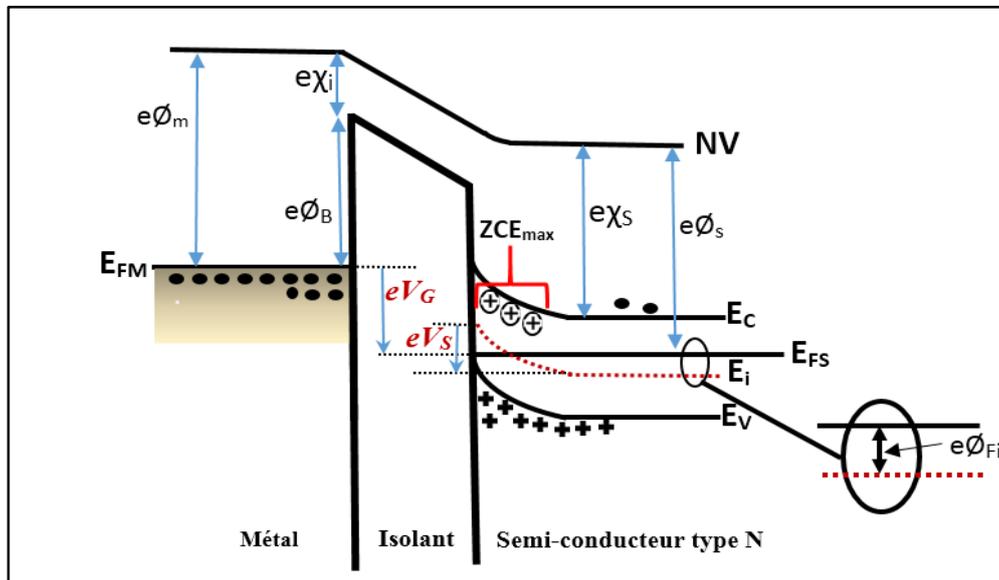


Figure 18: Diagramme de bande d'énergie en régime de forte inversion

La ZCE atteint son maximum  $W = W_{max}$  [9] :

$$W_{max} = \sqrt{\frac{2\epsilon_{sc}}{qN_D} 2e\phi_{Fi}} \quad (2.2)$$

$N_D$  : concentration de dopage de type N

## 6- Modélisation

En régime de déplétion, on considère que La charge de semi-conducteur vaut :  $Q_{sc} = -qN_dW + Q_{inv}$ , où  $W$  est la largeur de la zone de charge d'espace et  $Q_{inv}$  est la charge dû à l'accumulation des minoritaires (trous) en surface. Dans ce cas On peut négliger la charge due à l'accumulation des trous en surface. La charge de semi-conducteur est donc due uniquement à la zone de déplétion.  $Q_{sc} = -qN_dW$  [10].

## 7- Résumé

On conclut cette partie par un petit résumé pour les différents régimes d'une structure MIS.

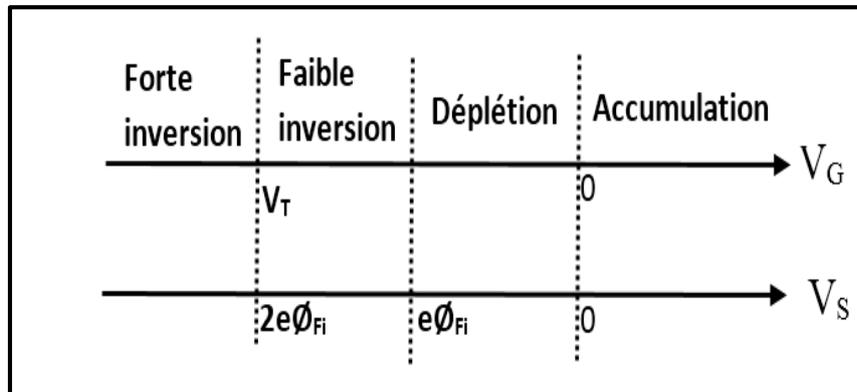


Figure 19; Différents régimes en fonction de la tension appliquée (\$V\_G\$) et de la chute de potentiel dans le semi-conducteur (\$V\_S\$).

## IV- Capacité de la structure

### 1- Capacité de semi-conducteur :

- ❖ Les concentrations des électrons et trous s'écrivent :

$$n_n = n_{n0} e^{\beta V_S} \quad (2.3)$$

$$p_n = p_{n0} e^{-\beta V_S} \quad (2.4)$$

Avec : \$n\_{n0}\$ et \$p\_{n0}\$ les densités des électrons et les trous en équilibre

Avec  $\beta = \frac{q}{kT}$

- ❖ L'équation de Poisson s'écrit :

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_S} \quad (2.5)$$

\$\rho(x)\$ : La densité totale de charge d'espace dans le semi-conducteur qui s'exprime par :

$$\rho(x) = q(N_D^+ - N_A^- + p_n - n_n) \quad (2.6)$$

Avec :

\$N\_D\$ : concentration de dopage de type N

\$N\_A\$ : concentration de dopage de type P

❖ Pour un semi-conducteur en équilibre thermodynamique :

$$N_D^+ - N_A^- = n_{n0} - p_{n0} \quad (2.7)$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_S} (n_{n0} - p_{n0} + p_n - n_n) \quad (2.8)$$

D'après (2.3) et (2.4) on obtient :

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_S} (n_{n0} - p_{n0} + p_{n0} e^{-\beta V_S} - n_{n0} e^{\beta V_S}) \quad (2.9)$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{q n_{n0}}{\epsilon_S} \left( 1 - e^{\beta V_S} - \frac{p_{n0}}{n_{n0}} (1 - e^{-\beta V_S}) \right) \quad (2.10)$$

En multipliant chaque côté par  $2 \frac{dV_S}{dx}$  et en intégrant depuis la surface et jusque dans le volume on obtient le champ électrique à la surface du semi-conducteur  $E_S$  donne en fonction du potentielle de surface  $V_S$

$$E_S = -\frac{dV_S}{dx} = \text{sign}(V_S) \sqrt{\frac{2KTn_{n0}}{\epsilon_S}} \left\{ e^{\beta V_S} - \beta V_S - 1 + \frac{p_{n0}}{n_{n0}} (e^{\beta V_S} + \beta V_S - 1) \right\}^{1/2} \quad (2.11)$$

Avec :  $L_D = \sqrt{\frac{KT \epsilon_S}{q^2 n_{n0}}}$

❖ A partir du Théorème de Gauss on obtient :

$$Q_{SC} = -\epsilon_S E_S = -\text{sign}(V_S) \sqrt{2KTn_{n0}\epsilon_S} \left\{ e^{\beta V_S} - \beta V_S - 1 + \frac{p_{n0}}{n_{n0}} (e^{-\beta V_S} + \beta V_S - 1) \right\}^{1/2} \quad (2.12)$$

❖ La capacité du semi-conducteur est donnée par :

$$C_{SC} = \frac{\partial Q_{SC}}{\partial V_S} = \frac{\epsilon_S}{\sqrt{2} L_D} \frac{\left( e^{\beta V_S} - 1 + \frac{p_{n0}}{n_{n0}} (1 - e^{-\beta V_S}) \right)}{\left\{ e^{\beta V_S} - \beta V_S - 1 + \frac{p_{n0}}{n_{n0}} (e^{-\beta V_S} + \beta V_S - 1) \right\}^{1/2}} \quad (2.13)$$

✓ La capacité de bande plate ( $C_{FB}$ )  $V_S=0$

En faisant le développement limité pour l'exponentielle on aura :

$$e^{\beta V_S} = 1 + \beta V_S + \frac{(\beta V_S)^2}{2} \quad (2.14)$$

$$C_{SC} = \frac{\epsilon_S}{\sqrt{2} L_D} \frac{(1+\beta V_S-1)}{\left\{1+\beta V_S+\frac{(\beta V_S)^2}{2}-\beta V_S-1\right\}^{1/2}} \quad (2.15)$$

On obtient :

$$C_{FB} = \frac{\epsilon_S}{L_D} \quad (2.16)$$

❖ L'effet de la fréquence sur la  $C_{SC}$

✓ Basse fréquence

Les porteurs minoritaires (trous) peuvent suivre le signal, il en résulte que ces porteurs peuvent atteindre la couche d'inversion et forment une inversion région à l'interface isolant/semi-conducteur.

$$C_{SC} = \frac{\epsilon_S}{\sqrt{2} L_D} \frac{\left(e^{\beta V_S}-1+\frac{p_{n0}}{n_{n0}}(1-e^{-\beta V_S})\right)}{\left\{e^{\beta V_S}-\beta V_S-1+\frac{p_{n0}}{n_{n0}}(e^{-\beta V_S}+\beta V_S-1)\right\}^{1/2}} \quad (2.17)$$

✓ Haute fréquence

Lorsque le signal a.c est élevé, les porteurs minoritaires ( $p_{n0}$ ) n'ont pas le temps de répondre au signal appliqué alors ils ne peuvent pas atteindre la couche d'inversion à l'interface isolant/semi-conducteur.

Dans ce cas les porteurs minoritaire ( $p_{n0}$  : trous) seront négligeable devant les porteurs majoritaire ( $n_{n0}$  : électrons). La capacité de semi-conducteur devient :

$$C_{SC} = \frac{\epsilon_S}{\sqrt{2} L_D} \frac{(e^{\beta V_S}-1)}{\left\{e^{\beta V_S}-\beta V_S-1\right\}^{1/2}} \quad (2.18)$$

## 2- Capacité de l'isolant :

On définit la capacité de l'isolant par :

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d} \quad (2.19)$$

### 3- Capacité total

On obtient La capacité totale en associant en série la capacité de semi-conducteur et celle de l'isolant  $C_{OX}$  :

$$C_T = \frac{C_{ox} * C_{SC}}{C_{ox} + C_{SC}} \quad (2.20)$$

### 4- Caractéristique C-V théorique pour une structure MIS

La figure ci-dessous montre la description complète de la courbe capacité tension ( $C- V_G$ ) de la structure métal/isolant/semi-conducteur (MIS) théorique.

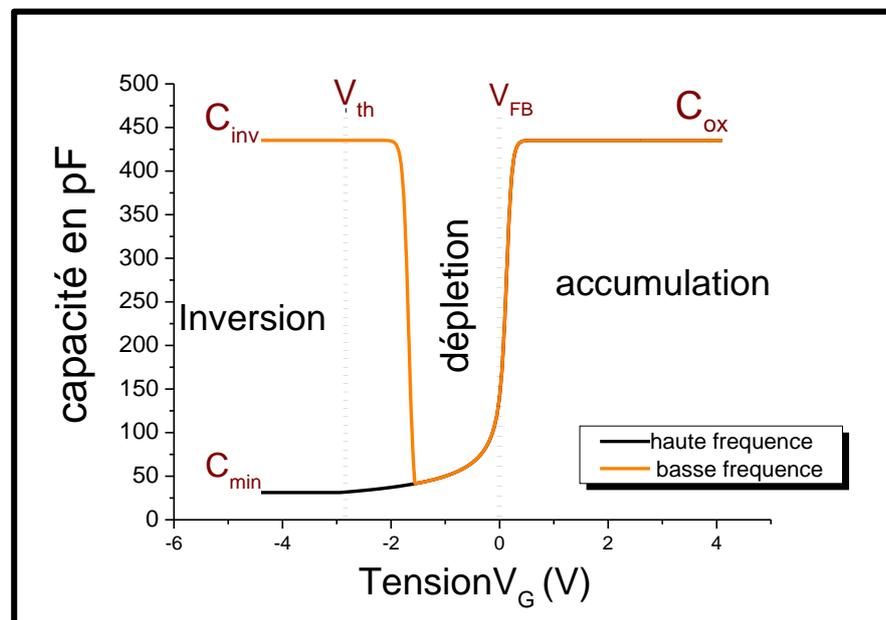


Figure 20: Caractéristique C-V théorique pour une structure MIS sur un semi-conducteur type N

- Régime d'accumulation : dans ce cas la charge des porteurs majoritaire devient très importante, d'où l'augmentation de la valeur de la capacité du semi-conducteur qui devient extrêmement grande, donc La capacité totale atteint la capacité de l'isolant.
- Régime déplétion : En régime de déplétion ( $V_{FB} > V_G > V_{th}$ ), une zone de charge d'espace se crée en surface, elle se traduit par une décroissance de la capacité totale mesurée

- Régime d'inversion : En régime d'inversion ( $V_G < V_{th}$ ), on considère deux cas.
  - ✓ pour un signal a.c basse fréquence, les charges minoritaires dans le semi-conducteur ont le temps de répondre au signal appliqué ce qui laisse ces porteurs d'atteindre la couche d'inversion et forment une inversion région à l'interface isolant/semi-conducteur, on observe alors une augmentation de la capacité totale qui atteint la capacité de l'isolant ( $C_{inv} = C_{acc} = C_{ox}$ ).
  - ✓ Lorsque la fréquence du signal a.c est élevée, les porteurs minoritaires ne peuvent pas suivre le signal appliqué, il en résulte que les porteurs ne peuvent pas atteindre la couche d'inversion à l'interface isolant/semi-conducteur, on observe alors une stagnation de la capacité totale, elle est égale à la capacité minimale ( $C_{min}$ ) [11].

## V- Structure MIS réelle

### 1- Définition

La structure MIS réelle s'écarte du comportement idéal car l'oxyde contient à la fois les états d'interface  $Q_{it}$ , les charges fixes  $Q_f$ , et les charges mobiles  $Q_m$  qui peuvent réduisent les performances des composants électroniques (transistors, diodes, etc.) et affectent leur fiabilité et leur stabilité. Par ailleurs, la différence de travaux de sortie métal–semi-conducteur devient non nulle, impliquant une déviation des bandes à l'interface. La figure 21 illustre les différents de charge dans l'isolant  $SiO_2$ .

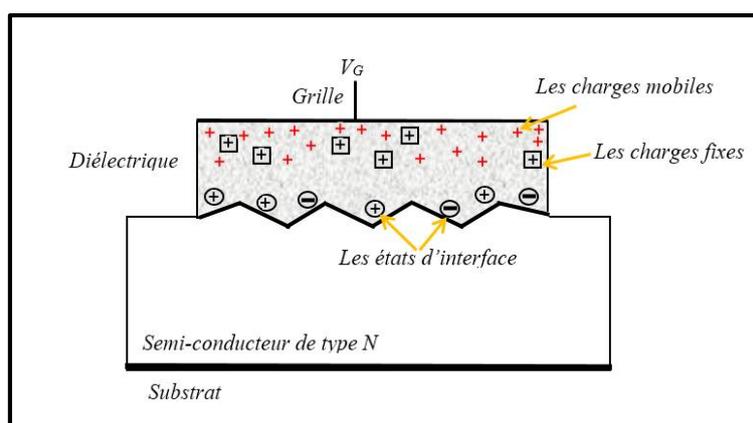


Figure 21: Pièges électroniques présent dans la couche diélectrique et à l'interface isolant/semi-conducteur

### **a- les états d'interface**

T. SchoKley [11] et autres ont montré que les états d'interface existent à l'intérieur de la bande interdite du fait de l'interruption (discontinuité) de la structure de réseau périodique cristallin entre le semi-conducteur et l'isolant. Un piège d'interface est considéré comme un donneur s'il peut devenir neutre ou positif en donnant un électron, ainsi il peut être considéré accepteur si elle peut devenir neutre ou négatif en acceptant un électron [11].

Les charges d'état d'interface  $Q_{it}$  sont responsables du décalage de la courbe  $C(V_G)$  par rapport à la courbe idéale, [12].

### **b- Les charges mobiles**

Les charges mobiles sont des ions présents dans la couche diélectrique et qui réagissent au signal électrique appliqué sur la grille. Ils se manifestent sur les caractéristiques électriques sous forme d'hystérésis [2].

### **c- Les charges fixes**

Les charges fixes sont des charges aussi présentes dans la couche diélectrique. Ces charges peuvent introduire dans le diélectrique au cours du procédé de dépôt. La principale influence de ces charges est le décalage de la tension de bande plate ( $V_{FB}$ ) [2].

## **VI- Méthode de Terman**

### **1- Introduction**

La concentration totale de pièges à l'interface ou la densité d'états d'interface en fonction de l'énergie dans la bande interdite ( $D_{it}$  [états/cm<sup>2</sup> eV]) est très sensible aux conditions de fabrication des dispositifs et varie d'un dispositif à l'autre [13].

### **2- Propriété des états d'interface.**

La densité d'états d'interface, notée  $N_{ss}$  ou  $D_{it}$ , représente le nombre de défauts électriquement actifs par unité de surface et d'énergie (eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>) situés à l'interface isolant/semi-conducteur. Ces défauts sont susceptibles de capturer ou de réémettre des porteurs [8]. Leur densité est mesurable à l'aide de la méthode haute fréquence (Terman).

### **3- Effet des états d'interface sur la courbe C-V**

La mesure de la capacité de la structure MIS permet de rendre compte des défauts au niveau de l'interface isolant/semi-conducteur, parce que l'occupation des états d'interface varie avec une tension de polarisation appliquée à la grille ( $V_G$ ). Ceci se traduit par une déformation de la caractéristique C-V

D'après la loi de Gauss on peut obtenir le décalage (stretch out) [12].

$$C_{ox}(V_G - V_S) = -Q_{it}(V_S) - Q_{SC}(V_S) \quad (2.21)$$

Avec  $C_{ox}$  : capacité de l'isolant par unité de surface,  $V_G$  tension de polarisation de grille  $V_S$  : tension de semi-conducteur,  $Q_{it}$  charge des états d'interface par unité de surface and  $Q_{SC}$  charge de surface de semi-conducteur par unité de surface

Pour un petit changement dans la tension de grille  $dV_G$ , il aura aussi un changement dans la tension de semi-conducteur avec  $dV_S$  donc (2.21) devient

$$C_{ox}(dV_G - dV_S) = -dQ_{it}(V_S) - dQ_{SC}(V_S) \quad (2.22)$$

On a :

$$C_{it}(V_S) = -\frac{dQ_{it}}{dV_S}$$

$$C_{SC}(V_S) = -\frac{dQ_{SC}}{dV_S}$$

Avec  $C_{it}$  et  $C_{SC}$  ce sont les capacités des états d'interfaces et du semi-conducteur par unité de surface respectivement [12].

#### 4- Capacité d'états d'interface

En basse fréquence la capacité de la structure MIS est définie par :

$$C_{LF} = \frac{dQ_T}{dV_G} \quad (2.23)$$

Avec  $Q_T$  la charge totale  $Q_T = -(Q_{SC} + Q_{it})$

Par la combinaison (2.22) et (2.23) on obtient :

$$C_{LF} = \frac{dQ_T}{dV_S} \cdot \frac{dV_S}{dV_G} \quad (2.24)$$

$$C_{LF} = (C_{SC} + C_{it}) \frac{C_{ox}}{C_{ox} + C_{SC} + C_{it}} \quad (2.25)$$

L'équation (2.25) montre que l'introduction de la capacité des états d'interface va augmenter la capacité  $C_{LF}$

Tous les états de surface ne vont pas répondre au signal alternatif. Seuls les défauts d'interface qui peuvent capturer les électrons dans la période de la tension alternative  $V_G$  vont répondre au signal, par conséquent  $C_{it}$  devient en fonction du  $\omega$ , donc  $\omega \rightarrow \infty \leftrightarrow C_{it}(\omega) \rightarrow 0$ , qui est pour les hautes fréquences, les états d'interface ne répond pas au signal alternatif, par conséquent, à haut fréquence la capacité mesurée est équivalente aux défauts situés à l'interface isolant semi/conducteur à cause de la discontinuité du réseau cristallin du semi-conducteur [12].

## 5- Méthode de haute fréquence (méthode de Terman)

Cette méthode est proposée par Terman en 1962, utilise des mesures de capacité à haute fréquence pour déterminer la densité d'état d'interface. Dans cette méthode la fréquence utilisée pour mesurer la capacité en fonction de la tension de polarisation  $V_G$  soit suffisamment élevée pour que les états d'interface ne puissent pas répondre au signal alternatif.

La méthode de Terman utilise la comparaison entre la caractéristique théorique d'une structure MIS idéale et celle de la structure MIS réelle.

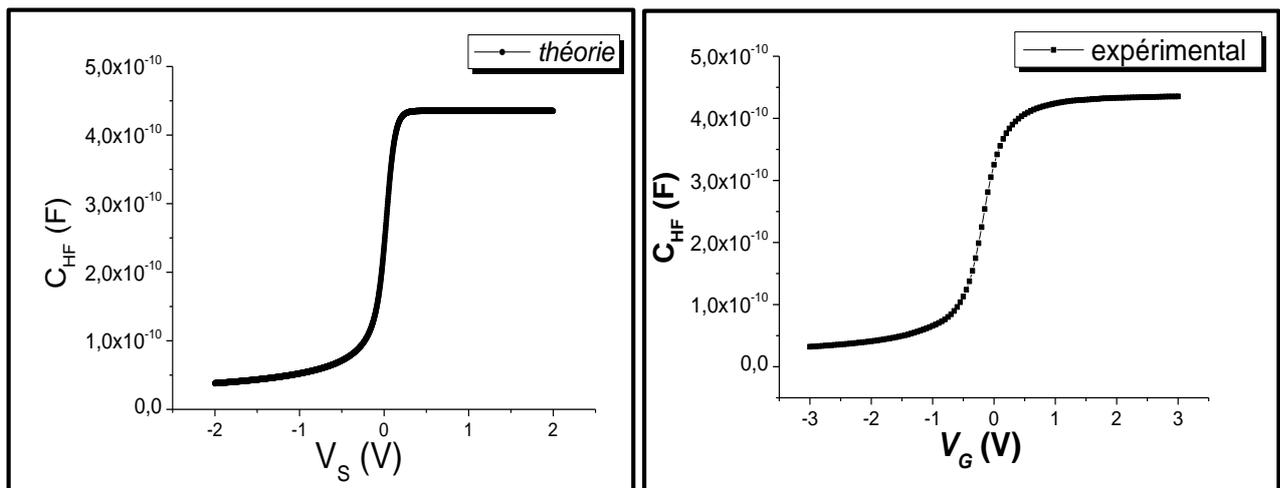


Figure 22: Caractéristique capacité-tension théorique (gauche) et réelle (droite)

Il faut d'abord déterminer la relation entre le potentiel de surface  $V_S$  et la tension de polarisation  $V_G$ . Pour cela, pour chaque  $V_S$  on calcule la capacité théorique  $C(V_S)$  et à partir de la courbe expérimentale on détermine la tension  $V_G$  nécessaire pour que la capacité de la structure soit égale à  $C(V_S)$ . Ensuite point par point on trace la caractéristique  $V_S(V_G)$ , la figure 23 ci-dessous représente la tension du semi-conducteur ( $V_S$ ) en fonction de tension de polarisation de grille  $V_G$ , déduite par la méthode de Terman.

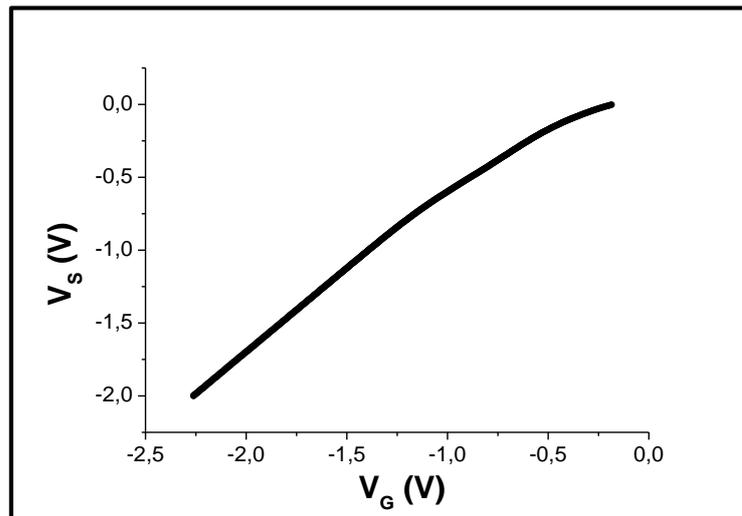


Figure 23: Caractéristique  $V_s(V_G)$  obtenu par la technique de Terman

Une fois en déterminant la caractéristique  $V_s(V_G)$ , en calculant le dérivé de  $V_s$  par rapport à  $V_G$ . Ensuite D'après (2.22) la capacité d'état d'interface est donnée par [14].

$$C_{it}(V_s) = C_{ox} \left[ \left( \frac{dV_s}{dV_G} \right)^{-1} - 1 \right] - C_{SC}(V_s) \quad (2.26)$$

La densité d'état d'interface est donnée par [12].

$$D_{it}(V_s) = \frac{C_{it}}{q} \quad (2.27)$$

## VII- Conclusion

Ce chapitre se présente en 3 parties. Dans la premier partie, nous avons introduit les concepts fondamentaux liés à ce projet (travail de sortie niveau de fermi ...). Ainsi nous avons défini et décrit le fonctionnement de la structure MIS idéale pour différentes polarisations de grille  $V_G$ , une étude détaillée pour la capacité de structure ensuite nous avons présenté la caractéristique capacité-tension d'une structure MIS théorique, la deuxième partie est dédiée au structure MIS réelle, la troisième partie est consacrée à expliquer la méthode de Terman.

# Chapitre3 : Résultats expérimentaux et analyse

## I- Introduction

Dans cette partie, nous allons présenter le but de ce travail qui est l'analyse des défauts à l'interface isolant/semi-conducteur des transistors MOS par la méthode de Terman. Pour cela nous nous intéresserons aux résultats obtenus par les mesures de capacité-tension  $C(V_G)$  pour différentes fréquences que nous avons obtenu de l'université de Sherbrooke Canada (groupe GaN) afin d'appliquer la technique de Terman (méthode haute fréquences).

La densité d'états d'interface (Dit) du semi-conducteur GaN rapportée dans la littérature est généralement élevée (de l'ordre de  $10^{11} - 10^{13} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) [15].

## II- Résultats de la capacité-tension pour 1MHz

Les mesures de capacité  $C(V_G)$  à 1 MHz sont d'un grand intérêt pour l'étude des structures MIS car elles permettent l'évaluation de grandeurs telles que la densité d'états d'interface, la capacité de l'isolant, l'épaisseur de l'oxyde la tension de bande plate, la tension de seuil ...

### 1- Caractéristique capacité-tension $C(V_G)$

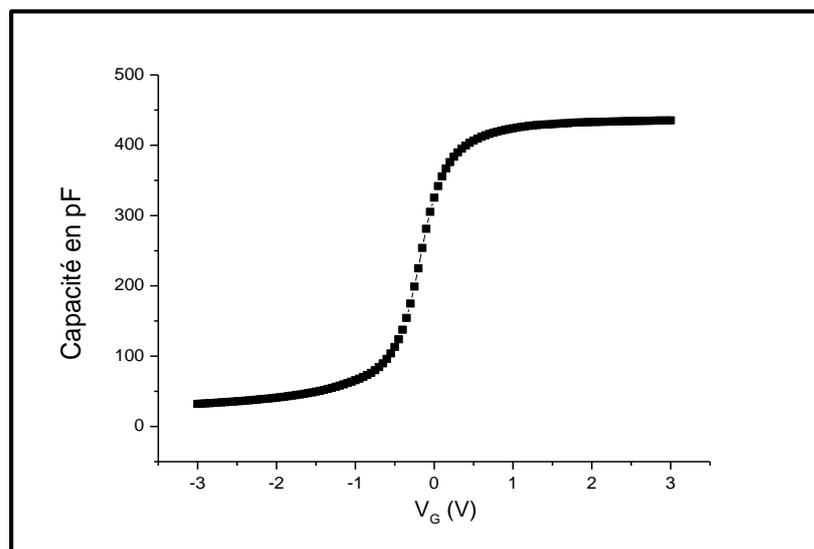


Figure 24: Caractéristique capacité tension 1MHz

La figure 24 ci-dessus illustre les mesures  $C(V_G)$  de la capacité pour un échantillon de type N pour une fréquence d'1 MHz et une épaisseur de l'isolant de 15.2 nanomètre et un dopage de GaN= $1.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  en comparaison avec la courbe  $C(V)$  calculée théoriquement avec Matlab cf. figure 25 ci-dessous. La

courbe théorique représente le cas idéal pour une densité d'état d'interface ( $D_{it}$ ) nulle.

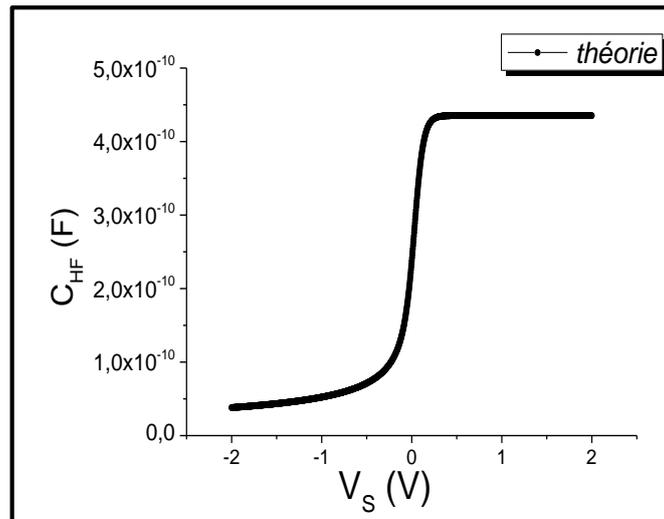


Figure 25: Caractéristique capacité-tension théorique

## 2- Caractéristique $V_S(V_G)$

À partir de la courbe expérimentale et celle de théorique nous avons obtenu la caractéristique  $V_S(V_G)$ .

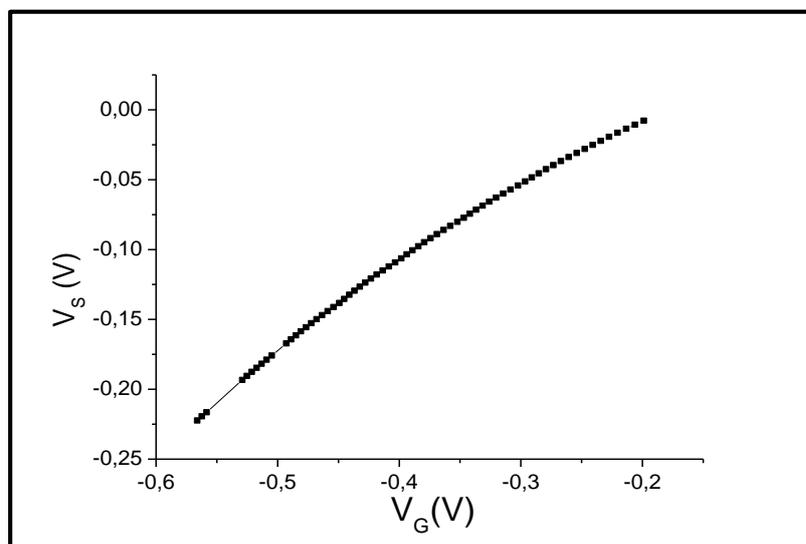


Figure 26: Variation du potentiel  $V_S$  en fonction de  $V_G$  1MHz

La figure 26 ci-dessus montre la variation du potentiel de surface  $V_S$  en fonction de la tension de grille  $V_G$ . Pour des tensions  $V_G$  allant de -0,57 à -0,2 Volt,  $V_S$  varie de -0,22 à -0,001 Volt. Cette caractéristique nous permet d'obtenir les densités d'états d'interface  $D_{it}$  qui seront reportées par la suite.

### 3- Densité d'état d'interface pour 1MHz

#### a- Echantillon n°1

Les figures (27) ci-dessous illustre la densité d'états d'interface obtenue pour Le Premier échantillon qui est caractérisé par une épaisseur de l'isolant de 15.2 nanomètre et un dopage de GaN= $1.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Pour obtenir l'échelle des énergies dans la figure 27 ci-dessous à partir du potentielle  $V_S$  on utilise la relation [12].

$$E_C - E_T = \frac{E_g}{2} - qV_S - e\phi_{Fi} \quad (3.1)$$

Où  $e\phi_{Fi}$  étant la différence de potentielle entre le niveau de Fermi du SC et le niveau de Fermi intrinsèque ( $e\phi_{Fi} = E_{FS} - E_i$ ).

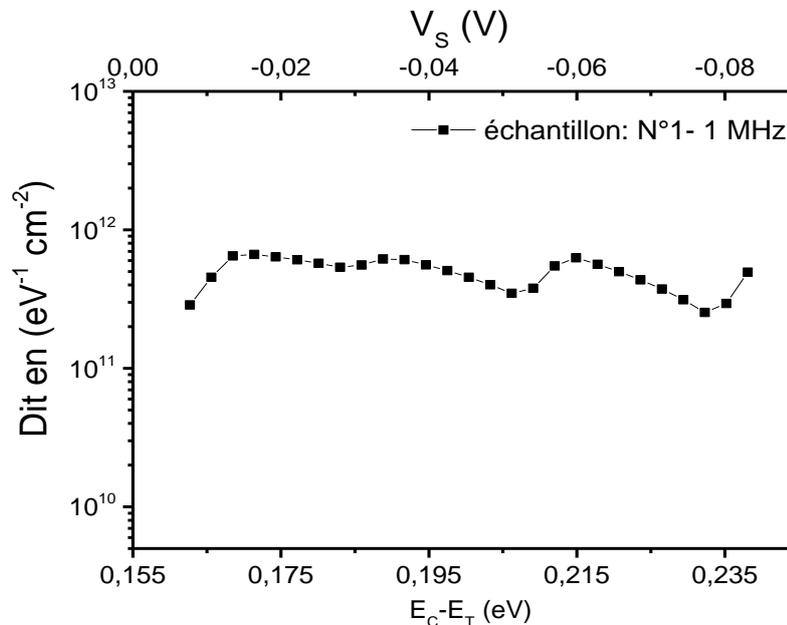


Figure 27: Densité d'état d'interface de l'échantillon 1 avec  $f=1\text{MHz}$  en fonction de la tension du SC et l'énergie

D'après la figure 27 ci-dessus nous avons obtenu les valeurs de Dit en fonction de la tension du semi-conducteur et de la position énergétique en dessous du minimum de la bande de conduction, nous observons que la densité d'état d'interface a un minimum de  $2.5 \times 10^{11}$  autour de 0.23 eV en dessous de  $E_C$  et un maximum de  $6.65 \times 10^{11}$  autour de 0.17 eV en dessous de  $E_C$ .

### b- Echantillon n°2 et n°3

Ces deux autres échantillons sont caractérisés par une épaisseur de l'isolant de 20 nanomètre et un dopage de GaN égal  $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .

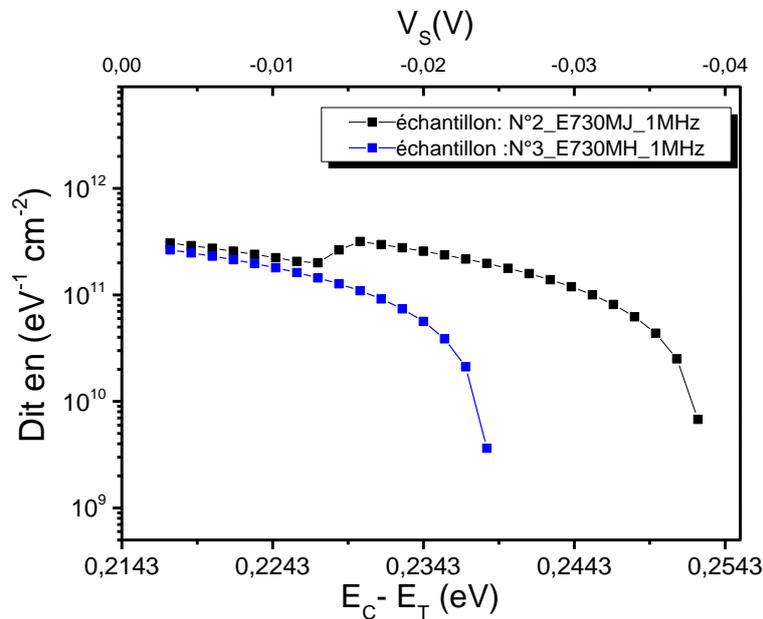


Figure 28: Densité d'état d'interface de l'échantillon 2 et 3 avec  $f=1\text{MHz}$  en fonction de la tension du SC ( $V_S$ ) et l'énergie ( $E_C - E_T$ )

D'après la figure 28 ci-dessus nous avons obtenu les valeurs de Dit en fonction la tension de semi-conducteur et de la position énergétique en dessous du minimum de la bande de conduction pour les deux échantillons de GaN.

L'échantillon 2 : E730MJ\_1MHz montre un minimum de  $6.78 \times 10^9$  autour de 0.25eV en dessous de  $E_C$  et un maximum de  $3.16 \times 10^{11}$  autour de 0.23 eV en dessous de  $E_C$ ,

L'échantillon 3 : E730MH\_1MHz a un minimum de  $3.63 \times 10^9$  autour de 0.2385eV en dessous de  $E_C$  et un maximum de  $2.64 \times 10^{11}$  autour de 0.21 eV en dessous de  $E_C$ .

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenu pour ces échantillons (2 et 3)

échantillons	$Dit (10^{10} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2})$
échantillons 2 : E730MJ_1MHZ	0,678 – 31,6
échantillons 3 : E730MH_1MHZ	0,363 – 26,4

Tableau 5: Résultats de densité d'états d'interface Dit pour l'échantillon 2 (E730MJ\_1MHz) et 3 (E730MH\_1MHz)

### III- Comparaison des résultats pour différence fréquence

#### 1- Caractéristique capacité tension $C(V_G)$

A titre de comparaison nous allons s'intéresser au premier échantillon qui est caractérisé par une épaisseur de l'isolant de 15.2 nanomètre et un dopage de GaN= $1.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  en changeant la fréquence, la figure 29 ci-dessous illustre la caractéristique capacité-tension pour les fréquences 1 MHz, 500 kHz, 100 kHz, et 10 KHz.

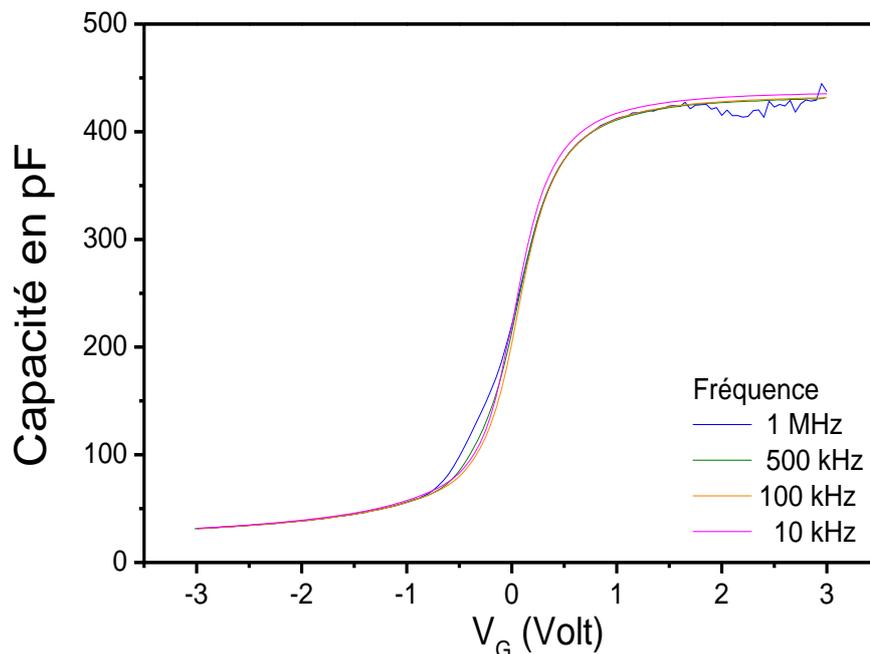


Figure 29: Caractéristique capacité-tension réelle pour plusieurs fréquences

#### 2- Densité d'état d'interface

Nous avons calculé ces densités d'états d'interfaces à partir des mesures fréquentielles différences (1MHz, 500kHz, 100kHz, 10kHz), la valeur de  $C_{ox}$  (capacité de l'isolant) étant la même valeur pour toutes les différentes fréquences.

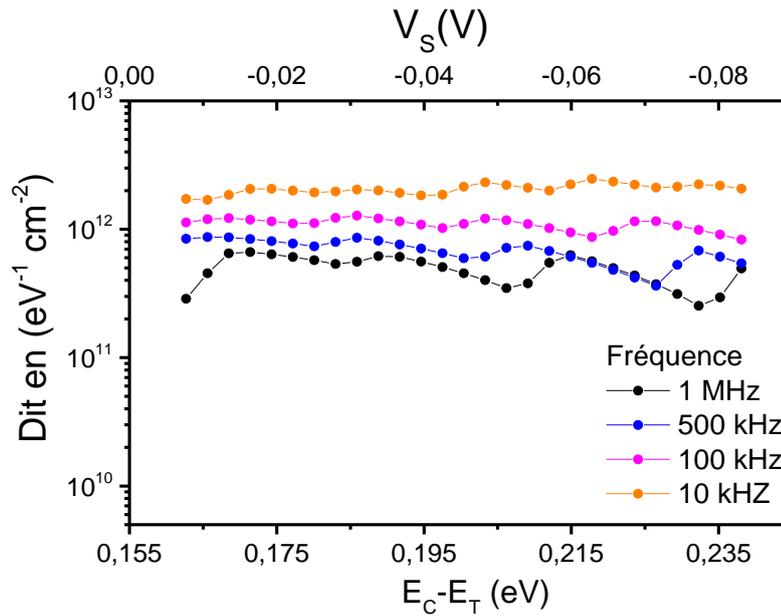


Figure 30: Densités d'état d'interface  $D_{it}$  pour plusieurs fréquences en fonction de la tension de SC ( $V_s$ ) et l'énergie ( $E_C - E_T$ )

### 3- Comparaison des résultats

D'après la figure 30 ci-dessus nous avons obtenu les valeurs de  $D_{it}$  pour différentes fréquences en fonction de la tension de semi-conducteur et de la position énergétique en dessous du minimum de la bande de conduction, nous observons que la densité d'état d'interface varie fonction de la fréquence : En effet parfois, la densité d'états d'interface qui arrivent à suivre le signal alternatif peut être non négligeable.

### IV- Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les résultats de l'estimation des défauts obtenus par l'utilisation de la technique du Terman de 3 échantillons avec une fréquence d'1 MHz, ensuite nous faisons une estimation de la densité d'états d'interfaces de l'échantillon n°1 en changeant la fréquence et nous observons l'effet de la fréquence sur la densité d'état d'interface  $D_{it}$ , le tableau 6 ci-dessous illustre l'intervalle de variation de  $D_{it}$  pour la fréquence correspondante.

Fréquence (kHz)	$D_{it}$ ( $10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ )
1000	2.5-6.65
500	3.63-8.7
100	8.3-12.7
10	16.9-24.1

Tableau 6: Résultats expérimentaux pour différentes fréquences

# Conclusion générale

Ce projet avait pour objectif d'analyser les défauts des transistors MOS par la technique de Terman. Se basant sur la comparaison de la caractéristique capacité-tension théorique et réelle en haute fréquence. Le but est d'extraire les défauts en  $eV^{-1} cm^{-2}$  en interface isolant/semi-conducteur.

Ce travail se présente en 4 parties. Dans la première partie un rappel des propriétés électriques et thermiques du nitrure de gallium (GaN). Les avantages apportés par le GaN, une brève définition des propriétés électriques de l'isolant  $SiO_2$  et un rappel sur ses différents types de charges. Dans la deuxième partie une étude détaillée et complète concernant la structure Métal/isolant/semi-conducteur (MIS) pour différentes polarisation, les diagrammes de bande, la densité de charge à chaque polarisation (positive, négative), un calcul de la capacité de semi-conducteur, cette partie est terminée par la définition de la structure MIS réelle, les charges qui peuvent exister dans la structure MIS réelle.

La troisième partie est consacrée à expliquer la méthode de Terman en traçant les courbes idéale et réelle pour les comparer et déduire la caractéristique  $V_s(V_G)$ . Une fois la caractéristique  $V_s(V_G)$  est obtenue, nous appliquons la relation de la densité d'état d'interface pour extraire et analyser les défauts d'interface. Ainsi les effets des défauts sur la caractéristique C-V.

La quatrième partie est relative à l'analyse de la densité d'état d'interface obtenue à partir des mesures expérimentales. En premier lieu nous estimons la densité d'états d'interface de 3 échantillons avec une fréquence d'1 MHz. Ensuite nous faisons une estimation de la densité d'états d'interfaces en se basant sur la comparaison de résultat pour différentes fréquences (1 MHz, 500 kHz, 100 kHz, 10 kHz), après l'extraction des résultats nous avons observé d'après les courbes tracées que la densité d'états d'interface varie en fonction de la fréquence.

# Référence bibliographique

- [1], [Bougrov et *al.*, 2001] V. Bougrov, M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, A. Zubrilov, Properties of Advanced Semiconductor Materials Ga, Al, In, B, SiC, SiGe. Eds. Levinshtein M.E., Rumyantsev S.L., Shur M.S., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001, 1-30.
- [2].Ahmed CHAKROUN, " Passivation de la surface du nitride de gallium par dépôt PECVD d'oxyde de silicium", thèse de doctorat sous la direction de Abdelatif JAOUAD, Université de Sherbrooke (Québec) Canada, Novembre 2014.
- [3].Thi Dak Ha NGUYEN, "Réalisation et caractérisation de HEMTs AlGaIn/GaN sur silicium pour application à haute tension", thèse de doctorat sous la direction de Jean-Luc PELOUARD, Université Paris-Sud, 19/12/2013.
- [4].Ouloum AOUDÉ, "Étude des propriétés excitoniques de GaN par spectroscopies continue et résolue en temps à l'échelle de la femtoseconde", thèse Présentée pour obtenir le grade de docteur de l'université sous la direction Joël LEYMARIE et Pierre DISSEIX, Université BLAISE PASCAL, 10 février 2006.
- [5].Elias Al Alam, Alain Cazarré, Frédéric Morancho, Karine Isoird, Yvon Cordier, "Le Nitride de Gallium : un Matériau d'Avenir pour la Conception de Composants de Puissance Haute Tension et Haute Température "MGE 2008 4<sup>ème</sup> Colloque Matériaux du Génie Electrique, TOULOUSE, France. 4 p, 2008, 15 et 16 Mai 2008.
- [6], Propriétés des matériaux semi-conducteurs, site internet de l'institut Ioffe, [http : //www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/](http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/), consulté le 06 Juin 2014.
- [7], Jean-Guy Tartarin, "La technologie GaN et ses application pour l'électronique robuste, haute fréquence et de puissance", Rapport LAAS n 08644. Veille technologique sur la filière GaN. 2008. <hal-00341009>
- [8].Yves MANEGLIA, "Analyse en profondeur des défauts de l'interface Si-SiO<sub>2</sub> par la technique du pompage de charges", thèse Pour obtenir la garde de docteur sous la direction d'Alain CHOVET, L'institut national polytechnique de GRENOBLE, 18 décembre 1998.
- [9], Mathieu H., « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », Dunod 5<sup>e</sup> édition, (2001).
- [10], Ali Ahaitouf, "Etude de structure MS et MIS (n)-InP par photoluminescence –effet du champ électrique- ", ", thèse de doctorat sous la direction de A. BATH, Université de Metz, 16 Juin 1992.

- [11], Mathieu H., « Physics of semiconductor devices», Dunod 2<sup>ème</sup> édition, (2001).
- [12], E. H. Nicollian et J. R. Brews, “MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology”, Wiley, New York, (1982).
- [13]. Youjean CHANG, "Etude de caractérisation de matériaux diélectriques de grille à forte permittivité pour les technologies CMOS ultimes", thèse Pour obtenir le grade de docteur sous la direction de Mme Frédérique Ducroquet, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 21 juillet 2003.
- [14], Ali Ahaitouf, "Caractérisation et optimisation des propriétés électronique de structures MS et MIS réalisées sur (n)-InP ", thèse Pour obtenir la garde de docteur de l'université dirigé par A. BATH et E. ABARKAN, Université de Metz, 18 Juin 1998.
- [15] B.S. Eller, J. Yang et R. J. Nemanich, ‘Electronic surface and dielectric interface states on GaN and AlGaN’, J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 31, No 5 (2013).