

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones



TESIS DOCTORAL

**Estudio y Modelado de la Fiabilidad y Estrés Térmicos
en Transistores GaN para Aplicaciones de Microondas**

Autor: Asmae Mimouni

Director: Tomás Fernández

**Tesis doctoral para la obtención del título de Doctor por la Universidad
de Cantabria en Tecnologías de la Información y Comunicaciones en
Redes Móviles**

Santander, Diciembre de 2012

Certificado del Director de la Tesis

D. Tomas Fernández, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria.

HACE CONSTAR

Que el trabajo titulado “Estudio y Modelado de la Fiabilidad de los Transistores HEMTs AlGaN/GaN” presentado por Dña. Asmae Mimouni, para optar al título de Doctor por la Universidad de Cantabria, Doctorado en Tecnologías de la Información y Comunicaciones en Redes Móviles, ha sido realizado en el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria bajo mi dirección y que reúne las condiciones exigidas a los trabajos de Doctorado.

Santander, el 23 de Octubre de 2012

Fdo. : Tomás Fernández.

*À mes parents,
À mes frères et sœurs,
À ceux qui me sont chers*

Remerciement

Ce travail a été effectué au sien du laboratoire du département de l'École Nationale Technique Supérieur d'Ingénierie de Télécommunication de l'Université de Cantabria je tiens à remercier Mr. Angel Mediavilla, Mr. Antonio Tazón et Mr Tomás Fernández de m'avoir accueilli au sien du laboratoire ainsi pour leurs soutien, l'aide, la patience et les bons conseils durant tout mon séjour ici à Santander.

Je tiens à remercier très sincèrement mon directeur de thèse Mr Tomás Fernández, pour m'avoir fait bénéficier de ses connaissances Scientifiques, pour ses précieux conseils tout au long de cette étude, pour le temps et la patience qu'il m'a accordé.

J'adresse mes remerciements aussi à Mr. Faride Temcamani pour m'avoir accueillis en stage au sien du laboratoire de l'École Nationale Supérieur de l'Electronique et de ses Application de Cergy-Pontoise et à Mr Olivier Latry professeur de l'Université de Reuen. Leurs qualités scientifiques et humaines et les nombreux conseils qu'ils m'ont prodigués

J'exprime ma gratitude pour tous les professeurs du département pour leurs accueils et pour leurs qualité humain qu'ils ont pu m'apporté.

Je souhaite aussi remercie tous les chercheurs au sien du département

En fin un remerciement particulier à ma famille, à mes amis et à tous qui m'ont cher.

Merci à tout le monde.

Résumé	11
Resumen	15
Introduction générale	19
Chapitre I: Le HEMT AlGa_N/Ga_N	
I- 1- Introduction.....	23
I- 2- Les HEMTs AlGa _N /Ga _N	24
I- 2- 1- Principe de fonctionnement	24
I- 2- 2- Structure cristalline et effets de polarisation dans les III-nitrures	26
I- 2- 3- Polarisation spontanée.....	27
I- 2- 4- Champ de polarisation piézoélectrique.....	28
I- 2- 5- Effet des champs sur la concentration du gaz bidimensionnel d'électrons	29
I- 3- Les substrats adéquats pour la croissance du Ga _N hexagonale.....	30
I- 3- 1- Le silicium (Si).....	31
I- 3- 2- Le saphir (Al ₂ O ₃).....	31
I- 3- 3- Le carbure de silicium (SiC).....	32
I- 4- Les contacts Schottky et ohmique.....	32
I- 4- 1- Contact Ohmique.....	32
I- 4- 2- Contact Schottky.....	34
I- 5- Effets limitatifs dans les HEMTs Ga _N	35
I- 5- 1- Courant de collapse lié aux pièges-buffer (phénomène de Drain-lag)...	36
I- 5- 2- Courant de collapse lié aux pièges-surface (phénomène de Gate-lag)...	37
I- 5- 3- Effet Kink.....	41
I- 6- Conclusion.....	42
Chapitre II : Caractérisation et étude de la fiabilité des transistors HEMT de Ga_N	
II- 1- Introduction.....	49
II- 2- Composants caractérisés	50
II- 3- Caractérisation Ids (Vds, Vgs).....	51
II- 3 -1- caractérisation électrique statique Ids(Vds, Vgs).....	51
II- 3- 2- Caractéristiques Ids(Vgs).....	55
II- 3- 3- Caractéristiques Igs (Vgs, Vds).....	58

II- 4- Mesures I/V en régime pulsé.....	60
II- 4- 1- Intérêt des mesures I/V en régime pulsé.....	60
II- 4- 2- L'auto-échauffement.....	61
II- 4- 3- Mesures de Gate-lag et de Drain-lag.....	65
II- 4- 4- Influence de la température sur les effets de pièges.....	72
II- 5- Conclusion.....	74
Chapitre III: Caractérisation des pièges et dégradation du courant de saturation Idss	
III- 1- Introduction.....	81
III- 2- Effect de Kink.....	82
III- 3- Analyse électrique de l'effet de Kink.....	83
III- 4- Évolution de l'Effet kink avec la Température.....	87
III- 5- Caractérisation des pièges.....	92
III- 5- 1- Mesure de gate-lag.....	93
III- 5- 2- Influence de la température sur l'effet de Gate-lag.....	95
III- 6- Modèle de dégradation d'Idss.....	99
III- 7- Conclusion.....	105
Chapitre IV: Approche du model de fiabilité du courant de fuite Igleak	
IV- 1- Introduction.....	111
IV- 2- Physique de la jonction sous la grille.....	112
IV- 3- Composants étudiés et caractéristique $I_{gs}(V_{gs}, T, t)$	117
IV- 4- Mécanismes de transport.....	118
IV- 4- 1- En polarisation directe	119
IV- 4- 2- En polarisation inverse.....	119
IV- 4- 3- Courant de fuite (leakage) de la grille.....	121
IV- 5- Model de dégradation du courant de Leakage.....	123
IV- 5- 1- Description de dispositifs et les mesures effectuées.....	124
IV- 5- 2- Extraction des paramètres de modèle	126
IV-5- 3- Résultats et discussion.....	128
IV- 6- Conclusion.....	133
Conclusion générale.....	137

Résumé

Le GaN et les III-nitride associé sont des matériels trop promotionnels pour la fabrication des dispositifs optoélectroniques.

Depuis la première démonstration du transistor une progression rapide est établie pour les dispositifs HEMTs de GaN.

Les HEMTs de AlGaN/GaN ont reçus beaucoup d'intérêt pour les applications à haute puissance et haute fréquence en raison d'un champ de claquage élevé pour le semi conducteur à large bande interdite. De plus, une discontinuité de la large bande de conduction entre le GaN et l'AlGaN et la présence de champs de polarisation permettant une concentration du gaz bidimensionnel (2DEG) large pour être confines.

Les phénomènes de dégradation à fort champ électrique des HEMTs sur le GaN sont analysés en comparant les données expérimentales avec les résultats de l'optimisation avec des approches de modèle de dégradation.

Des vieillissements électrique et thermique à des températures très élevées pendant 2000 heures ont été effectués. Les dégradations qui ont caractérisé ce type de vieillissements sont les suivants : une chute de courant DC de drain, une variation de la tension de seuil V_{TH} , une diminution de la transconduction g_m , une augmentation du courant de fuite de la grille I_g , et une amplification des effets de gate-lag.

La génération simultané des pièges da la surface (et/ou barrière) peut expliquer tous les modes de dégradation décrit plus haut.

La caractérisation des effets de piège en mode pulsé est présentée dans le but d'étudier l'influence de phénomène de vieillissement sur ces effets et la dégradation des composants étudiés. En fin une étude de l'influence de la température sur les effets de pièges est présentée.

L'effet de Kink est l'un des phénomènes observés pour les HEMTs de AlGaN/GaN. Il se manifeste comme une augmentation brusque du courant de drain pour une tension déterminé qui cause une augmentation de conductivité de sortie g_{ds} et une augmentation de courant de grille I_g entrainant une réduction de gain de tension et une mauvaise linéarité.

Il n'y a pas un accord définitif sur son origine quelques explications de cet effet sont attribués à l'accumulation des trous produit par le phénomène de l'ionisation par impact et aussi aux effets de pièges dans le cas des HEMTs de GaN.

A fin de confirmer cette théorie une série de mesure DC à trois températures différents (-100°C, 27°C, 70°C) a été effectuée sur des transistors HEMTs de AlGa_N/Ga_N vierges et d'autres soumis à un vieillissement électrique et thermique dans un test de III-V lab.

On a apprécié la présence de l'effet de kink pour les deux transistors étudiés et spécialement à faible température (-100°). A haut température (70° dans notre cas) l'effet de kink a peu d'importance et spécialement pour les le transistor soumis au vieillissement puisqu'il est soumis à des températures très élevé (300°) lors de processus de vieillissement, et alors la présence des niveaux de pièges est diminuée suite à l'augmentation de la température.

En fonction de l'évolution de l'amplitude du courant I_{kink} (courant qui indique le taux de piégeage/ dépiégeage) et en fonction de la température, le tracé d'Arrhenius donne deux énergies d'activation à basse température BT et à haute température HT, qui indique l'énergie des pièges impliqués.

Les pièges dans les HEMTs sur GaN ont été caractérisés aussi en utilisant les mesures de gate-lag en fonction de la température afin d'indiquer la localisation et la concentration d'un piège et pour faciliter la détermination de son énergie d'activation pour les transistors étudiés.

En se basant sur des mesures effectuées sur des dispositifs HEMTs de AlGa_N/Ga_N de III-V Labs, Qinetiq de (8x75 μm) et à partir du model de dégradation du courant de saturation I_{dss} présenté par Chou et al pour les PHEMTs de GaAs à des températures de canal différents, on a proposé un modèle de dégradation du courant de saturation I_{dss} pour les HEMTs de AlGa_N/Ga_N de (8x75 μm). Une validation de ce modèle avec des transistors HEMTs de AlGa_N/Ga_N de (2x75 μm) à trois température différentes (250°, 300°, 350°C) est présenté.

L'augmentation du courant inverse I_g est l'un des phénomènes de dégradation observé, ce qui induit une consommation plus élevée, une faible impédance d'entrée et une augmentation du bruit de HEMT. Ces conséquences limitent les performances du transistor pour des applications visées. Une étude sur les mécanismes du transport en polarisation directe et inverse qui sont l'origine de ce courant est présentée.

Un modèle pour simuler la dégradation dans le courant de fuite avec le temps a été appliquée à des dispositifs HEMTs de AlGa_N / GaN de différentes tailles provenant de fabricants différents. Celles-ci ont été mesurées sous une variété de conditions d'essai, y compris divers points de la température ambiante. Les résultats montrent clairement une dépendance forte entre le courant de fuite, la hauteur de la barrière Schottky et la densité des donneurs de la jonction grille-drain. Ces résultats démontrent également la forte influence de la présence des pièges de surface ou/et profond sur le courant de fuite. Également démontrent le fort inter dépendance entre ces variables et la température ambiante.

Resumen

Los compuestos basados en asociaciones de Nitruro-Grupo III y GaN son de los más utilizados en la actualidad para aplicaciones optoelectrónicas y de potencia a frecuencias de microondas.

En particular los dispositivos HEMT de AlGaIn/GaN están siendo objeto cada día mayor interés debido a la capacidad de manejo de alta potencia que presentan, a resultas de su ancho bandgap en la banda prohibida. Además, la discontinuidad en una ancha banda de conducción entre el GaN y el AlGaIn junto con la presencia de campos de polarización, dan lugar a la presencia de un gas bidimensional (2DEG).

En este trabajo, se analizan los fenómenos de degradación presentes en GaN HEMT, bajo condiciones de fuerte campo eléctrico; también se presentan modelos de degradación, en los que partiendo de resultados experimentales, y utilizando procesos de optimización, es posible llegar a obtener sus parámetros.

Para contar con resultados experimentales, se han llevado a cabo procesos de envejecimiento eléctrico y térmico sobre diferentes dispositivos, a temperaturas elevadas, durante más de 2000 horas. Mediante este tipo de medidas se han podido caracterizar los siguientes tipos de degradación: caída de la corriente del drenador, variación de la tensión umbral V_{th} , disminución de la transconductancia, g_m , disminución de la corriente inversa de puerta I_g y aumento de los efectos de gate-lag.

La mayoría de los efectos de degradación anteriormente mencionados puede explicarse a partir de la presencia de estados trampas superficiales.

Se presenta la caracterización de los efectos trampa en modo pulsado con objeto de poder estudiar la influencia del proceso de envejecimiento sobre estos efectos de degradación de los dispositivos estudiados. De la misma manera, se presenta un estudio de la influencia de la temperatura ambiente sobre los efectos debido a la presencia de estados trampa.

En los dispositivos AlGaIn/GaN HEMT, uno de los fenómenos más ampliamente estudiados es el efecto Kink; este efecto se manifiesta como un aumento brusco de la corriente de drenador para una tensión determinada que causa un aumento de la conductancia de salida g_{ds} y una disminución de la corriente de puerta I_g , lo que hace

se traduce, macroscópicamente, en una reducción de la ganancia en tensión y una mala linealidad del dispositivo.

No hay un acuerdo definitivo sobre el origen del efecto Kink, algunas explicaciones lo relacionan con la acumulación de huecos producidos por ionización por impacto así como a la presencia de efectos trampo en el caso de HMET de GaN. Con el fin de confirmar estas teorías, se han llevado a cabo una serie de medidas en DC a tres temperaturas diferentes (-100°C, 27 °C y 70°C) sobre transistores HEMT de AlGa_N/Ga_N tanto vírgenes como sometidos a envejecimiento por la foundry III-V Lab. Se ha apreciado la presencia del efecto kink en los dos transistores estudiados, especialmente a baja temperatura (-100°C). En altas temperaturas (70°C), este efecto muestra menor influencia, y más especialmente en los dispositivos envejecidos a muy altas temperaturas (300°C) en el proceso de envejecimiento, en los que la presencia de estados trampa disminuye como consecuencia de ese aumento de temperatura.

En función de la evolución de la amplitud de la corriente Kink y en función de la temperatura, mediante el trazado de las gráficas de Arrhenius, se obtienen las Energías de Activación en baja (BT) y alta (HT) temperatura, relacionadas directamente con la energía de las trampas implicadas en este efecto.

Se ha llevado a cabo una caracterización de los estados trampa en los HEMT de Ga_N realizando medidas de tipo gate-lag en función de la temperatura con objeto de localizar los estados trampa y determinar su energía de activación. Todas estas medidas se han efectuado sobre los transistores anteriormente mencionados.

Basándonos en medidas efectuadas sobre dispositivos HEMT de AlGa_N/Ga_N de III-V LAB, Quinetics y Selex, y tomando como base el modelo de degradación de la corriente de saturación, I_{dss} , de Chou et al. para PHEMT de GaAs, se propone un nuevo modelo de degradación de la corriente de saturación I_{dss} para los dispositivos AlGa_N/Ga_N estudiados.

Otro de los fenómenos de degradación estudiados ha sido el aumento de la corriente de fugas de puerta, lo que conlleva un aumento del consumo, una menor impedancia de entrada y un aumento del ruido en el HEMT. Estos factores limitan las prestaciones del transistor para las aplicaciones deseadas inicialmente. Un estudio de los mecanismos de transporte en polarización directa e inversa ha permitido poner de manifiesto el origen de esta corriente.

Por último se ha desarrollado y aplicado un modelo para simular la degradación de la corriente de fugas con el tiempo, tomando como dispositivos bajo test transistores de diferentes tamaños y diferentes fabricantes. Dichos dispositivos han sido medidos en diferentes condiciones de polarización de temperatura ambiente. Los resultados obtenidos muestran claramente una fuerte dependencia entre corriente de fugas, la altura de la barrera Schottky y la densidad de donadores en la unión puerta-drain. Estos resultados demuestran igualmente que hay una gran influencia de los estados trampas superficiales y/o profundas en la corriente de fugas de puerta. Igualmente ponen de manifiesto la dependencia de estas variables con la temperatura ambiente.

Introduction générale

Dans un premier temps, les besoins militaires étaient le principal moteur de la croissance des investigations et du développement, mais, à l'heure actuelle, les applications civiles (mobile, Internet, les systèmes de localisation et de suivi, communication par satellite, etc.) ont été explosés ces dernières années.

Enfin, les domaines spatiaux, civils ou militaires, utilisent de nombreux moyens de télécommunications entre les satellites et les stations au sol, ainsi qu'éventuellement de systèmes RADAR pour cartographier des zones ou pour des applications météorologiques.

Le développement des systèmes de télécommunication et de transfert d'informations donne naissance à des systèmes de transmission qui permettent des débits plus élevés sur des distances plus grandes.

De ce fait, les transistors utilisés dans ces systèmes doivent fonctionner à des fréquences et des puissances plus élevées. Les transistors à haute mobilité électronique (HEMTs) sur nitrure de gallium (GaN), répondent au mieux aux contraintes des applications visées par ces systèmes.

Le GaN est un matériau grand gap qui présente un champ de claquage élevé, une conductivité thermique élevée de plus, la structure d'un HEMT permet une augmentation de la mobilité des électrons du canal, qui est constitué du puits quantique formé à l'hétéro interface AlGaN/GaN.

Ainsi qu'il sera décrit dans la suite, l'effet du courant de collapse due aux effets de pièges et la fiabilité limitée des HEMTs de GaN sont actuellement le principal facteur limitant le développement de ces dispositifs à la fois dans les applications de télécommunication et de puissance RF.

Ce travail est destiné à étudier les différents mécanismes du courant de collapse dans les transistors HEMTs de AlGaN-GaN, de donner une interprétation aux différents modes de dégradation observés dans ces dispositifs après un processus de vieillissement

électrique et thermique, obtenir un aperçu sur la localisation des génération des défauts et les mécanismes physique fondamental, et fournir une explication possible de l'effet kink. A fin d'obtenir ces buts des mesures typiques et des techniques expérimentales ont été adoptés pour la caractérisation des pièges dans les transistors à haute mobilité d'électrons.

- Dans le premier chapitre un aperçu général sur les principaux thèmes concernant les transistors HEMTs à base de GaN est présenté.

- Le second chapitre sera concerné à l'étude des caractérisations électriques permet d'émettre des hypothèses sur l'origine des phénomènes parasites. Dans cette optique, les caractérisations électriques effectuées, dans ce travail, concernant des mesures I-V statiques et en régime pulsé, à la température ambiante et à basse température. Les composants caractérisés proviennent du projet européen Korrigan. Ce programme de recherche a pour objectif d'évaluer la fiabilité des HEMTs AlGaIn/GaN.

Dans le cadre de caractériser les phénomènes parasites avant et après les tests de vieillissement qui permettre de formuler des hypothèses sur les différents mécanismes de défaillances qui apparaissent durant le processus de vieillissement du composant.

Les mesures statiques permettent de souligner les phénomènes d'auto-échauffement du composant étudiés. La caractérisation des effets de pièges en mode pulsé est présentée dans ce chapitre dans le but d'étudier l'influence de phénomène de vieillissement sur ces effets et la dégradation des composants étudiés. En fin une étude sur l'influence de la température sur les effets de pièges.

- Le troisième chapitre présente une étude détaillée sur l'effet de kink, l'analyse électrique de cet effet à partir des mesures en DC à des différentes températures. Dans le but de calculer l'énergie d'activation des électrons piégés une série de mesures DC ont été réalisé aux températures (-100°, -70°, -30°, 0°, 27°, 50° et 70°) sur les transistors étudiés. Pour indiquer la localisation et la concentration d'un piège et en plus la facilité de la détermination de son énergie d'activation pour les transistors étudiés des mesures de gate-lag en fonction de la température sera effectuée pour la caractérisation des pièges dans les HEMTs de GaN.

Un modèle de dégradation de courant de saturation I_{dss} en fonction du temps sera proposé, en se basant sur la proposition de Chou, et appliqué à des dispositifs HEMTs de AlGaIn/GaN de différents taille prévenants des fabrications différentes aussi.

- Le quatrième chapitre présentera Un approche de modèle pour la dégradation du courant de fuite en fonctionne de temps appliqué à des dispositifs HEMTs de AlGaN / GaN de différentes tailles provenant de fabricants différents, mesurés dans des conditions d'essai, y compris divers points de la température.

Chapitre 1

Le HEMT AlGaN/GaN

I-1- Introduction:

Un changement radical Dans le paysage de la microélectronique s'est opéré depuis les années 1990 avec la généralisation des liaisons sans fil personnelles et grand public. Il s'agit par exemple de la téléphonie et des réseaux locaux sans fils mais aussi des applications automobiles (localisation et anticollision). Les porteuses utilisables s'évaluent sur environ deux décades de fréquences (1-10GHz et 10-100GHz). La multiplication des applications, et donc des fréquences allouées, se traduit par des contraintes en matière de linéarité, bruit et sensibilités sans oublier les contraintes sur le coût de fabrication qui doit permettre de vulgariser des produits pouvant séduire le plus grand nombre de clients.

La diminution des coûts de fabrication passe par l'accroissement de l'intégration et de l'utilisation de matériaux faible coût. C'est dans ce cadre, que le semi-conducteur le plus employé dans le domaine de la microélectronique a toujours été le silicium (Si).

Toutefois cette technologie souffre de certains handicaps si elle est utilisée à des fréquences élevées, à une forte puissance ou à une haute température.

Pour les applications de forte puissance, l'apparition de matériaux à grande bande interdite (gap) et en particulier la technologie à base de Nitrure de Gallium (GaN), constitue une avancée sérieuse pour l'électronique HF de puissance. Les composantes électroniques constituant ce matériau ainsi que leurs propriétés physiques présentent en effet des performances très attirant pour un nombre d'applications. Par exemple, la large bande interdite du GaN (3.4eV) se traduit par un champ critique de claquage très élevé. Dans des transistors à effet de champ (FET), cela implique des tensions de claquage supérieures à 50V et présente un bénéfice appréciable dans des applications de forte puissance par rapport aux composantes silicium ou III-V ou l'on dépasse rarement 20V. Les propriétés piézo-électrique de ce matériau lui permettent aussi, par rapport aux autres matériaux, de meilleurs potentialités en courant maximum dans les structures de type HEMT ce qui accroît ses potentialités pour la puissance.

Les transistors à effet de champ de types HEMT à base de nitrure de gallium (AlGaN/GaN) présentent de nombreux avantages (tension de claquage élevée, fonctionnement dans le domaine des hyperfréquences, excellente conductivité thermique,...) en tant que dispositifs électroniques destinés à fonctionner à haute température et à haute puissance. Des travaux montrent de très bonnes performances vis-à-vis des propriétés thermiques. D'autres publications rapportent d'excellentes performances en termes de fréquence d'utilisation et en termes de puissance aux fréquences micro-ondes. Cependant, leurs performances sont affectées par divers effets parasites comme des effets de coude ou encore de courant de fuite au niveau des grilles des transistors. Dans la majorité des cas, les raisons invoquées se situent essentiellement au niveau des pièges présents dans les couches épitaxiales constituant le dispositif.

I- 2- Les HEMT AlGaN/GaN

I- 2- 1- Principe de fonctionnement :

Les transistors à haute mobilité électronique, ou HEMTs, sont des transistors à effet de champ et ont une structure horizontale. Ils possèdent trois électrodes : la source,

la grille et le drain. En mode d'amplification de puissance, ils sont montés en source commune. L'électrode de grille sert alors à la commande basse puissance et celle de drain sert de commande de puissance. En effet, la tension grille-source contrôle la densité des porteurs dans le canal, et donc contrôle le courant de drain.

Le schéma physique d'un HEMT AlGaN/GaN basique est présenté à la figure (I-1)

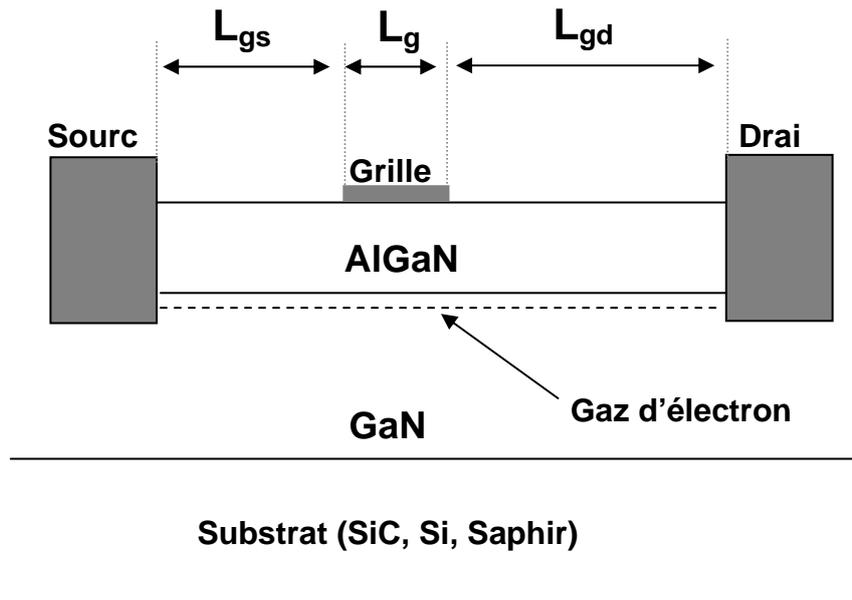


Figure I-1. Schéma de la structure d'un HEMT AlGaN/GaN classique.

La structure d'un HEMT est constituée essentiellement de trois matériaux différents : le substrat, un matériau à large bande interdite et un matériau à plus faible bande interdite. La différence de hauteur de barrière entre les deux matériaux permet de créer une hétérojonction à l'interface, qui crée un puits de potentiel et donc une zone de confinement des électrons libres.

Les charges qui sont confinées sur quelques nanomètres de profondeur à la surface de GaN, constituent un gaz d'électrons à deux dimensions et ont un comportement quantique : cela signifie qu'elles sont situées sur des niveaux d'énergie discrets dans le puits de potentiel. Elles ont ainsi une mobilité bien élevée ; c'est pourquoi on appelle ces composantes « transistors à haut mobilité électronique » (High Electron Mobility Transistors).

Dans le cas des transistors HEMT AlGa_N/Ga_N, la couche d'AlGa_N placée au-dessus du canal n'est pas nécessairement dopée (à la différence de la couche AlGaAs dopée N⁺ dans les HEMTs AlGaAs/GaAs). L'accumulation des électrons dans le canal est le résultat de l'effet cumulé de la polarisation spontanée présente dans les matériaux AlGa_N et Ga_N et de la polarisation piézoélectrique dans l'AlGa_N.

1- 2- 2- Structure cristalline et effets de polarisation dans les III-nitrures :

Les groupes nitrures III peuvent se cristalliser sous deux structures cristallines (plytypes) suivantes : phase hexagonale appelée wurtzite et phase cubique appelée zinc-blende. Cependant, aux conditions ambiantes la structure de wurtzite est la plus stable thermodynamiquement ; cette structure correspond à deux réseaux hexagonaux composés chacun d'une des deux espèces d'atomes et décalés l'un de l'autre par $3/8.c_0$ [1], où c_0 est la taille de la cellule hexagonale. Les liaisons chimiques des composés de nitrure III tels que Ga_N sont principalement covalentes, ainsi elles signifient que chaque atome est tétraédriquement collé sur quatre atomes de l'autre type.

Tous les composés III-V, par le fait qu'ils sont non-Centro-symétriques, sont piézoélectriques. En ce qui concerne les nitrures cette piézoélectricité est très importante car la liaison III-N est fortement polarisée, les électrons sont essentiellement localisés sur l'atome d'azote [2].

La piézoélectricité est l'aptitude de certains matériaux à produire une charge électrique dipolaire proportionnelle à la contrainte mécanique (traction ou compression) qui les déforme [3]. Cet effet résulte essentiellement de l'existence de dipôles électriques internes créés par la séparation à l'échelle de la maille du centre de gravité des charges positives de celui des charges négatives sous l'effet d'une contrainte externe.

Certaines classes cristallines piézoélectriques présentent une polarisation électrique spontanée - ou moment dipolaire permanent – en l'absence de contrainte ou champ extérieur : elles sont dites polaires. Les cristaux appartenant à ces classes sont appelés piézoélectriques en raison de la variation de la polarisation spontanée avec la température [4].

I- 2- 3- Polarisation spontanée :

En l'absence de toute contrainte dans une couche de nitrure wurtzite, celle-ci peut cependant présenter une polarisation macroscopique non nulle.

La structure wurtzite est la structure de plus haute symétrie compatible avec le phénomène de la polarisation spontanée [5]. Cette polarisation spontanée s'explique par le non superposition des barycentres des charges positives avec ceux des charges négatives.

Pour les composés binaires Ga-N de type Wurtzite, la séquence des couches d'atomes des constituants Ga et N est inversée le long des directions $[0001]$ et $[000\bar{1}]$. On associe alors respectivement les faces Ga et N aux directions $[0001]$ et $[000\bar{1}]$. Etant donné que le vecteur polarisation spontanée est orienté de l'atome d'azote vers l'atome de gallium, les structures a et b de la figure (I-2) présentent une polarisation spontanée de signe opposé.

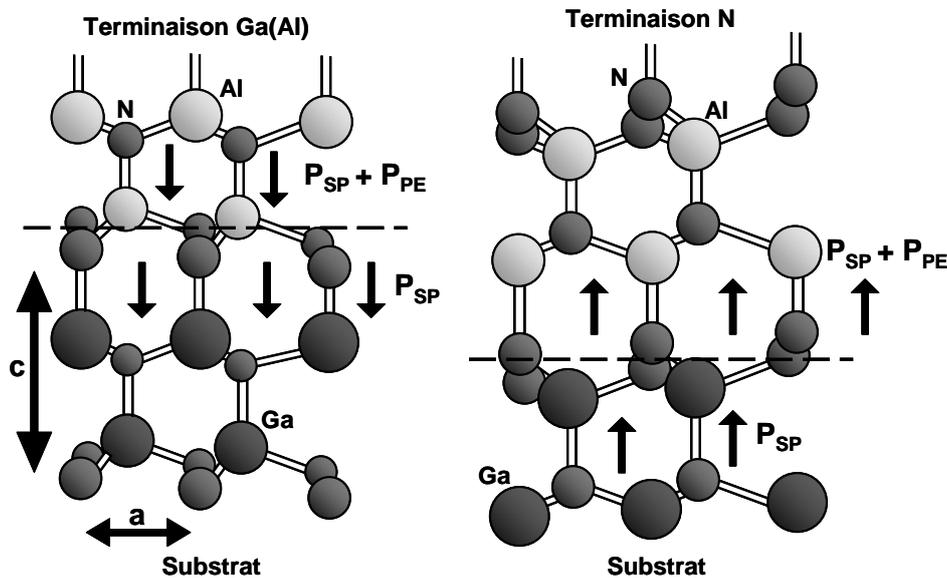


Figure I-2 : Représentation des séquences de couches d'atomes donnant lieu à deux polarités différentes.

Dans un échantillon de GaN hexagonal, il y a apparition d'une succession de dipôles orientés dans la direction $[0001]$ générant un champ électrique dans le sens opposé à

cette polarisation. Le GaN hexagonal relaxé possède ainsi une polarisation spontanée suivant l'axe c sans excitation extérieure appliquée. La tranche d'un échantillon peut être schématisée par le dessin de la figure (I-3).

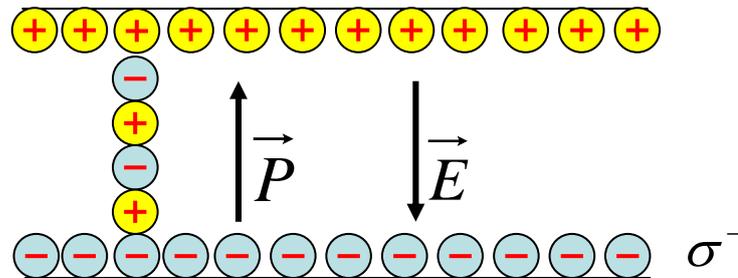


Figure I-3: Génération d'un champ électrique E par la polarisation spontanée dans un échantillon de GaN relaxé sans champ extérieur appliqué [6].

En d'autres termes, un échantillon de GaN Wurtzite épitaxié suivant l'axe c présente sur chacune de ces deux faces des densités de charges fixes identiques mais de signes opposés. Ce matériau est par définition naturellement polarisé sans l'apport extérieur d'un champ électrique : c'est la polarisation spontanée.

Le tableau (1) résume les valeurs numériques de la polarisation spontanée suivant l'axe c de différents nitrures d'éléments III. Ces données issues de la littérature ont été déterminées théoriquement par F. Bernardini et al [5].

	GaN	AlN	InN
$P_{SP}(C/m^2)$	-0.029	-0.081	-0.032

Tableau 1: Valeurs numériques théoriques de P_{SP}

I- 2- 4- Champ de polarisation piézoélectrique

La polarisation piézoélectrique trouve essentiellement son origine dans la symétrie du cristal [7]. L'effet piézoélectrique peut se définir comme l'apparition d'une

polarisation électrique dans une couche semi-conductrice lorsque celle-ci est soumise à une contrainte σ qui modifie la maille du cristal en brisant sa symétrie. L'effet inverse existe également, à savoir une modification du volume de maille cristalline lorsqu'on lui applique une polarisation électrique. Comme nous l'avons déjà mentionné les nitrures peuvent cristalliser suivant deux phases cristallines. Ces deux phases : zinc blende (cubique) et wurtzite (hexagonale) sont non centrosymétriques.

Ceci induit l'existence en leur sein de l'effet piézoélectrique. Sous l'effet de contrainte, des barycentres des charges positives et négatives à l'intérieur des tétraèdres formant la maille cristalline. Il apparaît alors à l'intérieur de chaque tétraèdre de la maille un dipôle élémentaire orienté selon la direction de la contrainte.

Une contrainte suivant la direction de croissance (0001) dans la phase hexagonale va donner naissance à une polarisation d'origine piézoélectrique suivant cette direction car le déplacement des barycentres des charges positives et négatives est non nul.

1- 2- 5- Effet des champs sur la concentration du gaz bidimensionnel d'électrons

Les phénomènes de polarisation proviennent de la nature intrinsèque des matériaux nitrure, à savoir un décalage spatial des charges créant des dipôles. Une polarisation, dite polarisation spontanée, est donc naturellement présente. Elle est orientée vers le substrat - cas favorable - dans le cas d'une croissance avec une polarité gallium.

Ce décalage des charges dans le matériau peut être renforcé par une contrainte mécanique extérieure, qui est dans ce cas la compression ou l'extension de la maille de l'AlGa_N lorsqu'il est accolé au Ga_N, et qui induit une polarisation piézoélectrique. Elle est orientée (favorablement) vers le substrat lorsque le cristal d'AlGa_N est contraint.

La figure (I-4) [8] montre la répartition des charges dans le cristal et le sens des polarisations dans un HEMT AlGa_N/Ga_N, permettant la création du gaz 2D d'électrons.

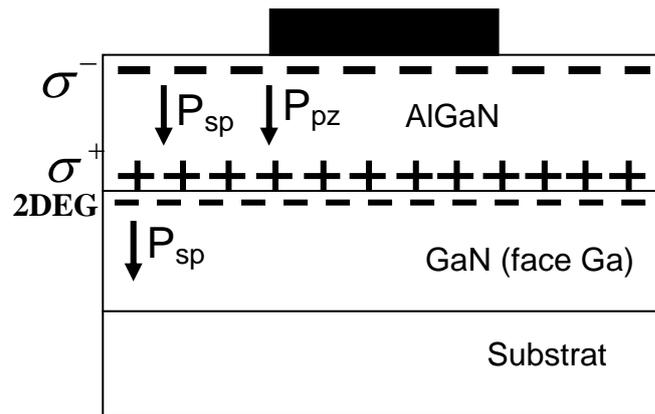


Figure I- 4. Orientation favorable des effets de polarisations dans un HEMT AlGaN/GaN.

L'addition de tous ces champs provoque l'apparition d'un nombre important de charges positives côté AlGaN, ainsi que la courbure des bandes d'énergie. Cette densité de charge positive devant être compensée par une densité de charge négative afin de respecter la condition de neutralité électrique, la présence d'électrons libres à l'interface AlGaN/GaN dans le GaN est nécessaire.

1-3- Les substrats adéquats pour la croissance du GaN hexagonale :

La croissance des couches hexagonales de bonne qualité est conditionnée par le choix du substrat. En effet, le principal problème rencontré pour l'épitaxie du Nitrure de Gallium c'est qu'il n'existe pas de substrat accordé en maille pour ces matériaux. Les candidats susceptibles d'être utilisés pour l'hétéro structure AlGaN/GaN sont le saphir (Al_2O_3), le silicium(Si) et le carbure de silicium (SiC de type 4H).

Le désaccord de maille entre le substrat et la couche épitaxie engendre une contrainte dans la couche. À partir d'une épaisseur critique, la couche se relaxe en créant des dislocations néfastes pour la qualité du matériau. Afin de résoudre ce problème, une couche de nucléation ou tampon y est déposée, pour réaliser l'homo épitaxie des couches sans contrainte. Malgré l'utilisation d'un tel procédé, il y subsiste toujours une contrainte résiduelle. Son origine provient de la différence des coefficients de dilatation thermique entre la couche et le substrat.

I- 3- 1- Le silicium (Si)

Le substrat silicium est très attractif non seulement parce qu'il présente une bonne morphologie de surface et est disponible à coût bas, mais également parce qu'il permet une intégration des dispositifs à base de GaN dans la microélectronique Silicium. Néanmoins, le GaN montre un désaccord de maille avec le Si (111) d'environ 17% associé à un désaccord de coefficients de dilatation thermique supérieur à 35%.

Contrairement aux substrats (Al_2O_3) et SiC, le silicium Si possède une maille plus importante que celle du GaN. Par conséquent, le GaN se trouve par définition en extension lorsqu'il est épitaxié sur le Si (111) engendrant la formation de dislocations et de craquelures.

Une couche de nucléation plus complexe composée de plusieurs sous couches d'AlN et de GaN (super réseau) est alors réalisée dont les conditions de croissance sont différentes de celles utilisées pour les substrats précédents. La croissance de la couche de GaN (buffer) est alors réalisée sur ce super réseau.

I- 3- 2- Le saphir (Al_2O_3)

A l'origine des premières élaborations du matériau GaN, la majorité des couches élaborées étaient déposées sur le substrat saphir. Ce substrat présente l'avantage d'avoir un coût relativement faible, d'être facilement disponible, d'être semi isolant et d'avoir une grande stabilité en température. Les inconvénients sont : sa faible conductivité thermique ($\kappa = 0.5 \text{ W/cm.k}$) et un fort désaccord en maille. Ce désaccord en maille entre les plans de base du GaN hexagonale et du saphir est de 30%, cependant lors de l'épitaxie, la maille est tournée de 30° par rapport à la maille des atomes d'Aluminium du saphir et le désaccord réel est dans ces conditions inférieur à 15%, malgré ce désaccord de maille important et une différence de coefficients de dilatation thermique de l'ordre de 35%, le saphir est néanmoins traditionnellement utilisé pour des raisons de coûts. Pour remédier au maximum à la formation de dislocation dans le GaN, on dépose tout d'abord une couche de nucléation d'AlN d'une dizaine à une centaine de nanomètre.

Le désaccord de maille résiduel entraîne cependant la présence d'une grande densité de dislocation de l'ordre de 10^{10} cm^{-2} . Malgré cela, ce substrat a tout de même permis l'élaboration des dispositifs à base de GaN dans les domaines de l'optoélectronique et des hyperfréquences présentant de très bonnes performances. Cependant, ce matériau atteint aujourd'hui ses limites du fait de sa mauvaise conductivité thermique.

1- 3- 3- Le carbure de silicium (SiC)

En ce qui concerne le substrat SiC(4H) de structure Wurtzite d'orientation [0001], les conditions d'épitaxie sont bien plus favorables. Le désaccord de maille et les coefficients de dilatation thermique sont respectivement de 3.5% et 25% avec le GaN. Par conséquent, les couches épitaxiales sur ce substrat présentent une meilleure qualité cristalline que celles élaborées sur Saphir. Afin d'améliorer encore la qualité cristalline du GaN sur SiC, une couche de nucléation en AlN de 100nm environ est déposée dans un premier temps sur le substrat. Le AlN présente un désaccord de maille plus faible que le SiC (environ 1%) et un coefficient de dilatation thermique identique au substrat. La croissance du GaN est alors réalisée sur cette couche de nucléation. Le SiC possède également une conductivité thermique environ sept fois plus élevée que celle du Saphir, mais il est très coûteux.

1- 4- Les contacts Schottky et ohmique

1- 4- 1- Contact Ohmique

La plupart des contacts ohmiques sur l'hétéro structures AlGaN/GaN sont basés sur les régimes de métallisation Ti/Al. Les plus fréquemment rapportés sont les régimes Ti/Al/Ti/Au, Ti/Al/Pt/Au. Chacun des métaux dans ces piles a son rôle propre.

- Le Titanium, le premier métal dans tous les cas, peut:

i) servir comme une couche d'adhérence pour assurer une bonne stabilité mécanique [9], ii) soit dissoudre l'oxyde natif à la surface AlGaN [10, 11], iii) créer des postes d'azote en réagissant avec des atomes d'azote dans l'AlGaN. Ce processus rend la

surface fortement dopée, ce qui permet aux électrons tunnels de passer à travers la barrière mince [9, 11].

- L'Aluminium:

i) réagit avec Ti pour former une couche Al_3Ti qui empêche la couche sous-jacente de l'oxydation de Ti [9, 10].

ii) sert comme barrière de diffusion pour les métaux au-dessus de Al car ils forment de hautes barrières de Schottky [11].

Les couches de Ni et Pt devraient empêcher la diffusion de l'Al à la couche de l'Al. Cette couche est ajoutée pour améliorer la conductivité du métal. Toutefois, lorsque l'or et Al réagissent, ils pourraient former une couche très résistante (purple plague). Une des raisons les plus importantes pour l'ajout de métaux sur le dessus de l'Al est d'empêcher l'étalement de cette couche. Habituellement, les contacts ohmiques sont recuits à des températures très élevées ($> 800\text{ }^\circ\text{C}$), bien au-dessus du point de fusion de l'Al ($660\text{ }^\circ\text{C}$). Si aucun des métaux n'est mis sur le dessus de l'Al, la définition de ligne du contact ne peut pas être contrôlée.

[12] et all, propose le mécanisme pour la formation de contact ohmique pendant le processus de recuit. Premièrement, les réactions commencent entre Ti et Al à des températures relativement basses ($200\text{-}300\text{ }^\circ\text{C}$) avec la formation d'une phase Al_3Ti selon le diagramme de phase binaire

Si Al et Ti ont été les seuls métaux impliqués, cela exigerait un rapport d'épaisseur Al / Ti de 2,82. Si ce rapport est inférieur, il ya un excès de Ti disponibles pour réagir avec l'AlGaIn. Cette réaction commence probablement à $400\text{ }^\circ\text{C}$ et implique:

- La dissolution de l'oxyde natif présent à la surface.
- Out diffusion ultérieure de l'azote pour former les postes d'azote.
- La formation des phases inter faciales Ti-Al-N.

La décomposition de l'AlGaIn commence probablement à des températures supérieures à $850\text{ }^\circ\text{C}$ et entraîne une dégradation du contact ohmique et la structure cristalline elle-même.

De la discussion, il est clair que plusieurs réactions se déroulent à différentes températures. Pour obtenir des résultats reproductibles, il est donc important de contrôler avec précision le traitement thermique à la fois dans les variations de température et dans le temps.

1- 4- 2- Contact Schottky

Le contact Schottky est une composante importante pour les transistors HEMT. La hauteur de la barrière d'énergie est un paramètre clé de la jonction, en contrôlant à la fois la largeur de la région de déplétion dans les semi-conducteurs et le courant d'électrons à travers l'interface. La hauteur de la barrière est définie comme la différence d'énergie entre la bande de conduction des semi-conducteurs pointée à l'interface et du niveau de Fermi dans le métal.

D'après les données publiées par les différents chercheurs, une grande variation de la hauteur de barrière pour les métaux déposés sur l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x < 0,3$) peut être trouvée. L'étalement apparaît probablement en raison de divers facteurs, comme la présence de mécanismes de transport, les différents défauts présents dans le matériau, l'efficacité du nettoyage des surfaces avant le dépôt de métal, les variations de stoechiométrie locales ou les variations de la rugosité de surface. Les métaux tels que Au, Pt et Ni ont été explorés Pour obtenir une large hauteur de barrière Schottky pour rectifier les contacts métalliques, qui impose un courant de fuite faible. La déposition de Pt sur n-GaN présente un comportement proche de l'idéal avec 1 eV de la hauteur de la barrière schottky résultant. Nickel avec sa fonction de travail de grande taille assure des hauteurs de barrière d'environ 0,66-1 eV [11].

La stabilité thermique des contacts Schottky est le prochain point très important pour le fonctionnement du dispositif pratique. Les limites thermiques de la plupart des métaux sont entre 300-600 ° C, à savoir 400 ° C pour le Pt, 575 ° C Au et 600 ° C pour Ni [13].

Dans [14], il a été démontré que recuit thermique à 500 ° C pendant 5min est plus efficace avec Ni / Pt / Au qu'avec Ni / Au et Pt / Au pour obtenir une haute qualité du contact Schottky.

AlGa_xN / GaN HEMT ont été fabriqués en utilisant Ni / Pt / Au contact de la grille; une réduction de la fuite de la grille en cours en tant que quatre ordres de grandeur a été enregistrée avec succès par un recuit thermique sans dégrader la transconductance du transistor.

Pour déterminer comment une barrière métal-semi conductrice est formée, il faut d'abord connaître les propriétés des semi-conducteurs eux-mêmes. Le système matériel

de GaN se comporte très différemment par rapport aux autres semi-conducteurs classiques tels que Si ou GaAs en raison du haut champ de polarisation qui existe dans ces matériaux. Plusieurs techniques expérimentales sont disponibles avec lesquelles la hauteur de la barrière et le facteur d'idéalité peuvent être déterminés à partir des mesures :

- Méthode de courant/tension.
- Méthode de capacité/tension.
- Méthode de photoémission.

Cette dernière technique est la plus efficace et précise.

1- 5- Effets limitatifs dans les HEMTs GaN :

L'effet fondamental d'un transistor à effet de champ est la source de courant I_{ds} commandée par la tension de grille. Cependant des effets dispersifs limitent le fonctionnement des transistors.

Le courant de collapse dans les transistors HEMT de AlGa_N/Ga_N est l'un des sujets les plus passionnants de ces dernières années. Il s'agit d'une dispersion RF dont la puissance de sortie obtenue à partir d'un appareil à la fréquence micro onde est plus petite que celle basée sur des caractéristiques DC. Cela peut être expliqué par la présence des défauts dans l'épitaxie et à la surface, et en particulier la présence d'impuretés dans le réseau cristallin, la présence des densités élevées de dislocations, qui sont des défauts cristallographiques, ou l'existence des liaisons pendantes aux surfaces libres des transistors.

Le processus de transfert de charge dans ces niveaux est trop lent pour suivre le signal à haute fréquence, donc les électrons se retrouvent piégés [15]. Cela perturbe les charges équilibrées dans le gaz d'électron 2DEG et réduit le nombre d'électrons de conduction disponibles. Ce qui mène à une diminution de courant de drain avec l'augmentation de la tension de grille, limitant ainsi la puissance de sortie du dispositif. En conséquence le courant de collapse constitue un obstacle important dans la simulation de la performance du dispositif.

1- 5- 1- Courant de collapse lié aux pièges-buffer (phénomène de Drain-lag)

Il est observé lors d'un changement brusque de la tension de drain, c'est une réduction significative du courant de drain appelé drain-lag.

Le même phénomène se produit pour les MESFETs de Ga_N [16]. En plus de l'illumination, les mesures effectuées à des températures élevées ont également diminué le courant de collapse. L'origine de ce phénomène a été attribuée aux électrons-chauds (hot-electron) piégés dans la couche buffer de Ga_N.

Pour déterminer les propriétés des pièges responsables de courant de collapse dans les transistors MESFETs de Ga_N, la technique spectroscopique a été utilisée [17]. Le courant drain-source est mesuré en l'obscurité et sous illumination par la lumière monochromatique et la fonction repense a été calculée. Les mêmes auteurs ont montré que cette fonction repense est proportionnelle à la photo ionisation section des pièges en régime linéaire du fonctionnement du transistor et les mesures sont effectuées à une excitation optique faible [18]. Pour d'autres mesures de différence de courant en fonction de l'intensité de la lumière, deux pièges distinctifs ont pu être isolés dans le buffer Ga_N [19].

Avec l'utilisation de la technique photo ionisation, il a été démontré que les pièges entraînant le courant de collapse dans les HEMTs de AlGa_N/Ga_N ont les mêmes niveaux d'énergie que ceux des MESFETs de Ga_N [20]. ceci indique que ces pièges se trouvent dans la couche de buffer.

Les mesures du courant de collapse pour les HEMTs de AlGa_N/Ga_N montrent que l'effet est plus marqué dans les dispositifs qui ont un buffer semi-isolant au lieu d'un conducteur [15].

En outre, les traitements de surface par exemple la passivation avec SiN_x, n'a pas d'influence sur le courant de collapse. Il est soutenu que la nature très résistante de la couche buffer peut être causée par des pièges qui sont également responsables du courant de collapse.

Il est démontré la corrélation entre la pression de la croissance de la couche buffer, l'incorporation du carbone et la densité des pièges profonds (2.85 eV) [21]. Plus la couche buffer à des pressions relativement faible (<50Torr) plus l'incorporation du carbone augmente. Des travaux ont montré que le carbone peut agir comme un

accepteur profond et par conséquent peut compenser les donneurs dans le matériel type N [22].

La technique des mesures (SIMS) (Secondary ion mass spectroscopy) indiquent une forte corrélation entre la concentration des pièges profonds (2.85 eV) et la concentration du carbone dans la couche de buffer. La concentration des pièges de surface (1.8eV) a augmenté progressivement avec pressions de croissance inférieure [21].

Pour les transistors HEMTs de AlGaIn/GaN, le courant de collapse et souvent observé à des températures basses. Cet effet a été attribué au piégeage des électrons dans le centre DX dans la couche AlGaAs Si dopé [23]. Pour les HEMTs AlGaIn / GaN, l'oxygène est connu pour provoquer les centre DX comme des défauts dans la couche AlGaIn [24].

L'utilisation de la technique (DLTS), des pièges dans les structures AlGaIn / GaN avec une énergie d'activation de 0.28eV ont été extraits [25]. Toutefois, les auteurs ont conclu que cette valeur est trop petite pour expliquer le phénomène de courant de collapse.

1- 5- 2- Courant de collapse lié aux pièges-surface (phénomène de Gate-lag)

Dans la littérature un certain nombre de termes sont utilisées pour décrire ce phénomène comme la dispersion DC-RF, courant slump, courant de compression, courant de collapse et le gate-lag. Certains termes sont également utilisés pour décrire le piégeage de charge dans la couche de buffer, ce qui rend parfois difficile de distinguer entre les deux.

La corrélation entre les mesure Rf de la puissance de sortie et la repense du courant drain-source durant les mesures de gate-lage est démontrée [26]. Pour les mesures de gate-lag la tension drain-source est maintenue à une valeur constante tandis qu'une impulsion est appliquée sur la grille. Normalement cette impulsion est fixée pour conduire le transistor d'au dessous le pinch-off à l'état passant (par exemple, $V_{gs} = 0V$). En changeant la valeur de la tension V_{ds} et la tension maximale de l'impulsion de la tension V_{gs} on peut reconstruire les caractéristiques I/V. Ce type de mesure peut fournir une bonne indication de la capacité de puissance d'un dispositif.

Les mesures d'oscillation du courant à large signal sont utilisées pour montrer la compression du courant drain-source dans les transistors HEMTs de AlGaIn/GaN [27].

Cette mesure est un peu comme une mesure de gate-lag, mais dans ce cas une tension sinusoïdale est appliquée sur la grille au lieu d'une impulsion. Le maximum d'oscillation du courant drain-source a montré une fréquence de transition dans la gamme kHz. En plus de l'oscillation en cours, la transconductance et la capacité de grille (capacité avec drain et source court-circuitées) a montré un comportement similaire. Une réduction jusqu'à 50% pourrait être vue dans les hautes fréquences. La même technique de mesure a été utilisée dans [28] pour montrer que cette fréquence de transition peut varier de plusieurs ordres de grandeur pour les différents appareils allant de 10^{-4} à 10^{10} Hz.

De lentes réponses transitoires du courant drain-source ont été observées dans [29] après que le dispositif ait été souligné pendant plusieurs minutes, en appliquant différentes tensions grille-source et une tension drain-source à zéro. Après stress, le dispositif a été polarisé à $V_{gs} = 0V$ et $V_{ds} = 0.1V$ et la réponse courant drain-source a été mesurée. Une lente transitoire réponse a été mesurée sur l'ordre de quelques minutes. L'amplitude de la réduction de courant a augmenté avec l'ampleur et le temps de polarisation de grille-source de stress appliquée avant la mesure.

Il est démontré que par passivation des HEMTs avec une couche de 350nm SiN_x , la puissance de sortie micro-ondes de ces dispositifs pourrait être augmentée jusqu'à 100% [30].

La transconductance, le courant drain-source maximum et la tension de breakdown ont augmenté de 10, 20 et 25% respectivement, tandis que la tension pinch-off a montré seulement un changement marginal de 0.25V. La couche SiN_x a provoqué une augmentation de la capacité grille-drain, qui conduit à son tour à des valeurs inférieures pour le rendement petits signal, f_T et f_{max} . Des constatations similaires ont été signalées dans d'autres publications [31, 32].

En utilisant les mesures gate-lag, il est montré que le maximum actuel d'un dispositif non passivé peut être aussi bas que 10% de la valeur qui est obtenue après passivation [15].

Une mesure de courant à grand signal ou le transistor est polarisé en saturation et en pinch-off a été effectué [33]. La forme d'onde du courant drain-source a montré une amplitude décroissante avec le temps. Cette décroissance a été attribuée à la formation d'une grille virtuelle causée par le piégeage des électrons dans des états de surface dans la région entre la grille et le drain.

Ces électrons peuvent être injectés à partir du métal de grille, un processus qui est facilité par le grand champ électrique au côté de drain bord de la grille. Les électrons piégés épuisent le canal limitant l'oscillation actuelle complète qui peut être obtenue.

L'application d'une polarisation élevée de drain source conduit à une rapide formation de la grille virtuelle et une petite oscillation actuelle, tandis que l'illumination UV annule la formation de la grille virtuelle. La population des électrons à l'état stationnaire de la grille virtuelle est déterminée par les constantes de temps des processus de piégeage, le transport latéral des électrons pour les pièges, et la fréquence du signal appliquée. Si la fréquence appliquée est bien au-dessus de ces constantes, les mesures à grand signal montreront une oscillation actuelle limitée, tandis que des mesures à petit signal peuvent ne rien révéler. Cette dernière est la raison pour laquelle les bonnes valeurs f_t et f_{max} ont été rapportées pour les dispositifs qui souffrent de cet effet.

La technique SKPM (scanning Kelvin probe microscopy) [34] a été utilisée pour étudier le potentiel de surface au cours de mesures au polarisation de vieillissement [35]. Le Changement dans la hauteur de la barrière de surface à nu (égal à l'évolution du potentiel de surface avec un signe négatif), peut être contrôlée à la fois dans le temps et dans l'espace en utilisant cette technique. Si la surface intervient en provoquant la diminution de la 2DEG, la charge dipôle à travers la couche barrière AlGaIn sera affectée et directement liée à la densité 2DEG à l'interface AlGaIn / GaN. Une modification de la charge dipolaire à travers la barrière AlGaIn, va changer la position de la bande de conduction à la surface par rapport au niveau de référence de Fermi dans la masse. Les transitoires du courant drain source ont été enregistrées à $V_{ds}= 1V$ et $V_{gs}=0V$. Préalablement à la mesure, le dispositif a été vieilli ($V_{ds} = 20V$ et V_{gs} au dessous de pinch-off) pour 2min. Le courant drain-source montre un rétablissement lent par rapport aux valeurs avant le vieillissement.

Les mesures simultanées avec la technique SKPM montrent une corrélation directe entre le transitoire courant drain-source et le transitoire observé dans le potentiel de surface. De plus, les variations de potentiel de surface ont été principalement situées dans la région de grille-drain. En outre présente la possibilité que les électrons occupent les états de surface dans la région de grille-drain en formant ainsi une grille virtuelle.

Il a été allégué que, puisqu'il n'y avait pas de courant circulant lors de la polarisation de vieillissement, des électrons de la grille sont injectés dans les états de surface. Ce processus est facilité par des champs électriques élevés sous des conditions de pinch-off. Les mesures indiquent que la plupart des effets viennent de la différence de tension de chute à l'intérieur de $0,2 \mu\text{m}$ à partir de la grille [34]. La réalisation des mesures sous illumination UV montre l'absence de la formation d'une grille virtuelle. Des mesures effectuées à des températures élevées ou sur des dispositifs avec la passivation SiNx, montrent une réduction significative de la grandeur de la transitoire. Les auteurs affirment que le même effet est responsable de la réduction de la puissance de sortie RF souvent rencontrée dans les HEMTs de AlGaIn / GaN.

Bien que de nombreux groupes ont rapporté des améliorations significatives des performances du dispositif après passivation avec SiNx, il n'existe pas de cadre général encore par lequel cet effet peut être expliqué.

Dans [36], les mesures DLTS ont été réalisées sur des HEMTs AlGaIn / GaN HEMT sans passivation pour montrer la présence de deux pièges. Après passivation, les DLTS signalent une réduction significative des pièges dominants. Ceci implique que l'effet de la passivation avec SiNx est de réduire la densité des états de surface, ou au moins la densité des pièges provoquant le signal DLTS.

D'autres auteurs soutiennent que c'est la nature des changements des états d'interface ou le Si qui est constituée en tant que donneur peu profond [33]. La charge positive autour du canal des électrons peut même être installée dans la couche de passivation, où elle se fige [37].

Toutefois, cette couche de passivation pourrait même introduire des niveaux de pièges qui ont été identifiés dans l'apparition de chute de puissance dans les HEMTs de puissance de AlGaAs / GaAs [38]. La couche de passivation peut aussi empêcher la fixation des adsorbats ioniques à la surface [33]. La charge de ces adsorbats pourrait également conduire à la formation d'une grille virtuelle.

Non seulement le SiNx est considéré comme un bon candidat pour la passivation, d'autres matériaux tels que l'oxyde de scandium (Sc₂O₃) et l'oxyde de magnésium (MgO) ont également montré des résultats prometteurs [39]. SiNx présente l'inconvénient de contenir de l'hydrogène atomique, qui pourrait se propager dans la couche AlGaIn ou dans le métal de grille sur de longues périodes de fonctionnement du dispositif. Alors que ces autres matériaux n'ont pas ce problème [40].

1-5- 3 Effet Kink

L'effet kink a été observé dans différents types des transistors à effet de champ (FET) [41-44], y compris AlGaN / GaN HEMT [45-51].

L'effet kink dans les transistors à haute mobilité d'électrons (HEMT) à base de GaAs ou de InP est largement décrit [52-56] et considéré comme une augmentation brusque du courant de drain à une certaine tension drain-source qui résulte haute conductance de drain et une compression de gm, ce qui conduit à une réduction de gain de tension et une mauvaise linéarité. Dans ces dispositifs, il est suggéré que les pièges pourraient provoquer le décrochement: les charges piégées dans le buffer ou dans l'isolant, conduit à un changement dans la tension de seuil [57, 58]. D'autre part, les simulations [59], ainsi que l'émission de lumière, et les mesures expérimentaux [60-62] ont suggéré un lien entre l'ionisation par impact et l'effet kink, de même que le début du décrochement coïncide fortement avec le début de l'ionisation par impact dans les dispositifs considérés [52].

Récemment, Lin et al. [48] ont suggéré que l'effet kink dans les HEMT de AlGaN / GaN avec passivation de Si₃N₄ a été induit par effet de piégeage à température cryogénique, mais l'effet de l'ionisation par impact n'a pas été écarté; puisque l'ionisation par impact est difficile à observer en matière de GaN ou AlGaN en raison de leurs bandes interdites larges et basses caractéristiques du taux d'ionisation. Les corrélations entre l'effet kink et l'ionisation par impact ont été démontrées par Brar et al. et Dyakonova et al., où le champ électrique spécifique de 2.1×10^6 V / cm a été obtenue [63, 64]. L'effet kink observé dans les caractéristiques (I/V) est généralement attribué à l'ionisation par impact dans le canal de conduction, ou aux pièges de surface ou du buffer. Peu importe l'origine de cet effet, le mécanisme devrait avoir une forte dépendance vis-à-vis de la température. À cet égard, les auteurs de [65] ont discuté de l'effet kink dans les HEMTs de GaN dans la marge de température 100K à 300K en analysant les réponses transitoires des dispositifs. Sur la base de cette approche, ils ont observé que le kink a été associée à la constante de temps du mécanisme de piégeage et il est plus important à des températures cryogéniques. De plus, par extraction des courants des trous de grille ils ont suggéré que, en plus de l'effet de piégeage contribué à

cet effet, l'ionisation par impact dans une certaine mesure joue également un rôle à des températures cryogéniques.

Cuerdo et al. [49] ont rapporté que le traitement par plasma fluor pourrait introduire des pièges peu profonds sous et autour de la grille et provoquer l'effet kink dans les HEMTs AlGa_N / Ga_N à température cryogénique. Meneghesso et al. [50], [51] ont suggéré que le point d'inflexion pourrait être induit par l'ionisation par impact des électrons piégés comme accepteurs dans des niveaux de profondeur avec des énergies de $\sim 0,9$ eV au-dessus de la bande de valence de la couche buffer de Ga_N. Maojun Wang et al [66] ont suggéré que l'effet kink peut être induite par le piégeage d'électrons chauds assistés par le champ de piégeage par des pièges type donneurs dans la couche buffer de Ga_N. L'énergie d'activation des pièges responsables de l'effet kink est à l'ordre de 589 ± 67 meV en fonction de la température des mesures transitoires.

I- 6- Conclusion

Les HEMTs sont des dispositifs électroniques opérant à des hautes fréquences avec des vitesses très élevées grâce au matériau de base approprié. Le matériau Ga_N de structure hexagonal est un candidat prometteur pour ces transistors grâce à ses propriétés physiques et électriques remarquables. Le Ga_N est un matériau fortement ionique ce qui donne lieu à une polarisation spontanée, si une contrainte biaxiale est appliquée dans le plan (0001) pour la structure Wurtzite, une polarisation piézoélectrique est apparue. Cette polarisation crée une densité de charge qui permet la formation de 2DEG à l'interface de l'hétérostructure AlGa_N/Ga_N. Les propriétés piézoélectronique de ce matériau lui permettent de meilleures potentialités en courant maximum, ce qui accroît ses potentialités pour la puissance.

Les HEMTs à base de Ga_N présentent de nombreux avantages (tension de claquage élevée, fonctionnement dans le domaine des hyperfréquences, excellente conductivité thermique,...) en tant que dispositifs électroniques destinés à fonctionner à haute température et à haute puissance. Leurs performances sont affectées par divers effets parasites comme des effets de pièges, l'effet de kink ou encore un courant de fuite au niveau des grilles des transistors. Ces effets seront étudiés en détail dans les chapitres suivants.

Références

- [1] F. Bernardini, V. Fiorentini, and D. Vanderbilt, “Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides”, *Physical Review B*, Vol. 56, pp. R10 024-R10 027, Oct. 1997.
- [2] P.M. Asbeck, E.T. Yu, S.S. Lau, G.J. Sullivan, J. Van Hove and J. Redwing, “Piezoelectric charge densities in AlGaN/GaN HFETs” *Electronics Letters*, vol. 33, no. 14, pp. 1230-1231, Jul. 1997.
- [3] L. Hsu and W. Walukiewicz, “Effects of piezoelectric field on defect formation, charge transfer, and electron transport at GaN/Al_xGa_{1-x}N interfaces” *Applied Physics Letters*, vol. 73, no. 3, pp. 339-341, Jul. 1998.
- [4] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. J. Schaff, L. F. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, M. Stutzmann, W. Rieger and J. Hilsenbeck, “Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and heterostructures” *Journal of Applied Physics*, vol. 85, no. 6, pp. 3222, Mar. 1999.
- [5] F. BERNARDINI, V. FIORENTINI “Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides” *Physical Review B*, Vol. 56, No. 56, October 1997, pages: 10024-10027.
- [6] M. WERQUIN, “Etude théoriques et expérimentales de transistors HEMT’s de la filière Nitrure de Gallium pour les applications de puissance hyperfréquences” Thèse de doctorat soutenue le 14 Décembre 2005, Université des sciences et technologies de Lille.
- [7] F. BERNARDINI, V. FIORENTINI, “Spontaneous versus piezoelectric polarization in III-V nitrides: Conceptual aspects and practical consequences” *Solid State Physics*, Vol. 216, pages: 391-398, 1999.
- [8] N. Vellas, “Etudes Expérimentales de Transistors HFET de la Filière Nitrure de Gallium pour des Application de Puissance Hyperfréquences,” Ph.D. dissertation, Université de Lille, France, 2003.
- [9] S. Ruvimov, Z. Liliental-Weber, J. Washburn, D. Qiao, S.S. Lau, and P.K. Chu, “Microstructure of Ti/Al Ohmic Contacts for n-Al_xGa_{1-x}N,” *Applied Physics Letters*, vol. 73, no. 18, p. 2582, 1998.

- [10] Q.Z. Liu, L.S. Yu, F. Deng, S.S. Lau, Q. Chen, J.W. Yang, and M.A. Khan, "Study of Contact Formation in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ Heterostructures," *Applied Physics Letters*, vol. 71, no. 12, p. 1658, 1997.
- [11] J.H. Edgar, L. Liu, B. Liu, D. Zhuang, J. Chaudhuri, M. Kuball, and S. Rajasingam, "Bulk AlN Crystal Growth: Self-Seeding and Seeding on 6H-SiC Substrates," *Journal of Crystal Growth*, vol. 246, p. 187, 2002.
- [12] Q.Z. Liu and S.S. Lau, "A Review of the Metal-GaN Contact Technology," *Solid-State Electronics*, vol. 42, no. 5, p. 677, 1997.
- [13] E. Monroy et al, "Thermal stability of Pt- and Ni-based Schottky contacts on GaN and $\text{Al}_{0.31}\text{Ga}_{0.69}\text{N}$ ", *Semicond. Sci. Technol.* 17 No 9, L47-L54. September 2002.
- [14] N. Miura et al, "Thermal annealing effects on Ni/Au based Schottky contacts on n-GaN and AlGaIn/GaN with insertion of high work function metal", *Solid-State Electronics* 48 (2004) 689 -695.
- [15] S.C. Binari, K. Ikossi, J.A. Roussos, W. Kruppa, D. Park, H.B. Dietrich, D.D. Koleske, A.E. Wickenden, and R.L. Henry, "Trapping Effects and Microwave Power Performance in AlGaIn/GaN HEMTs," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 48, no. 3, p. 465, 2001.
- [16] S.C. Binari, W. Kruppa, H.B. Dietrich, G. Kelner, A.E. Wickenden, and J.A. Freitas, "Fabrication and Characterization of GaN FETs," *Solid-State Electronics*, vol. 41, no. 10, p: 1549, 1997.
- [17] P.B. Klein, J.A. Freitas, S.C. Binari, and A.E. Wickenden, "Observation of Deep Traps Responsible for Current Collapse in GaN Metal-Semiconductor Field-Effect Transistors," *Applied Physics Letters*, vol. 75, no. 25, p. 4016, 1999.
- [18] P.B. Klein, S.C. Binari, J.A. Freitas, and A.E. Wickenden, "Photoionization Spectroscopy of Traps in GaN Metal-Semiconductor Field-Effect Transistors," *Journal of Applied Physics*, vol. 88, no. 5, p. 2843, 2000.
- [19] G. Meneghesso, A. Chini, E. Zanoni, M. Manfredi, M. Pavesi, B. Boudart, and C. Gaquiere, "Diagnosis of Trapping Phenomena in GaN MESFETs," *International Electron Devices Meeting*, p. 389, 2000.
- [20] P.B. Klein, S.C. Binari, K. Ikossi, A.E. Wickenden, D.D. Koleske, and R.L. Henry, "Investigation of Traps Producing Current Collapse in AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors," *Electronics Letters*, vol. 37, no. 10, p. 661, 2001.
- [21] P.B. Klein, S.C. Binari, K. Ikossi, A.E. Wickenden, D.D. Koleske, and R.L. Henry, "Current Collapse and the Role of Carbon in AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors Grown by Metalorganic Vapor-Phase Epitaxy," *Applied Physics Letters*, vol. 79, no. 21, p. 3527, 2001.

- [22] J. Neugebauer and C.G. Van de Walle, "Defects and Doping in GaN," International Conference on the Physics of Semiconductors, vol. 3, p. 2327, 1995.
- [23] Y. Hori, M. Kuzuhara, N. Samoto, and T. Itoh, "Bias Dependent Collapse and Its Recovery Phenomenon in AlGaAs/GaAs 2DEG FETs at Low Temperatures," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 39, no. 12, p. 2720, 1992.
- [24] M.D. McCluskey, N.M. Johnson, C.G. Van de Walle, D.P. Bour, and M. Kneissl, "Metastability of Oxygen Donors in AlGa_N," Physics Review Letters, vol. 80, no. 18, p. 4008, 1998.
- [25] S. Nozaki, H. Feick, and E.R. Weber, "Compression of the DC Drain Current by Electron Trapping in AlGa_N/Ga_N Modulation Doped Field-Effect Transistors," Applied Physics Letters, vol. 78, no. 19, p. 2896, 2001.
- [26] S.C. Binari, K. Ikossi-Anastasiou, W. Kruppa, H.B. Dietrich, G. Kelner, R.L. Henry, D.D. Koleske, and A.E. Wickenden, "Correlation of Drain Current Pulsed Response with Microwave Power Output in AlGa_N/Ga_N HEMTs," Wide Bandgap Semiconductors for High Power, High Frequency and High Temperature Applications Symposium, vol. 572, p. 541, 1999.
- [27] E. Kohn, I. Daumiller, P. Schmid, N.X. Nguyen, and C.N. Nguyen, "Large Signal Frequency Dispersion of AlGa_N/Ga_N Heterostructure Field Effect Transistors," Electronics Letters, vol. 35, no. 12, p. 1022, 1999.
- [28] I. Daumiller, D. Theron, C. Gaquiere, A. Vescan, R. Dietrich, A. Wieszt, H. Leier, R. Vetury, U.K. Mishra, I.P. Smorchkova, S. Keller, N.X. Nguyen, C. Nguyen, and E. Kohn, "Current Instabilities in Ga_N-Based Devices," IEEE Electron Device Letters, vol. 22, no. 2, p. 62, 2001.
- [29] R. Dietrich, A. Vescan, A. Wieszt, H. Leier, K.S. Boutros, J.M. Redwing, K. Kornitzer, R. Freitag, T. Ebner, and K. Thonke, "Effect of Illumination on the Electrical 127 Characteristics of AlGa_N/Ga_N FETs," Physica Status Solidi A, vol. 176, no. 1, p. 209, 1999.
- [30] B.M. Green, K.K. Chu, M. Chumbes, J.A. Smart, J.R. Shealy, and L.F. Eastman, "The Effect of Surface Passivation on the Microwave Characteristics of Undoped AlGa_N/Ga_N HEMTs," IEEE Electron Device Letters, vol. 21, no. 6, p. 268, 2000.
- [31] J.S. Lee, A. Vescan, A. Wieszt, R. Dietrich, H. Leier, and Y.S. Kwon, "Small Signal and Power Measurements of AlGa_N/Ga_N HEMT with Si₃N₄ Passivation," Electronics Letters, vol. 37, no. 2, p. 130, 2001.
- [32] W. Lu, V. Kumar, R. Schwindt, E. Piner, and I. Adesida, "A Comparative Study of Surface Passivation on AlGa_N/Ga_N HEMTs," Solid-State Electronics, vol. 46, no. 9, p. 1441, 2002.

- [33] R. Vetry, N.Q. Zhang, S. Keller, and U.K. Mishra, "The Impact of Surface States on the DC and RF Characteristics of AlGaIn/GaN HFETs," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 48, no. 3, p. 560, 2001.
- [34] G. Koley, V. Tilak, and L.F. Eastman, "Slow Transients Observed in AlGaIn/GaN HFETs: Effects of SiN_x Passivation and UV Illumination," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 50, no. 4, p. 886, 2003.
- [35] G. Koley and M.G. Spencer, "Surface Potential Measurements on GaN and AlGaIn/GaN Heterostructures by Scanning Kelvin Probe Microscopy," *Journal of Applied Physics*, vol. 90, no. 1, p. 337, 2001.
- [36] A.V. Vertiatchikh, L.F. Eastman, W.J. Schaff, and T. Prunty, "Effect of Surface Passivation of AlGaIn/GaN Heterostructure Field-Effect Transistor," *Electronics Letters*, vol. 38, no. 8, p. 388, 2002.
- [37] T.R. Prunty, J.A. Smart, E.M. Chumbes, B.K. Ridley, L.F. Eastman, and J.R. Shealy, "Passivation of AlGaIn/GaN Heterostructures with Silicon Nitride Transistors," *Proceedings of the IEEE/Cornell High-Performance Devices Conference*, p. 208, 2000.
- [38] J.C.M. Hwang, "Relationship between Gate Lag, Power Drift, and Power Slump of Pseudomorphic High Electron Mobility Transistors," *Solid-State Electronics*, vol. 43, no. 9, p. 1325, 1999.
- [39] B. Luo, J.W. Johnson, B.P. Gila, A.H. Onstine, C.R. Abernathy, F. Ren, S.J. Pearson, A.G. Baca, A.M. Dabiran, A.M. Wowchack, and P.P. Chow, "Surface Passivation of AlGaIn/GaN HEMTs using MBE-grown MgO or Sc₂O₃," *Solid-State Electronics*, vol. 46, no. 4, p. 467, 2002.
- [40] B. Jacobs, "Towards Integrated AlGaIn/GaN Based X-Band High-Power Amplifiers", PhD thesis, Eindhoven University of Technology, 2004.
- [41] T. Ushiki, K. Kotani, T. Funaki, K. Kawai, and T. Ohmi, "New aspects and mechanism of kink effect in static back-gate transconductance characteristics in fully-depleted SOI MOSFETs on high-dose SIMOX wafers," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 47, no. 2, pp. 360–366, Feb. 2000.
- [42] K. Horio and K. Usami, "Analysis of kink-related backgating effect in GaAs MESFET," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 16, no. 6, pp. 277–279, Jun. 1995.
- [43] M. H. Somerville, A. Ernst, and J. A. del Alamo, "A physical model for the kink effect in InAlAs/InGaAs HEMTs," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 47, no. 5, pp. 922–930, May 2000.
- [44] A. Mazzanti, G. Verzellesi, C. Canali, G. Meneghesso, and E. Zanoni, "Physics-based explanation of kink dynamics in AlGaAs/GaAs HFETs," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 23, no. 7, pp. 383–385, Jul. 2002.

- [45] B. Brar, K. Boutros, R. E. DeWames, V. Tilak, R. Shealy, and L. Eastman, "Impact ionization in high performance AlGaN/GaN HEMTs," in Proc. IEEE Lester Eastman Conf. High Perform. Devices, 2002, pp. 487–491.
- [46] S. Nuttinck, E. Gebara, J. Laskar, and M. Harris, "Floating-body effect in AlGaN/GaN power HEMT," in Proc. GaAs IC Symp., pp. 33–36, 2002.
- [47] H. F. Sun and C. R. Bolognesi, "Anomalous behavior of AlGaN/GaN heterostructure field-effect transistors at cryogenic temperature: From current collapse to current enhancement with cooling," Appl. Phys. Lett., vol. 90, no. 12, p. 123 505, Mar. 2007.
- [48] C. H. Lin, W. K. Wang, P. C. Lin, C. K. Lin, Y. J. Chang, and Y. J. Chan, "Transient pulsed analysis on GaN HEMTs at cryogenic temperature," IEEE Electron Device Lett., vol. 26, no. 10, pp. 710–712, Oct. 2005.
- [49] R. Cuerdo, Y. Pei, Z. Chen, S. Keller, S. P. DenBaars, F. Calle, and U. K. Mishra, "The kink effect at cryogenic temperatures in deep submicron AlGaN/GaN HEMTs," IEEE Electron Device Lett., vol. 30, no. 3, pp. 209–212, Mar. 2009.
- [50] G. Meneghesso, F. Zanon, M. J. Uren, and E. Zanoni, "Anomalous kink effect in GaN high electron mobility transistors," IEEE Electron Device Lett., vol. 30, no. 2, pp. 100–103, Feb. 2009.
- [51] G. Meneghesso, F. Rossi, G. Salviati, M. J. Uren, E. Muñoz, and E. Zanoni, "Correlation between kink and cathodoluminescence spectra in AlGaN/GaN high electron mobility transistors," Appl. Phys. Lett., vol. 96, no. 26, p. 263 512, Jul. 2010.
- [52] W. Kruppa and J. B. Boos, "Examination of the kink effect in InAlAs/InGaAs/InP HEMTs using sinusoidal and transient excitation," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 42, no. 10, pp. 1717–1723, Oct. 1995.
- [53] A. N. Ernst, M. H. Somerville, and A. del Alamo, "Dynamics of the kink effect in InAlAs/InGaAs HEMTs," IEEE Electron Device Lett., vol. 18, no. 12, pp. 613–615, Dec. 1997.
- [54] T. Akazaki, H. Takayanagi, and T. Enoki, "Kink effect in an InAs-inserted-channel InAlAs/InGaAs inverted HEMT at low temperature," IEEE Electron Device Lett., vol. 17, no. 7, pp. 378–380, Jul. 1996.
- [55] R. T. Webster, S. Wu, and A. F. M. Anwar, "Impact ionization in InAlAs/InGaAs/InAlAs HEMTs," IEEE Electron Device Lett., vol. 21, no. 5, pp. 193–195, May 2000.
- [56] H. Somerville, A. del Alamo, and W. Hoke, "Direct correlation between impact ionization and the kink effect in InAlAs/InGaAs HEMTs," IEEE Electron Device Lett., vol. 17, no. 10, pp. 473–475, Oct. 1996.

- [57] A. S. Brown, U. K. Mishra, C. S. Chou, C. E. Hooper, M. A. Melendes, M. Thompson, L. E. Larson, S. E. Rosenbaum, and M. J. Delaney, "AllInAs-GaInAs HEMT's utilizing low-temperature AllInAs buffers grown by MBE," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 10, no. 12, pp. 565-568, 1989.
- [58] T. Zimmer, D. Ouro Bodi, J. M. Dumas, N. Labat, A. Touboul, and Y. Danto, "Kink effect in HEMT structures: A trap-related semi-quantitative model and an empirical approach for spice simulation," *Solid-State Electron.*, vol. 35, no. 10, pp. 1543-1548, 1992.
- [59] K. Kunihiro, H. Yano, N. Goto, and Y. Ohno, "Numerical analysis of kink effect in HJFET with a hetero-buffer layer," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 40, no. 3, pp. 493-497, 1993.
- [60] G. G. Zhou, A. F. Fischer-Colbrie, and J. S. Harris, "I-V kink in InAlInGaAs MODFET's due to weak impact ionization in the InGaAs channel," in *6th Int. Conf. on InP and Rel. Mater.*, Mar. 1994, pp. 435-438.
- [61] T. Suemitsu, T. Enoki, Y. Ishii, "Body contacts in InP-based In-AlInGaAs HEMT's and their effects on breakdown voltage and kink suppression," *Electron. Lett.*, vol. 31, pp. 758, 1995.
- [62] B. Brar and H. Kroemer, "Influence of impact ionization on the drain conductance of InAs/AlSb quantum well HFET's," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 16, no. 12, pp. 548-550, 1995.
- [63] B. Brar, K. Boutros, R. E. DeWames, V. Tilak, R. Shealy, and L. Eastman, "Impact ionization in high performance AlGaIn/GaN HEMTs," in *Proc. IEEE Lester Eastman Conf.*, Aug. 2002, pp. 487-491.
- [64] N. Dyakonova, A. Dickens, M. S. Shur, R. Gaska, and J. W. Yang, "Temperature dependence of impact ionization in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 72, no. 20, pp. 2562-2564, May 1998.
- [65] Ching-Hui Lin, Wen-Kai Wang, Po-Chen Lin, Cheng-Kuo Lin, Yu-Jung Chang, and Yi-Jen Chan, "Transient Pulsed Analysis on GaN HEMTs at Cryogenic Temperatures," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 16, no. 10, pp. 710-712, 2005.
- [66] Maojun Wang and Kevin J. Chen, Senior Member, IEEE, "Kink Effect in AlGaIn/GaN HEMTs Induced by Drain and Gate Pumping", *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, VOL. 32, NO. 4, APRIL 2011.

Chapitre 2

Caractérisation et étude de la fiabilité des transistors HEMT de GaN

II-1- Introduction

L'analyse des principaux critères technologiques (physiques et électriques) des matériaux de large bande interdite, et spécialement du Nitrure de Gallium, GaN, montre que ce dernier est très prometteur pour les applications de télécommunications et radar. Pour cette raison, beaucoup de chercheurs ont commencé à s'intéresser à l'étude de la fiabilité des HEMT GaN [1-15].

L'étude des caractérisations électriques permet d'émettre des hypothèses sur l'origine des phénomènes parasites. Dans cette optique, les caractérisations électriques effectuées, dans mes travaux de recherche, concernent des mesures I-V statiques et en régime pulsé, à température ambiante et à basse température. Les composants caractérisés proviennent du projet européen Korrigan. Ce programme de recherche a pour objectif d'évaluer la fiabilité des HEMTs AlGaIn/GaN. Dans le cadre de caractériser les phénomènes parasites avant et après les tests de vieillissement accéléré

qui permet de formuler des hypothèses sur les différents mécanismes de défaillances qui apparaissent durant le processus de vieillissement du composant.

Les mesures I-V en régime pulsé permettent de mettre en évidence l'influence des pièges avant et après vieillissement. La comparaison de ces mesures avec les mesures statiques permet de souligner les phénomènes d'auto-échauffement du composant étudiés.

Les mécanismes appelés pour expliquer les effets de dégradation comprennent: l'accumulation de charge négative dans les pièges de surface du à l'effet tunnel de la grille sous stress à l'état bloqué et pulsé court terme (off-state and pulsed short-term stresses) [1]; les électrons chauds piégés dans la barrière AlGa_N et la génération de piège à l'interface de l'AlGa_N-Ga_N après une heure de stress à canal ouvert [2]; le piégeage des électrons de la grille injectés dans la couche AlGa_N, plus le piégeage des trous chauds et la génération de piège dans la couche AlGa_N et à l'interface de AlGa_N-Ga_N après une heure de stress à haute courant inversée [2]; les électrons chauds piégés à la surface et les pièges à barrière après stress RF [10-12]; les modifications thermiques induites du contact Schottky, après DC stress à canal ouvert [16]; la génération des pièges provoquée par des électrons chauds après 10 -340 h de stress DC à canal ouvert [8]; la génération des pièges dans la région d'accès de drain après 150 heures [9-14] et 3000 heures [13] sous et hors DC stress ; la génération des défauts et des pièges dans la région d'accès de la barrière de drain comme une conséquence de l'amélioration de déformation induite par un champ électrique et à la détente subséquente [15].

La caractérisation des effets de pièges en mode pulsé est présentée dans ce chapitre dans le but d'étudier l'influence de phénomène de vieillissement sur ces effets et la dégradation des composants étudiés. En fin une étude sur l'influence de la température sur les effets de pièges.

II-2- Composants caractérisés :

Dans ce chapitre les composants caractérisés sont de la plaque AEC1303 et sont basés sur une hétérojonction Al_xGa_{1-x}N/GaN. Les HEMTs sous test possèdent huit doigts de grille de 75 μm chacun soit une largeur de grille 0.5 μm. Les caractéristiques de cette technologie est résumé dans la table 1.

Substrat	SiC
$d_{\text{GaN}} (\mu\text{m})$	1.5
Epaisseur de couche barrière (nm)	22
$x_{\text{Al}}(\%)$	27
Contact ohmique	Ti/Al/Ni/Au
grille	Ni/Au
passivation	SiO ₂ /SiN

Table 1 : structure épitaxiale des composants de la plaque AEC1303

Dans le but d'étudier la fiabilité des transistors HEMT AlGaN/GaN, les composants étudiés dans cette partie de ce travail sont soumis à un processus de vieillissement électrique et thermique à des températures très élevées ($T_1=200^\circ\text{C}$ et $T_2=300^\circ\text{C}$) pendant un temps de 1038 heure.

Le vieillissement des transistors est généralement évalué par la variation de la tension de seuil V_{th} , la réduction de la transconductance g_m et l'augmentation de la densité moyenne des états d'interface sous la grille ce qui mène à la réduction du courant de sortie I_{ds} [18].

II- 3- Caractérisation $I_{\text{ds}}(V_{\text{ds}}, V_{\text{gs}})$

II- 3 -1- caractérisation électrique statique $I_{\text{ds}}(V_{\text{ds}}, V_{\text{gs}})$

La figure 1 présente un réseau $I_{\text{ds}}(V_{\text{ds}}, V_{\text{gs}})$ d'un transistor vierge de la plaque 1303 en polarisation continu DC. La diminution du courant à fort champ électrique est liée à un phénomène d'auto-échauffement et/ou au phénomène de survitesse. Le premier phénomène est lié à l'augmentation des collisions entre les électrons libres et le réseau cristallin entraînant un échauffement du réseau et donc du composant [19]. Ainsi la mobilité électronique diminue induisant une diminution du courant de drain. Ce phénomène d'auto-échauffement se produit généralement à fort courant de drain et à canal ouvert.

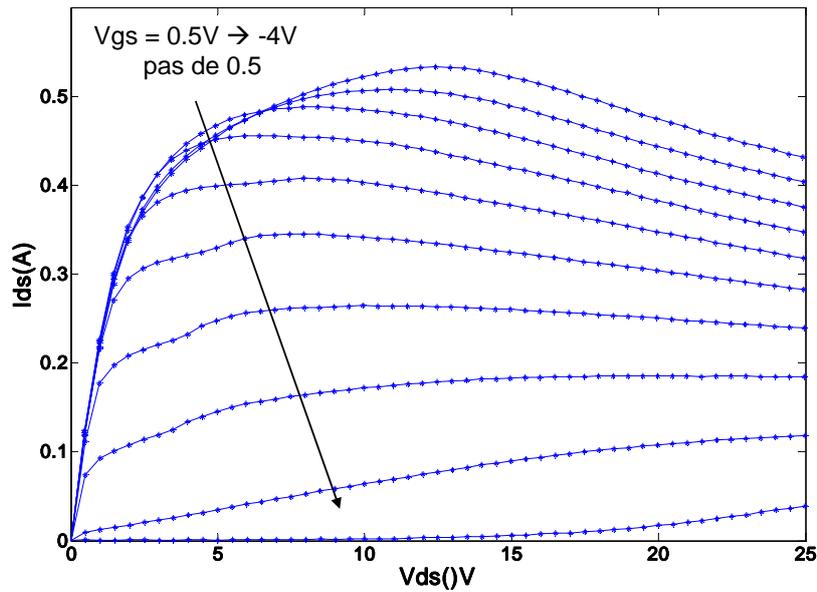


Fig.1 : réseau de sortie $I_{ds}(V_{ds}, V_{gs})$ pour un HEMT de AlGaIn/GaN en DC.

Les effets de l'auto-échauffement diminuent lorsque V_{gs} se rapproche de la tension de seuil. Le second phénomène consiste à un changement de vallée des électrons qui ont acquis suffisamment d'énergie par l'application d'un champ électrique élevé [20-21]. Ce phénomène se produit dans les HEMTs AlGaIn/GaN en raison du faible distance entre le drain et la grille ainsi que des polarisations élevées qui sont appliquées au transistor [22-23]. Il en résulte une augmentation du courant de drain lorsque V_{gs} se rapproche de la tension de seuil, puisque le champ électrique augmente et donc l'énergie des électrons s'accroît. Ainsi la probabilité d'un électron de changer de vallée augmente aussi. I_{DSAT} continue de diminuer à fort champ alors que V_{gs} s'approche de V_{TH} , nous pouvons alors supposer que le phénomène de changement de vallée (les effets de pièges) est un mécanisme important dans les transistors HEMT de AlGaIn/GaN.

Les figures 2 et 3 présentent un réseau $I_{ds}(V_{ds}, V_{gs})$ de deux transistors de la plaque 1303 soumis à l'effet de vieillissement électrique et thermique à deux températures $T1=200^\circ$ et $T2=300^\circ$. On peut observer pour les deux transistors qu'en régime de saturation le courant diminue aussi. Cependant cette baisse de courant n'apparaît que pour V_{gs} proche de 0.

Cette différence de comportement entre les trois transistors peut être attribuée à une différence de conductivité thermique. Les travaux de Benbakhti [24] montrent que

la chaleur se dissipe principalement dans la couche GaN sur substrat SiC, ce qui est le cas des dispositifs étudiés ici, mais aussi dans la barrière AlGa_{0.3}N. Donc la diffusion de la chaleur dans l'épiscouche AlGa_{0.3}N, n'est pas négligeable.

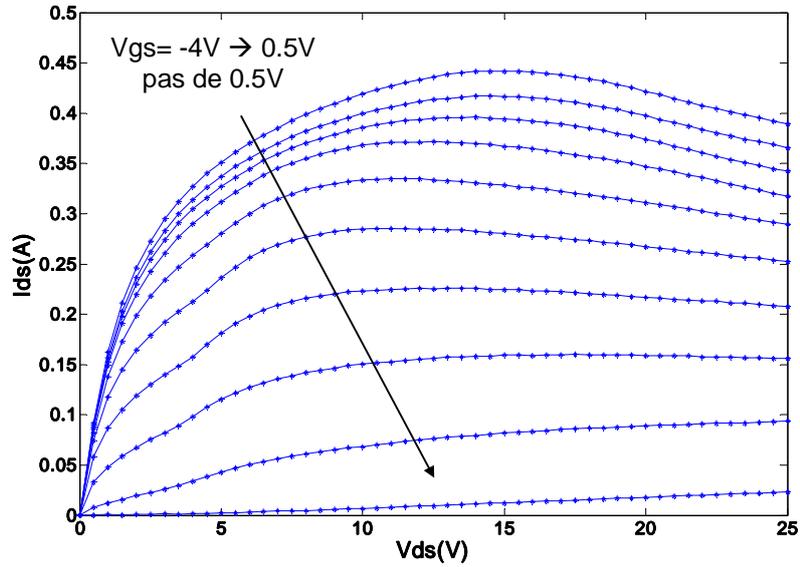


Fig.2 : Réseau de sortie $I_{ds}(V_{ds}, V_{gs})$ pour un HEMT à $T=200^{\circ}\text{C}$ en DC.

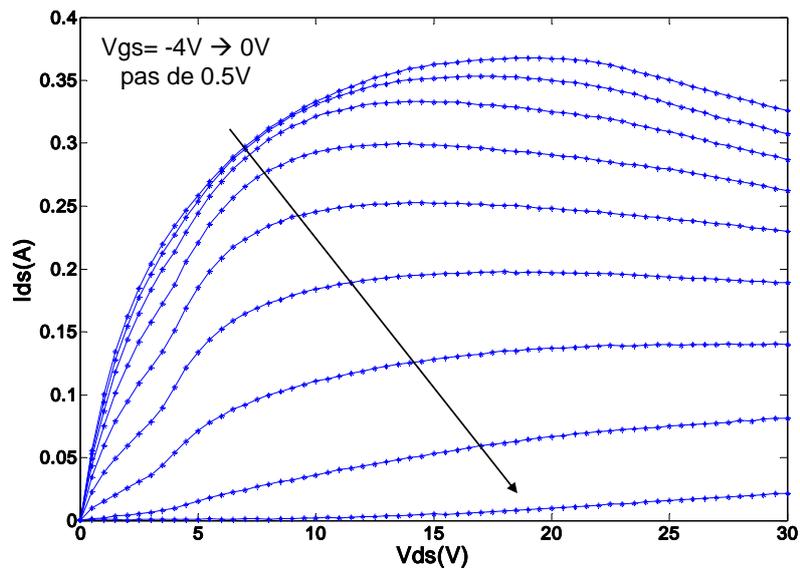


Fig.3 : Réseau de sortie $I_{ds}(V_{ds}, V_{gs})$ pour un HEMT à $T=300^{\circ}\text{C}$ en DC.

Le vieillissement des transistors est généralement évalué par la variation de la tension de seuil, la réduction de la transconductance et l'augmentation de la densité moyenne des états d'interface sous la grille ce qui mène à la réduction du courant de sortie I_{ds} [18].

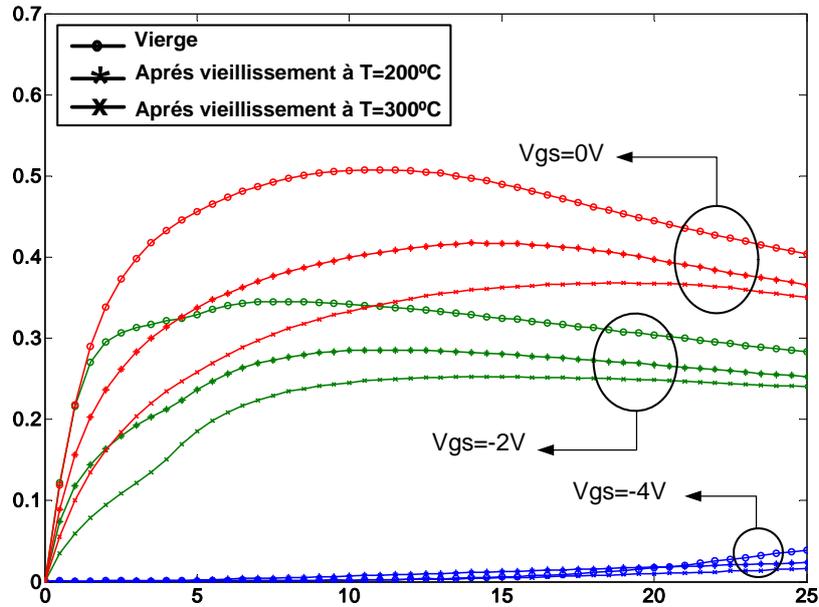


Fig.4 : Réseau de sortie I_{ds} (V_{ds} , V_{gs}) en DC pour trois dispositifs HEMTs vierges et soumis à des processus de vieillissement à $T = 200^{\circ}\text{C}$ et à $T = 300^{\circ}\text{C}$.

La figure 4 illustre la caractéristique I/V en régime DC avant et après vieillissement. Il est remarquable la diminution du courant I_{ds} à haute tension V_{gs} et à faible tension V_{ds} (région linéaire) cette diminution est attribuée en général à l'augmentation de la résistance du drain R_{ds} résultant de piégeage des électrons dans la région d'accès grille-drain du canal [25].

Dans la région de saturation le haut champ électrique masque complètement l'effet de l'augmentation de la résistance d'accès ce qui explique la diminution du courant I_{ds} à haute tension V_{ds} .

De la comparaison des résultats présentés sur la figure 4 il est remarquable que le courant diminue en fonction de la température de vieillissement.

Le tableau 2 présente les valeurs de la résistance de sortie en régime linéaire, R_{ds-lin} , et

saturé, R_{ds-sat} , pour chacun des composants étudiés. R_{ds} est définie par l'équation 1. Elle est calculée en régime ohmique pour une tension de polarisation de drain de 0V à 1V et en régime saturé pour une tension de polarisation de 4V à 6V à $V_{gs}=0V$.

$$R_{ds} = \frac{\Delta V_{ds}}{\Delta I_{ds}} \quad (1)$$

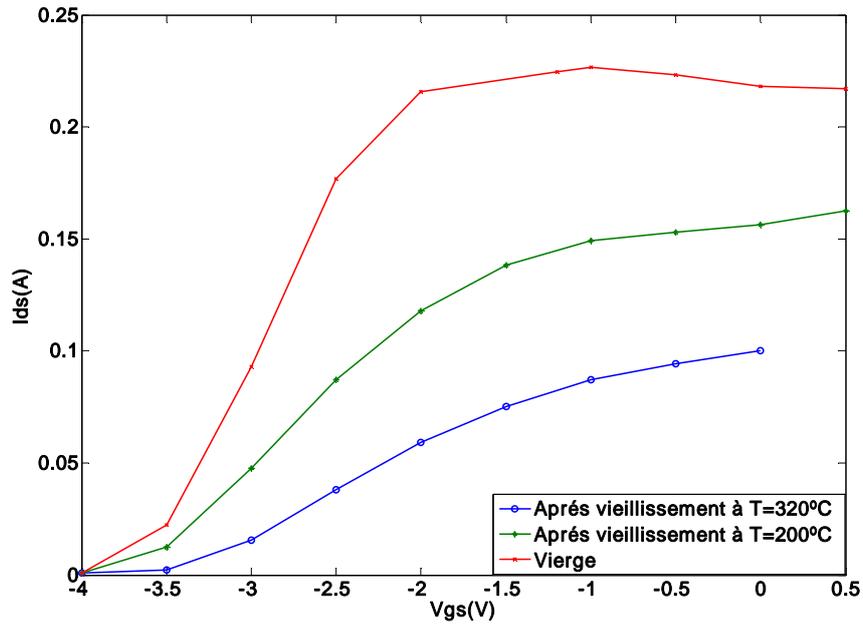
	Vierge	Vieillessement à T=200°	Vieillessement à T=300°
R_{ds-lin}	4.637	6.533	10.140
R_{ds-sat}	50.522	50.122	44.338
I_{DSS}	507.57	417.25	368.07

Table2: Résistance de sortie en régime linéaire (R_{ds-lin}), saturé (R_{ds-sat}) et valeur de courant de saturation (I_{DSS}) pour les transistors étudiés à $V_{gs} = 0V$.

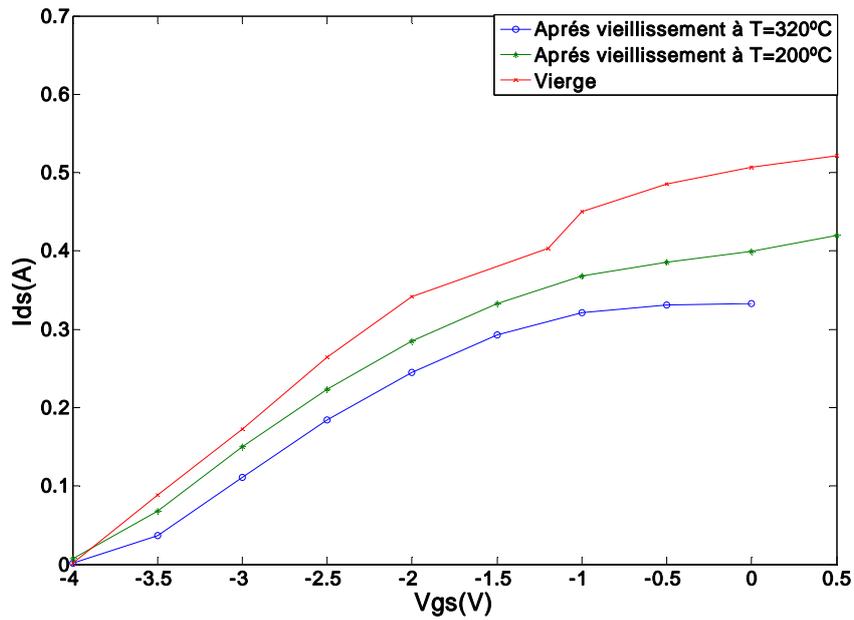
Les HEMTs GaN sont visé principalement pour être utilisé dans les étages amplificateurs des stations de base des réseaux de télécommunication et dans les radars. Il est donc important qu'un maximum de puissance puisse être transmis, et donc nécessaire que R_{ds} soit la plus faible possible. A fin d'obtenir un courant de saturation le plus possible en fonction de V_{ds} , il est intéressant d'avoir R_{ds} en régime de saturation le plus grande possible. Aussi, une grande valeur du courant de saturation I_{DSS} est recherchée. En revanche le courant de saturation du dispositif soumis au vieillissement à T=320° est relativement faible si on le compare a celui du dispositif vierge.

II- 3- 2- Caractéristiques $I_{ds}(V_{gs})$

La caractéristique de transfert $I_{ds}(V_{gs})$ permet de déterminer la tension de seuil, V_{TH} , ainsi que la transconductance, g_m . La figure 5 présente les caractéristiques de transfert à $V_{ds} = 1V$ et $V_{ds} = 10V$ pour des composants étudiés.



a) $V_{ds} = 1V$



b) $V_{ds} = 10V$

Fig.5 : Caractéristiques $I_{ds}(V_{gs})$, à $V_{ds}=1V$ (a) et $V_{ds} = 10V$ (b), des composants étudiés.

La transconductance est définie par l'équation 2 et la tension de seuil est déterminée par la méthode de la tangente.

$$g_m = \frac{\Delta I_{ds}}{\Delta V_{gs}} \quad (2)$$

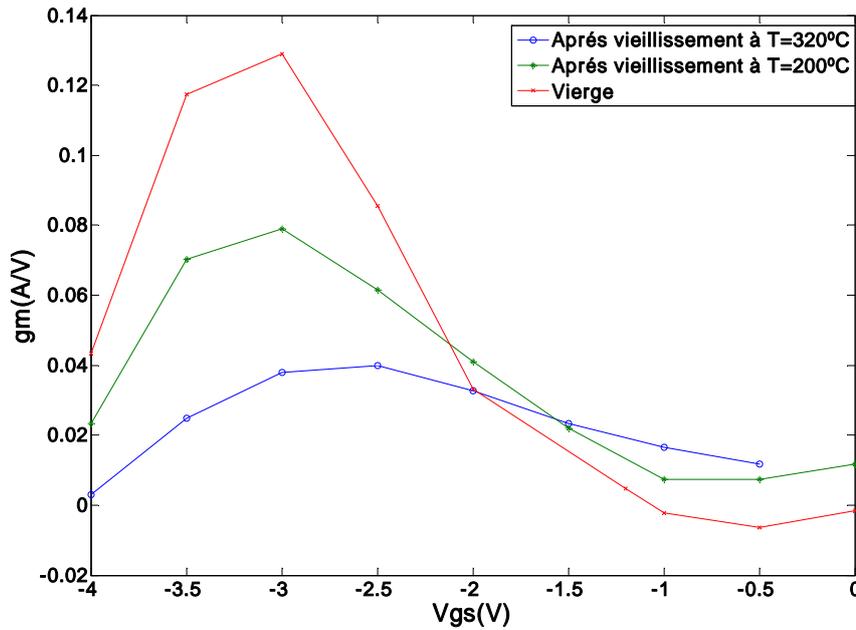


fig.6 : Evolution de g_m en fonction de V_{gs} , à $V_{ds}=1V$ des composants étudiés.

La figure 6 montre l'évolution de g_m , à $V_{ds} = 1V$, pour les trois dispositifs. Pour les applications visées, il est intéressant de disposer d'un courant de drain le plus élevé à une polarisation sur la grille fixée. Ainsi si g_m est élevée, la puissance débitée par le transistor sera plus élevée.

Avec le vieillissement des modes de dégradation apparaît: i) un déplacement positive de la tension V_{TH} figure (5), ii) légère diminution du pic de g_m et iii) chute brutale de g_m à V_{gs} élevés (figure 6).

	T_vierge	T_200°	T_300°
V_{TH} (V_{ds} = 1V)	-3.81	-3.67	-3.56
V_{TH} (V_{ds} = 10V)	-3.97	-3.92	-3.73

Table 3: Tension de seuil, V_{TH} , à $V_{ds} = 1V$ et $10V$ pour les composants étudiés.

La table 3 récapitule les valeurs des tensions de seuil, V_{TH} , pour $V_{ds} = 1V$ et $10V$. La tension de seuil varie peu entre le régime linéaire et saturé. Cette constatation est en accord avec la théorie puisque la hauteur de la barrière Schottky et les charges spontanées et piézoélectriques ne varient pas en fonction de V_{ds} . En fonction de vieillissement on remarque un déplacement positif de la tension de seuil V_{TH} cela peut revenir à la dégradation du contact de grille induit thermiquement [26], la détention des électrons sous la grille lorsqu'on applique une tension négative V_{gs} [27], ou une combinaison des deux effets.

II- 3- 3- Caractéristiques I_{gs} (V_{gs} , V_{ds})

La caractéristique de grille permet d'évaluer la qualité du contact Schottky de grille. En fonction de la forme de la caractéristique ainsi que des ordres de grandeur du courant de grille, il est possible d'extraire la hauteur de la barrière du contact de grille et d'évaluer le courant de fuite du composant.

Pour des applications RF, il est intéressant d'avoir le courant de grille le plus faible possible car il a tendance à augmenter le bruit du composant dans cette gamme de fréquence.

La figure 7 compare les caractéristiques de grille pour les deux dispositifs étudiés

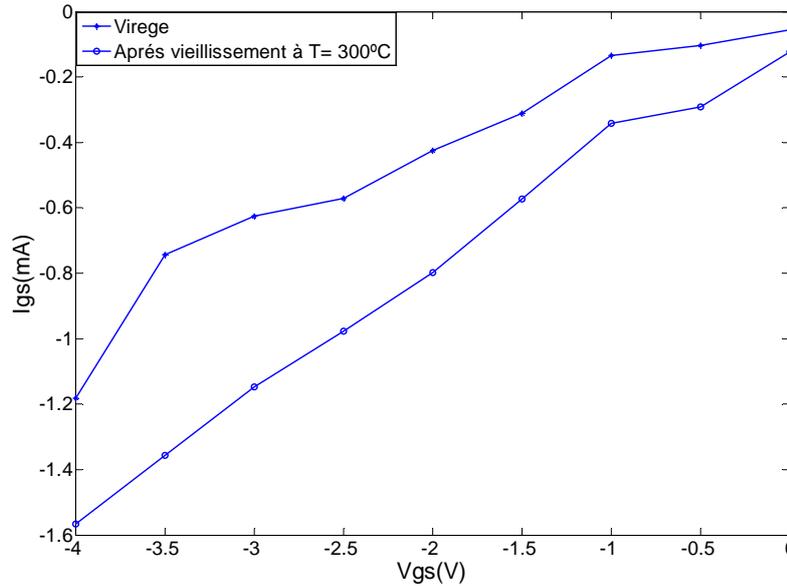


Fig. 7. Courant inverse de la grille en fonction de V_{gs} en DC à $V_{ds}=10V$ pour le transistor vierge et le transistor soumis au vieillissement à T2.

On peut remarquer une diminution des I_g en polarisation négative en tant que résultat du vieillissement. Ceci est illustré dans la figure 7. Deux phénomènes peuvent contribuer à cette baisse de l' I_g : i) une diminution de la conductance de la surface entre la grille et le drain, ii) une réduction du champ électrique grille-drain qui menacent l'injection d'électrons de la grille.

Le premier effet peut en effet conduire à la génération de pièges accepteurs profonds, compensant les niveaux existants et des donneurs relativement peu profonds et donc menacer la densité surfacique d'électrons libres entre la grille et le drain. Le second peut être due à la réduction de la charge ionisée positif. Ceci peut augmenter l'épaisseur de la barrière de la grille et adoucir le champ électrique de crête au bord de la fin de drain dans l'interrupteur de la grille. Le dernier mécanisme est à bien des égards similaires à "breakdown walkout" un effet bien connu du stress par le chauffage des électrons observés dans les FETs GaAs et attribués à l'augmentation de la densité de pièges sur la surface [28]. Le même effet pourrait aussi être induit par la concentration d'électrons et de l'accumulation dans les niveaux profonds existant sur la surface.

II- 4- Mesures I/V en régime pulsé

II- 4- 1- Intérêt des mesures I/V en régime pulsé

Les mesures pulsées permettent de caractériser les composants en se plaçant dans des conditions expérimentales qui minimisent les effets thermiques et/ ou les phénomènes liés au pièges. Ces mesures considèrent à définir un point de polarisation initial, appelé point de repos. A partir de ce point de repos, la caractéristique I/V est décrite par l'application d'impulsion de tension, comme illustré par la figure 8. Ainsi il est possible de déterminer et de quantifier les effets thermiques et les phénomènes de piégeage/dépiégeage.

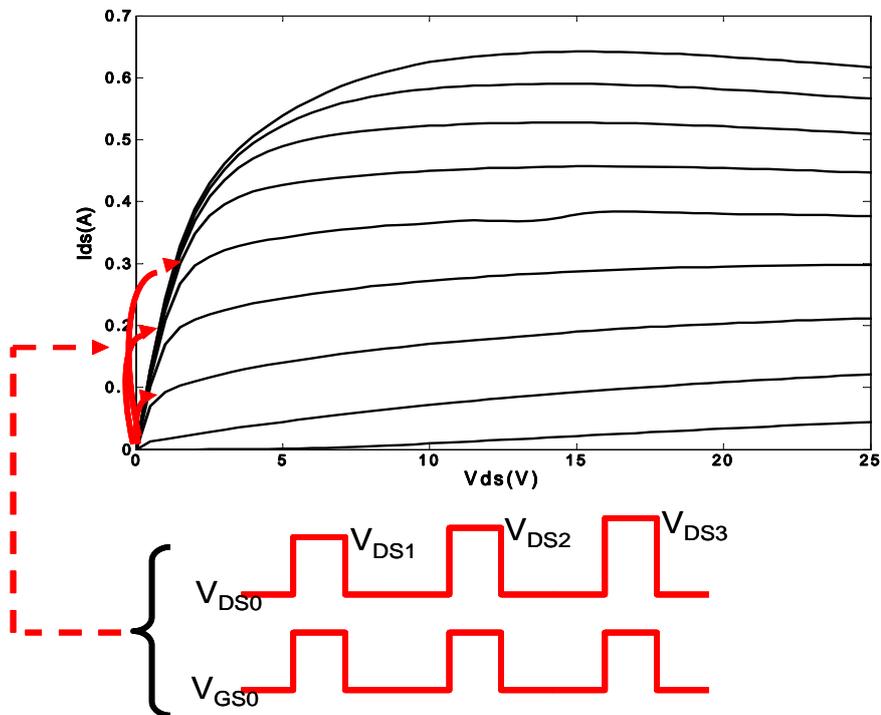


Fig. 8. Principe de la caractérisation I-V en mode pulsé, V_{GS0} et V_{DS0} représentent les tensions du point de repos appliquées sur la grille et le drain respectivement. Dans ce exemple, $V_{GS0}=0V$ et $V_{DS0}=0V$, nous décrivons la courbe pour $V_{GS}=-1V$ d'un HEMT de la plaque AEC1303 vierge.

Ces mesures consistent à polariser le composant pas des impulsions suffisamment courtes devant les constantes de temps thermique et/ ou les constantes de temps de capture et/ ou d'émission des électrons par les pièges. Ainsi en fonction de la largeur d'impulsion et du point de repos on peut activer un seul type de phénomène. Les conditions à respecter permettant de sélectionner l'un des phénomènes sont explicités dans ce chapitre. Les mesures pulsées ont été utilisées dans mes travaux afin d'obtenir les caractéristiques I/V des transistors pour mettre en évidence des phénomènes d'auto-échauffement et l'influence des pièges.

II- 4- 2- L'auto-échauffement

La polarisation du transistor peut entraîner son auto-échauffement [29-30]. Lorsqu'un fort champ électrique est appliqué, la relaxation d'un électron produit un photon optique longitudinal. Les transferts d'énergie, liés à la relaxation de ce dernier dans le réseau cristallin en photons acoustiques de façon prédominante, entraîne un échauffement de ce même réseau cristallin [22, 23, 31]. Par conséquent, la température dans le canal n'est plus à l'équilibre thermique. Ceci va entraîner une diffusion de la chaleur à partir du point chaud.

Le temps nécessaire à la température du réseau cristallin pour atteindre la température du point chaud est appelé constante thermique et noté τ_{th} . Ainsi, si la largeur des impulsions est très inférieure à τ_{th} , l'auto-échauffement n'a pas lieu dans le transistor. Il est donc nécessaire d'évaluer la largeur d'impulsion maximale permettant d'éviter l'auto-échauffement. Jardel a étudié le temps nécessaire à l'échauffement du point chaud du canal par simulation physique [32]. Il montre ainsi qu'au bout de 400ns, la température du point chaud atteint 1/3 de la température finale. Cependant Carbonniaud monte, lors d'une étude similaire mais basée sur des mesures de transitoires de courant à puissance dissipée fixée, une augmentation plus lente de la température [33]. En effet, il montre que la température augmente de 20% en 400ns.

Pour se libérer des effets thermiques, la largeur de pulse qu'on applique au dispositif, pour un point de polarisation qui détermine la puissance de dissipation du

dispositif, doit être la plus courte possible, et la période de pulse doit être plus grande que sa largeur pour maintenir l'état thermique du dispositif fixe et ne dépend que du point de polarisation quelque soit l'amplitude de pulse.

Le choix de cycle de travail (Duty Cycle) qui est la relation entre la largeur et la période de pulse est spécialement critique dans le cas des mesures des dispositifs à haute fréquence comme dans notre cas (Transistors HEMT de GaN).

On va étudier comment influence la valeur de cycle de travail sur le processus de caractérisation. Nous avons choisis le point de polarisation de repos ($V_{gscc}=0$; $V_{dscc}=0$) comme référence, ce point est considéré comme un état sans pièges et sans auto échauffement [34] et à partir on lance des pulse pour tracer les caractéristique I/V, on peut arriver pour les tensions de drain à des pulse de 30V.

On calcule la tension DC d'un pulse qui à une tension de base V_{base} , une largeur W , une hauteur H et une période T c'est un signal temporel $v(t)$.

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (3)$$

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^W (V_{base} + H) dt + \frac{1}{T} \int_W^T V_{base} dt \quad (4)$$

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^W (V_{base} + H) dt + \frac{1}{T} \int_W^T V_{base} dt \quad (5)$$

$$V_{DC} = V_{base} + \frac{W}{T} H \quad (6)$$

Si on applique un pulse sur le drain de 30V à partir du point de polarisation choisis nul précédemment, la tension V_{DC} sera comme suivant

Pour notre choix $W = 1 \mu s$, $T = 1ms$ $\rightarrow V_{DC} = 0.03V$.

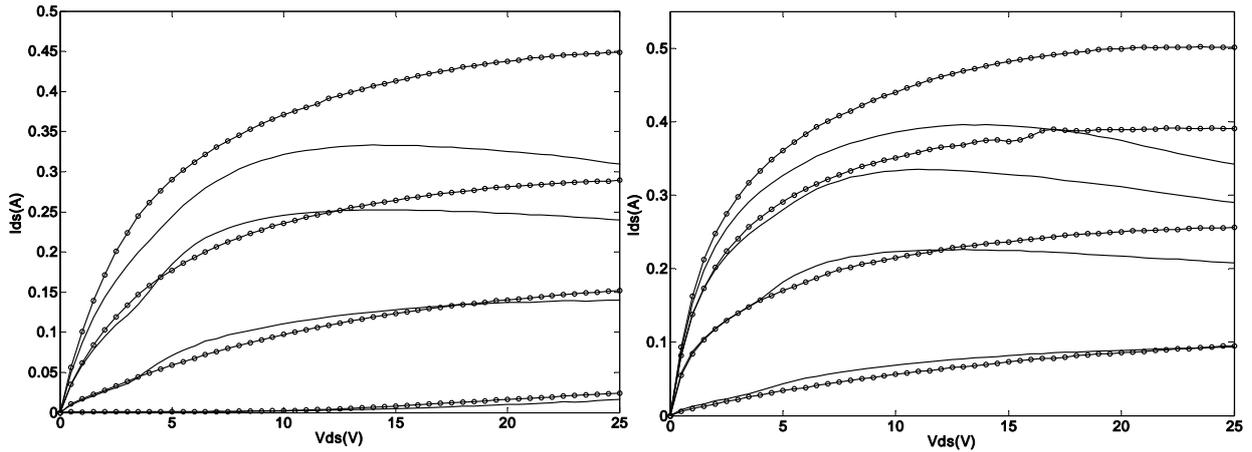
Pour [35] $W = 400ns$, $T = 10 \mu s$ $\rightarrow V_{DC} = 1.2 V$.

Pour [36] $W = 500ns$, $T = 10 \mu s$ $\rightarrow V_{DC} = 1.5 V$.

On constate que pour les deux dernier choix le dispositif se trouve polariser à un autre point de polarisation différent. Ce qui peut modifier totalement les caractéristique I/V.

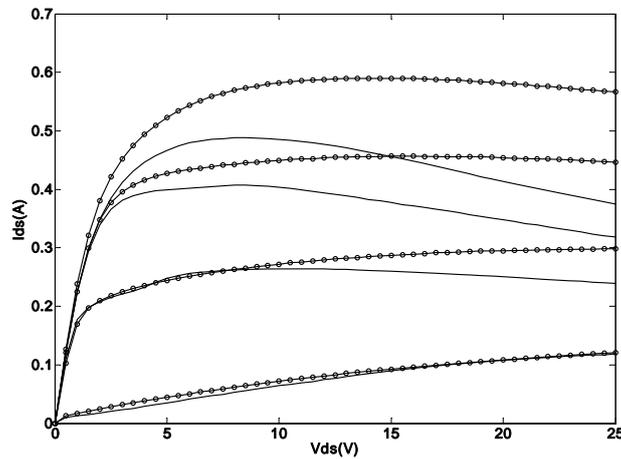
Les réseaux statiques $I_{ds}(V_{ds})$ des composants AlGaIn/GaN montrent une diminution du courant de drain en régime de saturation (figure 1). Cette chute de courant I_{ds} se traduit

en régime pulsé par un décrochage du courant de drain. De plus le décrochage semble relié à la différence de potentiel entre la grille et le drain, V_{gd} . Plus $|V_{gd}|$ est grande et plus le décrochage se déclenche à V_{ds} faible. Ce décrochage à un aspect temporel puisqu'en réduisant la largeur d'impulsion, et donc le temps durant le composant est polarisé, il se produit à V_{ds} plus élevé.



a) transistor vieillis à $T=200^{\circ}$

b) transistor vieillis à $T=200^{\circ}$



c) transistor vierge

Figure 9: Comparaison de réseau $I_{ds}(V_{ds})$ statique en traits plein, et pulsé en pointillés. V_{gs} va de -3V à 0 V avec un pas de -1V.

Une comparaison, présentée à la figure 9, entre un réseau $I_{ds}(V_{ds})$ en régime statique et son homologue en régime pulsé, a) d'un HEMT de AlGaIn/GaN vierge, b) un HEMT de AlGaIn/GaN soumis au vieillissement à $T=200^\circ$ et c) un HEMT de AlGaIn/GaN soumis au vieillissement à $T=300^\circ$, montre que la différence entre I_{ds} statique et I_{ds} pulsé augmente lorsque V_{gs} diminue et proche de seuil. Ceci peut être expliqué par les phénomènes d'auto-échauffement et de transfert des électrons dans une vallée secondaire. Il ya donc un second phénomène qui intervient.

Le taux de diminution de courant de drain qui serait lié à l'échauffement du composant, τ_{echauf} est calculé sur la caractéristique statique, et il est défini par l'équation 5.

$$\tau_{echauf} = \frac{MAX(I_{ds}) - I_{ds}(V_{ds} = 10V)}{MAX(I_{ds})} \quad (5)$$

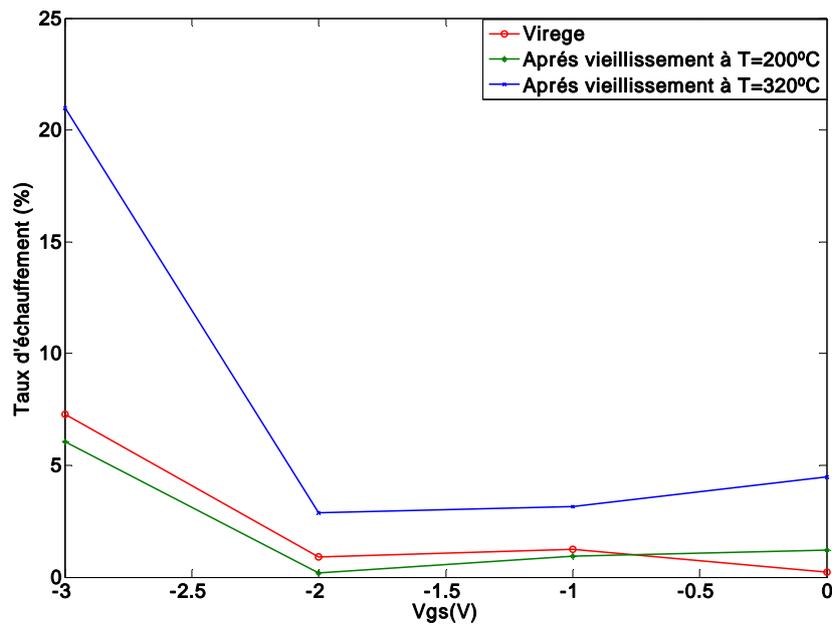


Figure 10: Evolution de τ_{echauf} en fonction de V_{gs} pour les composant étudiés.

La figure 10 permet d'observer l'évolution de τ_{echauf} en fonction de V_{gs} pour le trois composant étudié. Le paramètre τ_{echauf} augmente quand V_{gs} approche de seuil ce comportement ne peut pas être attribué seulement à un échauffement du composant. L'influence des pièges de la structure a été envisagée.

II- 4- 3- Mesures de Gate-lag et de Drain-lag :

En fonction du point de repos choisi, les impulsions de tension appliquées sur la grille et le drain sont positives ou négatives. En combinaison le sens de l'amplitude de l'impulsion avec la largeur de l'impulsion, les pièges dans le composant voient ainsi leur taux d'occupation varier [32]. Deux types de phénomènes sont mis en évidence, le gate-lag et le drain-lag.

En choisissant le point de repos $V_{ds0} = 0V$ et $V_{gs0} = V_{TH}$, l'état thermique du composant est constant et il ne s'échauffe pas. Les pièges associés à la déplétion sous la grille voient leur état de charge fixé. L'impulsion de tension appliquée sur le drain sera positive, entraînant la capture des électrons par les pièges localisés au voisinage du canal ou dans la couche tampon (buffer). En revanche l'impulsion de tension appliquée sur la grille est positive, entraînant l'émission des électrons par les pièges localisés sous la grille. Le phénomène de capture étant rapide par rapport à la largeur de l'impulsion, et celui d'émission lent, l'état de charge des pièges proche de la grille sera figé et ne dépendra que de la polarisation V_{gs0} [37].

Le taux de gate-lag, noté τ_{GL} , représente l'influence de piège proche de grille et il est défini par l'équation (6). τ_{GL} consiste à comparer le courant mesuré dans les conditions, $V_{ds0} = 0V$ et $V_{gs0} = 0V$, noté $I_{ds}(0,0)$ et le courant mesuré dans les conditions de gate-lag, noté $(0, V_{TH})$

$$\tau_{GL} = \frac{I_{ds}(0,0) - I_{ds}(0, V_{TH})}{I_{ds}(0,0)} \quad (6)$$

En choisissant le point de repos $V_{ds0} = 15V$ et $V_{gs0} = V_{TH}$, l'état thermique du composant est constant et il ne s'échauffe pas. Les pièges associés à la déplétion sous la grille ainsi que ceux qui sont sensibles à la polarisation de drain voient leur état de charge fixé. En effet, les conditions de déplétion sous la grille ne changent pas. L'impulsion de tension appliquée sur le drain est négative tant que V_{ds} est inférieur à 15V. Dans ce cas le phénomène d'émission des pièges localisés au voisinage du canal et / ou dans la couche tampon est prédominant. Le temps d'émission étant long par rapport à la largeur d'impulsion, ces pièges auront leur état de charge figé et ne

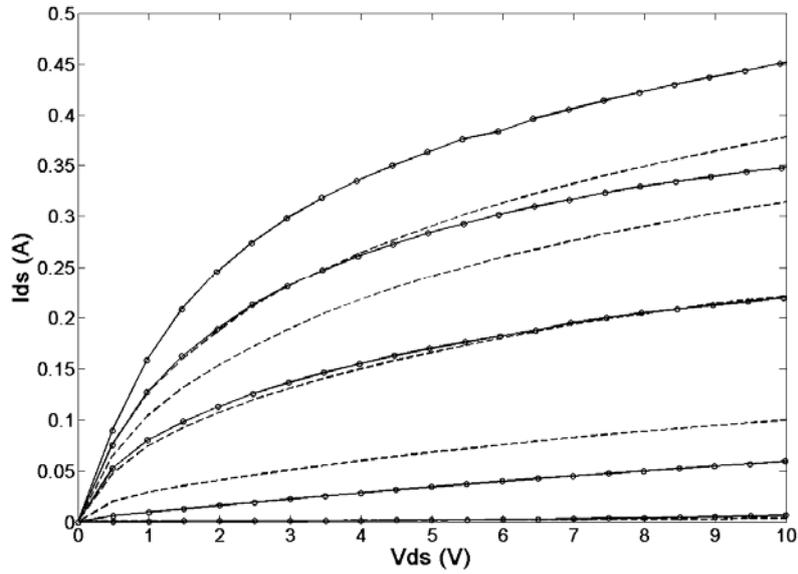
dépendra pas de la tension de repos V_{ds} , soit 15V dans le cas présent.

En comparant le courant mesuré dans les conditions de drain-lag, $I_{ds}(0, V_{TH})$, à $I_{ds}(15, V_{TH})$, on obtient le taux de drain-lag noté, τ_{DL} définis par l'équation (7).

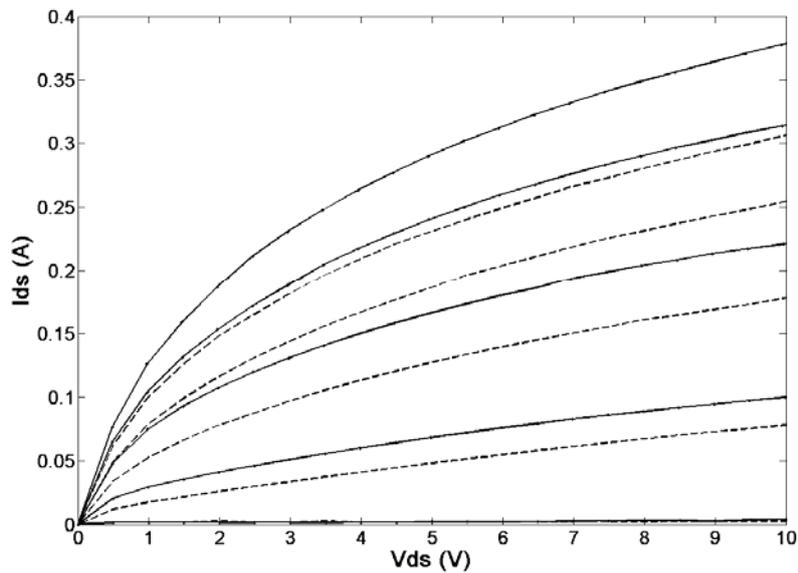
$$\tau_{DL} = \frac{I_{ds}(0, V_{TH}) - I_{ds}(15, V_{TH})}{I_{ds}(0, V_{TH})} \quad (7)$$

Les taux de gate-lag et de drain-lag ont été mesurés sur les trois composants étudiés.

Les figures 11,12 et 13 présentent les réseaux $I_{ds}(V_{ds})$.

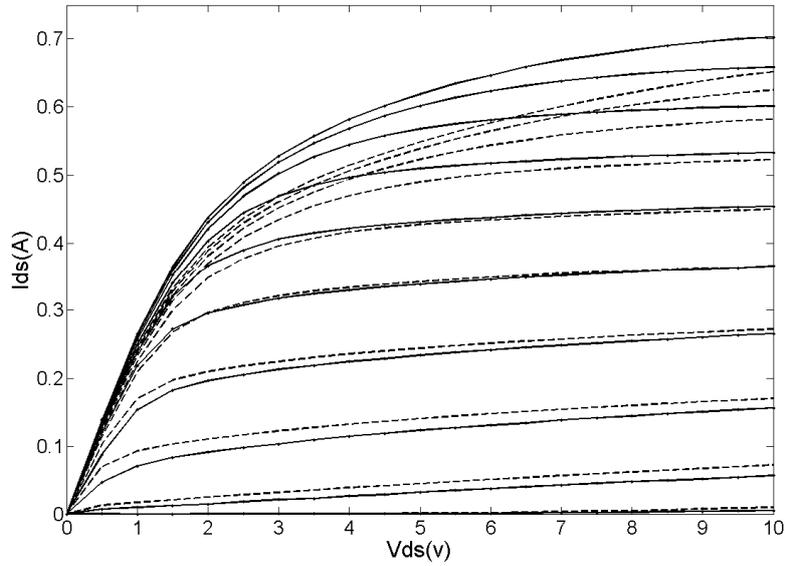


a) Comparaison du Réseau I/V du transistor HEMT de GaN soumis au vieillissement à T1 au point de polarisation ($V_{gs}=0, V_{ds}=0$) en traits pleins et ($V_{gs}=-4V, V_{ds}=0V$) en pointillés.

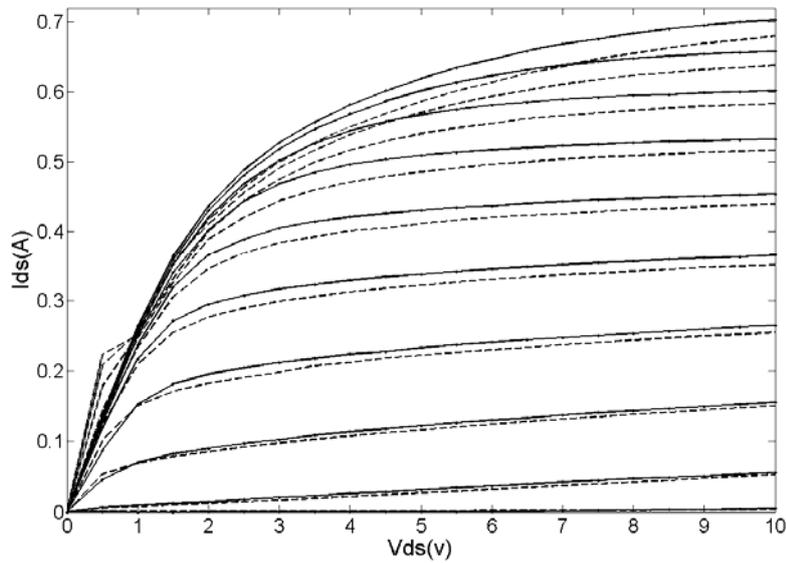


b) Comparaison du Réseau I/V du transistor HEMT de GaN soumis au vieillissement à T1 au point de polarisation ($V_{gs}=-4V, V_{ds}=0V$) en traits pleins et ($V_{gs}=-4, V_{ds}=15$) en pointillés.

Fig.11. Mise en évidence des effets de pièges a) gate-lag et b) drain-lag pour le transistor soumis au vieillissement à $T1=300^{\circ}C$.

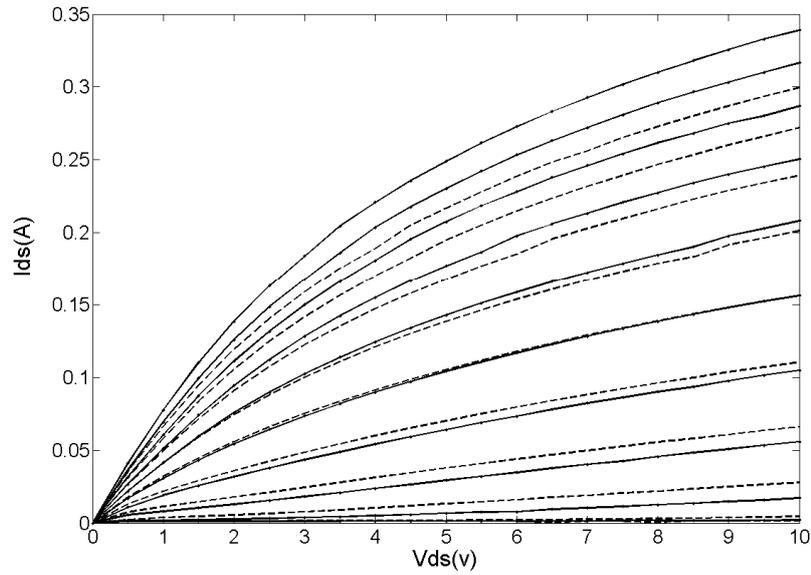


a) Comparaison du Réseau I/V du transistor HEMT de GaN vierge au point de polarisation ($V_{gs}=0$, $V_{ds}=0$) en traits pleins et ($V_{gs}=-4$ V, $V_{ds}=0$ V) en pointillés.

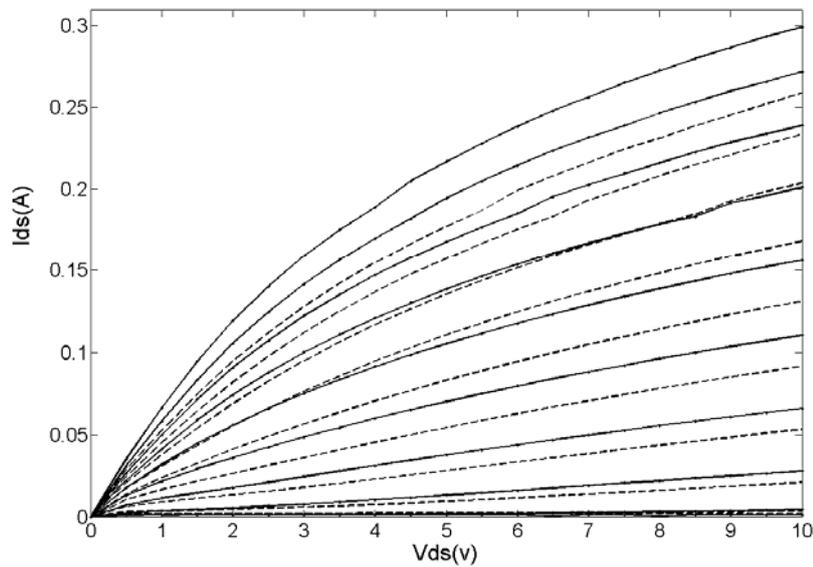


b) Comparaison du Réseau I/V du transistor HEMT de GaN vierge au point de polarisation ($V_{gs}=-4$, $V_{ds}=0$) en traits pleins et ($V_{gs}=-4$ V, $V_{ds}=15$ V) en pointillés.

Fig.12. Mise en évidence des effets de pièges a) gate-lag et b) drain-lag pour le transistor vierge.



a) Comparaison du Réseau I/V du transistor HEMT de GaN soumis au vieillissement à T2 au point de polarisation ($V_{gs}=0$, $V_{ds}=0$) en traits pleins et ($V_{gs}=-4V$, $V_{ds}=0V$) en pointillés.



b) Comparaison du Réseau I/V du transistor HEMT de GaN soumis au vieillissement à T2 au point de polarisation ($V_{gs}=-4V$, $V_{ds}=0V$) en traits pleins et ($V_{gs}=-4$, $V_{ds}=15$) en pointillés.

Fig.13. Mise en évidence des effets de pièges a) gate-lag et b) drain-lag pour le transistor soumis au vieillissement à T2 =200°C

Vgs(V)	-4	-3	-2	-1	0
τ_{GL} (%)	40.19	8.57	4.98	0.99	0.002
τ_{DL} (%)@Vds=10V	12.11	2.25	3.44	3.15	2.57
τ_{DL} (%)@Vds=25V	-	-	0.18	-	0.24

Table 4: Valeur de taux de gate-lag et drain-lag pour le transistor vierge.

Vgs(V)	-4	-3	-2	-1	0
τ_{GL} (%)	40.73	27.52	23.65	20.22	16.17
τ_{DL} (%)@Vds=10V	35.74	21.84	19.61	18.61	18.99
τ_{DL} (%)@Vds=25V	32.63	14.9	11.57	11.78	10.74

Table 5: Valeur de taux de gate-lag et drain-lag pour le transistor soumis au vieillissement à T=300°C.

Vgs(V)	-4	-3	-2	-1	0
τ_{GL} (%)	55.81	24.13	17.34	21.95	22.04
τ_{DL} (%)@Vds=10V	-	16.6	17.34	13.67	11.70
τ_{DL} (%)@Vds=25V	-	5.39	5.96	6.74	6.002

Table 6: Valeur de taux de gate-lag et drain-lag pour le transistor soumis au vieillissement à T=200°C.

Les tableaux 4, 5, et 6 rassemblent les valeurs mesurées des taux de gate-lag et drain-lag pour les trois composants étudiés. Pour les trois transistors le taux de gate-lag est supérieur que le taux de drain-lag. Il aurait donc une plus forte densité de pièges au voisinage de la grille que dans le canal. Après vieillissement le taux de gate-lag augmente. Il est généralement attribué à des pièges de surface [37]. L'amplification de l'amplitude de gate-lag est un effet de dégradation couramment observé, qui est considéré comme une signature de génération de pièges dans la région d'accès de drain [3, 8, 15, 37]. Le phénomène gate-lag et l'effet de courant de collapse associé peuvent être expliqués par [38] :

- la génération de pièges de surface dont les électrons piégés injectés par la grille, les pièges accepteurs obtiennent une ionisation négative tandis que V_{gs} est fortement négative, qui provoque une diminution de la densité des électrons 2DEG dans la région d'accès de drain. Les pièges émettent les électrons à haute valeur de V_{gs} qui donne une petite augmentation de la densité des électrons 2DEG et de valeur d' I_{ds} .
- La génération de pièges dans la barrière AlGaIn.
- La génération de pièges dans le buffer GaN.
- La génération de pièges de surface et de buffer.
- La génération de pièges de surface, de la barrière et de buffer.

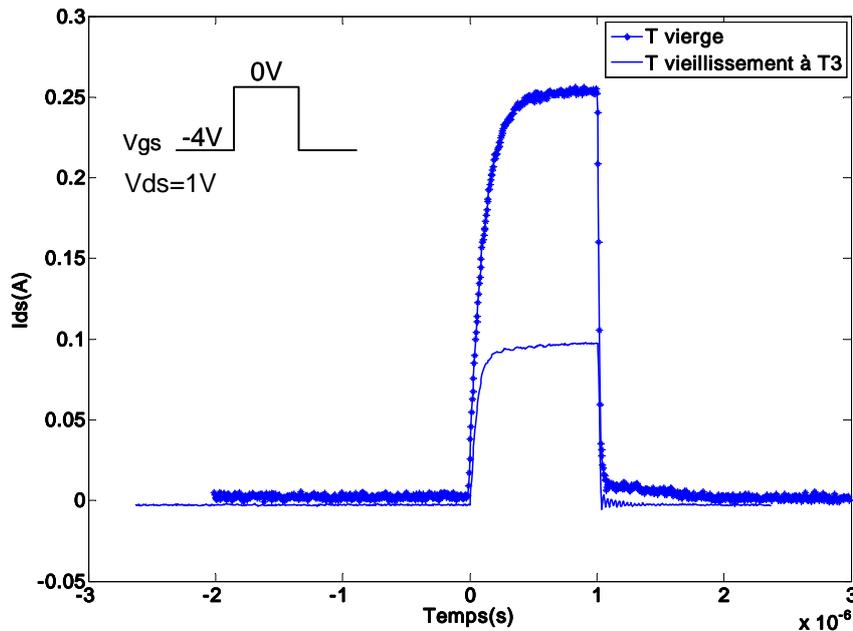


Figure14: Comportement transitoire de I_{ds} lors d'un pulse de V_{gs} de -4V à 0V et $V_{ds}=1V$ avant et après vieillissement à $T=300^{\circ}$.

Après vieillissement apparaît un significatif effet de gate-lag, la figure (14) présente le comportement transitoire du courant de drain dû à l'effet du phénomène gate-lag avant et après vieillissement, les transistors sont polarisé à $V_{ds}=1$ et $V_{gs} = (-4,0)$. On peut constater la diminution du courant I_{ds} causé par l'effet de vieillissement et d'autre part un transitoire lent avec une constante de temps dans le ordre de quelque micro seconde apparaît après le vieillissement. Ce comportement peut être expliqué en supposant que, les pièges sont générés à la surface grille-drain. Ces pièges doivent avoir une énergie d'activation grande et / ou ils doivent être nourris par une "lente" mécanisme de conducteur (comme le mécanisme de hopping), afin d'expliquer les constantes de temps régissant les transitoires gate-lag dans les composants avec vieillissement.

II- 4- 4- Influence de la température sur les effets de pièges

Généralement l'effet thermique, l'auto-échauffement et la température externe, influent sur les caractéristiques I/V du transistor par une diminution du niveau de ces caractéristiques quand on augmente la température [39]. Ceci est dû au fait que la température diminue la mobilité et la vitesse des électrons dans le canal du dispositif et, par conséquent, tout en diminuant le courant [40]. Toutefois, l'augmentation de la température peut fournir une énergie suffisante aux électrons recueillis dans des niveaux intermédiaires entre les bandes de valence et de conduction pour passer à la bande de conduction et, par conséquent, prendre part à la conduction en augmentant, le courant.

Pour déterminer le degré d'influence de la température sur les états piège, nous avons effectué des mesures pulsées des caractéristiques I/V du transistor pour deux points de polarisation différents et pour deux températures différentes (27°C et 70°C). Les mesures DC de ces caractéristiques sont inutiles pour ce type de caractérisation puisqu'elles présentent à la fois des effets d'auto-échauffement et de piège. Dans une première étape, nous considérons les mesures pulsées des caractéristiques I/V correspondant au point de polarisation de repos ($V_{gs0}=0V$, $V_{ds0}=0V$), considéré comme point libre de pièges, pour ces deux températures. La Figure (15) représente ces mesures où on voit une importante dégradation de courant. Il peut être considéré que cette dégradation est seulement due à l'effet de la température externe puisque le

transistor est polarisé dans un point sans pièges et sans auto-échauffement. Dans ce cas la dégradation de courant dans la zone de saturation est de 55mA et correspond à 11.2%.

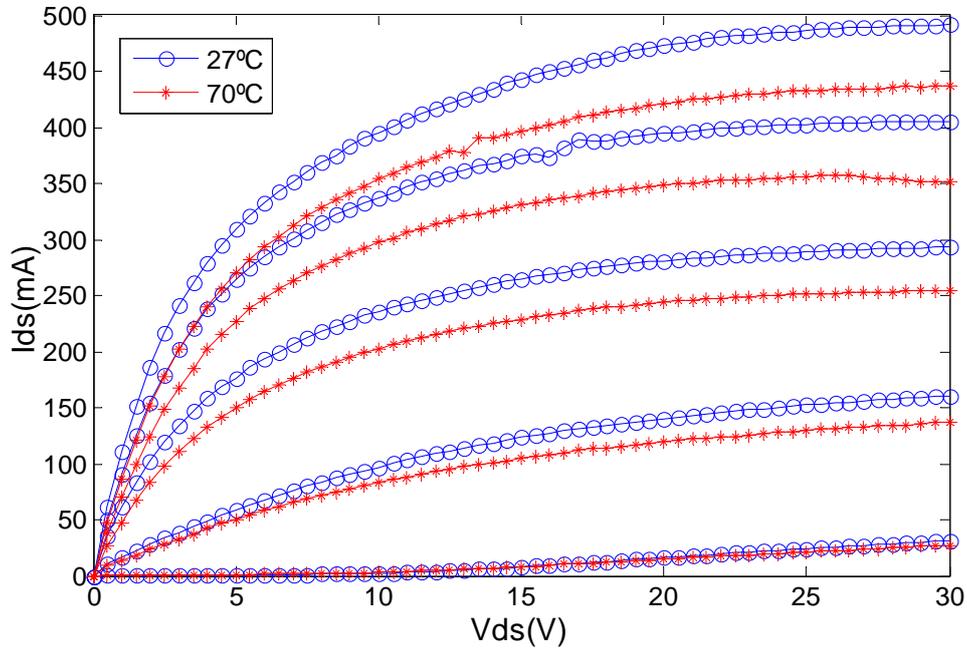


Fig. 15. Caractéristique I/V en mesure pulsé ($V_{gs0}=0V$, $V_{ds0}=0V$).

Nous considérons maintenant les mesures pulsées des caractéristiques I/V qui correspondent à un point de polarisation de repos associé à un état de forte occupation de pièges, mais en même temps sans auto-échauffement, et dans les mêmes températures externes pour garder le même état thermique du transistor. Ce point ne peut pas être un autre que celui qui est fixé en polarisant le transistor dans le pinch-off pour la tension de la grille et pour une forte tension de polarisation de drain, par exemple, ($V_{gs0}=V_p$, $V_{ds0}=20V$).

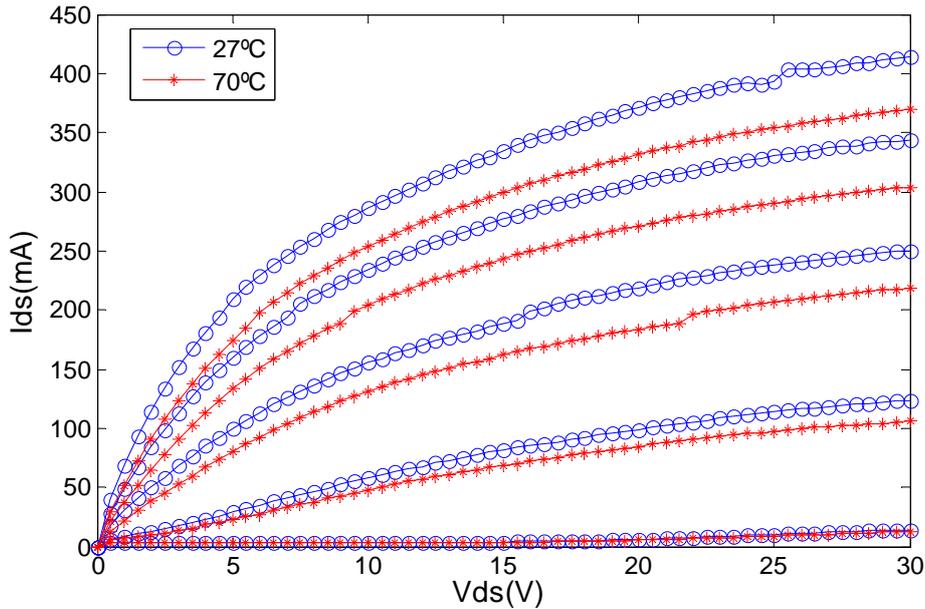


Fig 16. Caractéristique I/V en mesure pulsé ($V_{gs0}=-4V$, $V_{ds0}=20V$).

La Figure (16) représente les caractéristiques I/V correspondant à ces conditions où on constate l'importante dégradation de courant, mais dans ce cas plus petite que dans le cas précédent puisqu'une partie des électrons recueillis a été libérée grâce à l'effet de la température. Dans ce cas nous avons calculé une dégradation dans la zone de saturation de 43mA qui correspond à 10.4%. La différence entre la dégradation de courant dans le cas sans pièges et avec pièges est le pourcentage de courant résultant de la libération des électrons recueillis, étant donné l'effet thermique qui est de 0.8% correspondant à 0.28mA/°C dans ce cas.

II- 5- Conclusion

Dans ce chapitre, les méthodes de caractérisation électriques ont été présentées. La caractérisation en régime statique permet d'évaluer les performances des composants et l'influence de processus de vieillissement sur ces caractéristiques. La caractérisation en régime pulsé après l'application de la durée de l'impulsion de tension, optimale, sur le drain et sur la grille permettant de limiter au maximum les effets thermiques.

La caractérisation électrique en régime pulsé permet de fixer l'état des pièges et ainsi de déterminer leur influence en fonction du point de repos choisi. Ainsi, les transistors de la plaque AEC1303 soumis au processus de vieillissement à la température 200°C et 320°C présentent des densités de pièges au voisinage de la grille plus importantes que celles du transistor vierge. Une étude détaillée a été présentée.

Des mesures pulsées des caractéristiques I/V du transistor pour deux points de polarisation différents et pour deux températures différentes (27°C et 70°C) a fin de déterminer le degré d'influence de la température sur les états piège.

Références

- [1] G. Koley, V. Tilak, L.F. Eastman, M.G. Spencer, "Slow transients observed in AlGa_N/Ga_N HFETs: effects of SiN_x passivation and UV illumination", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 50, no. 4, pp. 886-893, Apr. 2003.
- [2] D.K. Sahoo, R.K. Lal, H. Kim, V. Tilak, L.F. Eastman, "High-field effects in Silicon Nitride Passivated Ga_N MODFETs", IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 50, no. 5, pp.1163-1170, May 2003.
- [3] H. Kim, R. M. Thompson, V. Tilak, T.R. Prunty, J.R. Shealy, L.F. Eastman, "Effects of SiN passivation and high electric field on AlGa_N-Ga_N HFET degradation", IEEE Electron Device Lett., vol. 24, no. 7, pp. 421-423, July 2003.
- [4] T. Mizutani, Y. Ohno, M. Akita, S. Kishimoto, K. Maezawa, "A study on current collapse in AlGa_N/Ga_N HEMTs induced by bias stress", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 50, no. 10, pp. 2015-2020, Oct. 2003.
- [5] K.S. Boutros, P. Rowell, and B. Brar, "A study of output power stability of Ga_N HEMTs on SiC substrates", in Proc. of the IEEE Int. Rel. Phys. Symp. (IRPS), 2004, pp.577-578.
- [6] C. Lee, H. Tserng, L. Witkowski, P. Saunier, S. Guo, B. Albert, R. Birkhahn, G. Munns, "Effects of RF stress on power and pulsed IV characteristics of AlGa_N/Ga_N HEMTs with field-plate gates", Electron. Lett., vol. 40 no. 24, pp. 1147-1148, Nov. 2004.
- [7] C. Lee, L. Witkowski, H.-Q. Tserng, P. Saunier, R. Birkhahn, Dan Olson, G. Munns, S. Guo, B. Albert, "Effects of AlGa_N/Ga_N HEMT structure on RF reliability", Electron. Lett., vol. 41 no. 3, pp. 155-157, Feb. 2005.
- [8] A.P. Edwards, J.A. Mittereder, S.C. Binari, D. Scott Katzer, D.F. Storm, J.A. Roussos, "Improved reliability of AlGa_N-Ga_N HEMTs using an NH₃ plasma treatment prior to SiN passivation", IEEE Electron Device Lett., vol. 26, no. 4, pp. 225-227, Apr. 2005.
- [9] G. Meneghesso, R. Pierobon, F. Rampazzo, G. Tamiazzo, E. Zanoni, J. Bernat, P. Kordos, A.F. Basile, A. Chini, G. Verzellesi, "Hot-electron-stress degradation in unpassivated Ga_N/AlGa_N/Ga_N HEMTs on SiC", in Proc. of the IEEE Int. Rel. Phys. Symp. (IRPS), 2005, pp. 415-422.

- [10] P. Valizadeh, D. Pavlidis, "Investigation of the impact of Al mole-fraction on the consequences of RF stress on $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ MODFETs", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 52, no. 9, pp. 1933-1939, Aug. 2005.
- [11] V. Adivarahan, J. Yang, A. Koudymov, G. Simin, M. Asif Khan, "Stable CW operation of field-plated GaN-AlGa_N MOSHFETs at 19 W/mm²", IEEE Electron Device Lett., vol. 26, no. 8, pp. 535-537, Aug. 2005.
- [12] P. Valizadeh, D. Pavlidis, "Effects of RF and DC stress on AlGa_N/Ga_N MODFETs: a low-frequency noise-based investigation", IEEE Trans. on Device and Materials Reliability, vol. 5, no. 3, pp. 555-563, Sept. 2005.
- [13] A. Sozza, C. Dua, E. Morvan, M.A. diForte-Poisson, S. Delage, F. Rampazzo, et al., "Evidence of traps creation in GaN/AlGa_N/Ga_N HEMTs after a 3000 hour on-state and off-state hot-electron stress", in IEDM Tech. Digest, 2005, pp. 601-604.
- [14] G. Meneghesso, F. Rampazzo, P. Kordoš, G. Verzellesi, and E. Zanoni, "Current collapse and high-electric-field reliability of unpassivated GaN/AlGa_N/Ga_N HEMTs", IEEE Trans. Electron. Devices, vol. 53, pp. 2932-2941, 2006.
- [15] J. Joh and J. del Alamo, "Mechanisms for electrical degradation of GaN highelectron mobility transistors", in IEDM Tech. Digest, 2006.
- [16] S. Singhal, J. C. Roberts, P. Rajagopal, T. Li, A. W. Hanson, R. Therrien, J. W. Johnson, I. C. Kizilyalli, and K. J. Linthicum, "Ga_N-on-Si failure mechanisms and reliability improvements," in Proc. IEEE IRPS, 2006, pp. 95-98.
- [17] korrigan, RTP 102.052, progress report N°6, 2008.
- [18] PLossu C., CHOQUET C., LUBOWIECKI V. et BALLAND G., « Spatial distribution of surfaces states in MOS transistors », Solid-State Comm~tn. 65 (1988).
- [19] G. Hellings, J. John, A. Lorenz, and R. Mertens. AlGa_N schottky diodes for detector applications in the uv wavelength range. conference MELECON 2008, 2008.1231.
- [20] A.F.M. Anwar, S.Wu, and R.T.Webster. Temperature dependent transport properties in Ga_N, AlGa_N, and InGa_N semiconductors. Semicond. Sci. Technol, 48(3):567-572, 2001.
- [21] S. Yamakawa, S. Aboud, M. Saraniti, and S.M. Goodnick. Influence of the electron-phonon interaction on electron transport in wurtzite Ga_N. Semicond. Sci. Technol, 19:475-477, 2004.

- [22] A. Matulionis, J. Liberis, I. Matulioniene, M. Ramonas, L. F. Eastman, J. R. Shealy, V. Tilak, and A. Vertiatchikh. Hot-phonon temperature and lifetime in a biased Al- GaN/GaN channel estimated from noise analysis. *Phys. Rev. B*, (68):035338, 2003.
- [23] B.K. Ridley, W.J. Schafer, and L.F. Eastman. Hot-phonon-induced velocity saturation in GaN. *J. of Applied Physics*, 96(3):1499–1501, 2004.
- [24] B. Benbakhti. Analyse physique et thermique de transistors a effet de champ de la filière GaN, Optimisation de structures pour amplification hyperfréquence. Université de Lille, 2006.
- [25] D. Dieci, G. Sozzi, R. Menozzi, E. Tediosi, C. Lanzieri, and C. Canali, “Electricfield-related reliability of AlGaAs/GaAs power HFETs: Bias dependence and correlation with breakdown,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 48, no. 9, pp. 1929–1937, Sep. 2001.
- [26] H. Zhang, E.J. Miller, and E.T. Yu. Analysis of current mechanisms in schottky contacts to GaN and AlGaIn/GaN grown by MBE. *Applied Physics Letters*, 99 :023703, 2006.
- [27] I. Daumiller, D. Theron, C. Gacquié, A. Vescan, R. Dietrich, A. Wieszt, H. Leier, R. Vetury, U.K. Mishra, I.P. Smorchkova, S. Keller, N.X. Nguyen, C. Nguyen, and E. Kohn. Current instabilities in GaN-based devices. *IEEE Electron Device Letters*, 22(2):62–64, 2001.
- [28] R. Menozzi, P. Cova, C. Canali, and F. Fantini, “Breakdown walkout in pseudomorphic HEMT’s,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 43, no. 4, pp. 543-546, Apr. 1996.
- [29] Manju K. Chattopadhyaya and Sanjiv Tokekar. Thermal model for dc characteristics of AlGaIn/GaN hemts including self-heating effect and non-linear polarization. *Microelectronics Journal*, 39:1181–1188, 2008.
- [30] J. Kim, A. Freitas Jr., J. Mittereder, R. Fitch, B.S. Kang, S.J. Pearton, and F. Ren. Effective temperature measurements of AlGaIn/GaN-based HEMT under various load lines using micro-raman technique. *Solid State Electronics*, 50:408-411, 2006.
- [31] K.T. Tsen, R.P. Joshi, D.K. Ferry, A. Botchkarev, B. Sverdlov, A. Salvador, and H. Morkoc. Nonequilibrium electron distributions and phonon dynamics. *Appl. Phys. Lett.*, 61:2990–2992, 1996.
- [32] O. Jardel. Contribution a la Modélisation des Transistors pour Amplification de Puissance aux Fréquences Micro-ondes et Développement un nouveau Modèle Electrothermique de HEMT AlGaIn/GaN incluant les effets de pièges. Université de Limoge, 2008.

- [33] C. Charbonniaud. « Caractérisation et modélisation électrothermique non linéaire de transistors effet de champ GaN pour amplification de puissance micro-onde. » Université de Limoge, 2005.
- [34] J.P. Teyssier, R. Quéré, J. Obregon, "Accurate Non-linear Characterization of Microwave Semi-Conductor Devices Using Pulse Measurement Technique", IEEE MTT Workshop, pp. 208-212, Ratingen (Germany), 1991.
- [35] F. De Groote, O. Jardel, T. Reveyrand, J. P. Teyssier, and R. Quéré, "Very Small Duty Cycles for Pulsed Time Domain Transistor Characterization," Accepted À Proceedings of EUMA, 2008.
- [36] C. Charbonniaud, S. De Meyer, R. Quéré, and J. P. Teyssier, "Electrothermal and Trapping Effects Characterization," in Gallium Arsenide Symposium Digest , Munich, Germany, Oct. 2003.
- [37] S.C. Binari, P.B. Klein, T.E. Kazior, "Trapping effects in GaN and SiC microwave FETs", Proc. of the IEEE, vol. 90, no. 6 , pp. 1048-1058, June 2002.
- [38] Mustapha Faqir "Analysis of the physical mechanisms limiting performance and reliability of GaN based HEMTs" Université de Bordeaux 1, 2010.
- [39] G. Koley, V. Tilak, L. F. Eastman, M. G. Spencer, "Slow transients observed in AlGaIn/GaN HFETs effects of SiNx passivation and UV illumination" IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 50, no. 4, pp. 886–893, Apr. 2003.
- [40] J. D. Albrecht, R. P. Wang and P. P. Ruden, "Electron transport characteristics of GaN for high temperature device modeling" J. Appl. Phys., vol. 83, no. 9, pp. 4777–4781, May 1998.

Chapitre 3

Caractérisation des pièges et dégradation du courant de saturation I_{dss}

III- 1- Introduction

La génération simultanée de pièges de la surface (et/ou barrière) peut expliquer tous les modes de dégradation décrits.

L'effet de Kink est l'un des phénomènes observés pour les HEMTs de AlGaIn/GaN une étude détaillée sera abordée et l'évolution de cet effet en fonction de la température.

Les pièges dans les HEMTs sur GaN ont été caractérisés en utilisant les mesures de l'effet kink et de gate-lag afin d'indiquer la localisation et la concentration d'un piège pour faciliter la détermination de son énergie d'activation dans des conditions de mesures et pour des fabrications différentes.

En se basant sur le modèle proposé par Chou et al [1] un modèle de dégradation de courant de saturation I_{dss} sera proposé et la validation de ce modèle pour des

composantes issues de différentes fabrications et dans des conditions de mesure différentes.

III- 2- Effect de Kink

L'effet kink se manifeste comme une augmentation brusque du courant de drain pour une tension déterminée. Ceci cause une augmentation de la conductivité de sortie g_{ds} et une diminution du courant I_g de la grille entraînant une réduction de gain de tension et une mauvaise linéarité [2]. Des différents travaux ont traité cet effet pour des dispositifs construits sur différents substrats SoI [3], InAlAs/InGaAs [4-5], AlGaAs/GaAs [6] ou AlGaN/GaN [7-8], il n'y a pas un accord définitif sur son origine et les phénomènes physiques impliqués dans l'apparition de ce dernier ; quelques explications de cet effet sont attribuées à l'accumulation des trous produits par l'ionisation par impact [4], [9], en particulier dans des semi-conducteurs de grand gap comme SoI ou GaAs, (où l'ionisation par impact est plus probable). En ce qui concerne AlGaN/GaN l'ionisation par impact a été observée par Brar [10] et a été mise en rapport aussi avec l'effet de kink.

Dans ces dispositifs, il a été suggéré que les pièges pourraient causer l'effet kink: le chargement des pièges dans le buffer ou dans l'isolant, conduit à un changement dans la tension de seuil [11- 12].

L'effet kink observé dans la caractéristique I/V est couramment attribué à l'ionisation par impact dans le canal de conduction ou aux pièges, soit à la surface ou dans le buffer. Peu importe l'origine de cet effet, le mécanisme a une forte dépendance vis-à-vis de la température. À cet égard, les auteurs de [13] ont discuté de l'effet kink HEMT GaN dans la marge de température de 100K à 300K en analysant les réponses transitoires des dispositifs. S'étant basé sur cette approche, ils ont constaté que l'effet kink a été associé à une constante de temps du mécanisme de piégeage et il est plus significatif à des températures cryogéniques. Par ailleurs, en extrayant le courant de trou de la grille ils ont suggéré que, en plus de l'effet de piégeage contribuant à cet effet, l'ionisation par impact dans une certaine mesure joue aussi un rôle à des températures cryogéniques.

III- 3- Analyse électrique de l'effet de Kink

Afin de confirmer cette théorie, nous avons réalisé une série de mesures DC à trois températures différentes (-100° , 27° et 70°) sur des transistors HEMT AlGaIn/GaN ($8 \times 75 \mu m$) vierge et des transistors HEMT AlGaIn/GaN ($8 \times 75 \mu m$) soumis à un vieillissement électrique et thermique à la température $T=300^\circ C$ dans un test de III-V Lab.

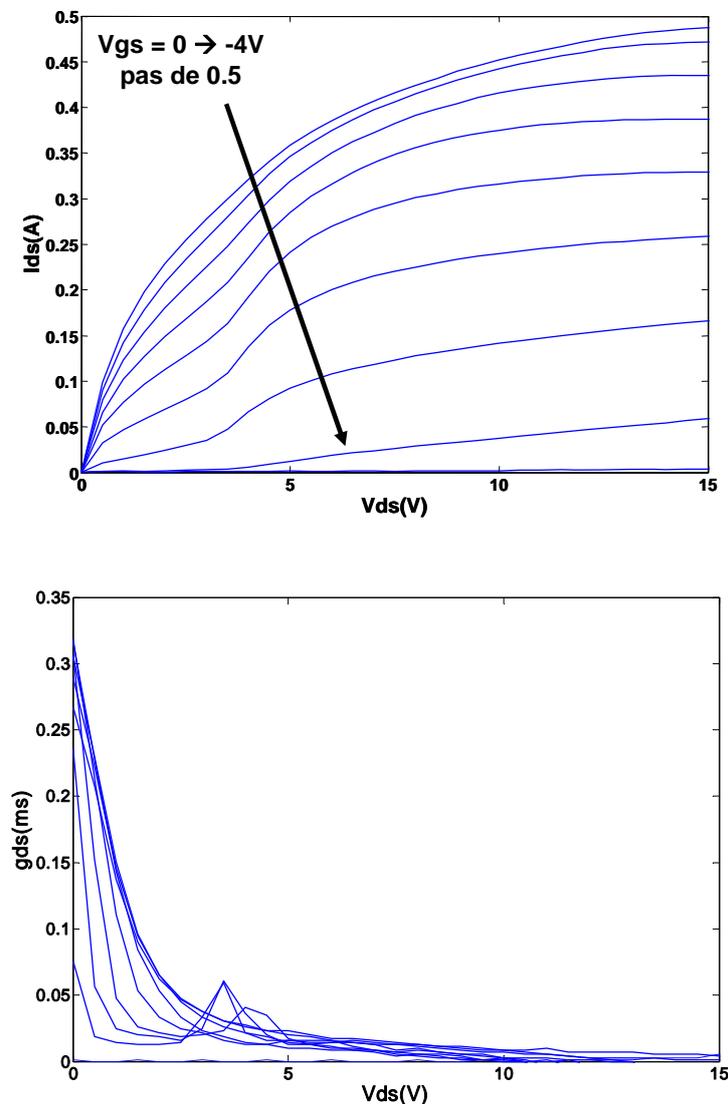


Fig. 1. Mise en évidence de l'effet de kink pour le transistor soumis au vieillissement à la température $T = -100^\circ C$.

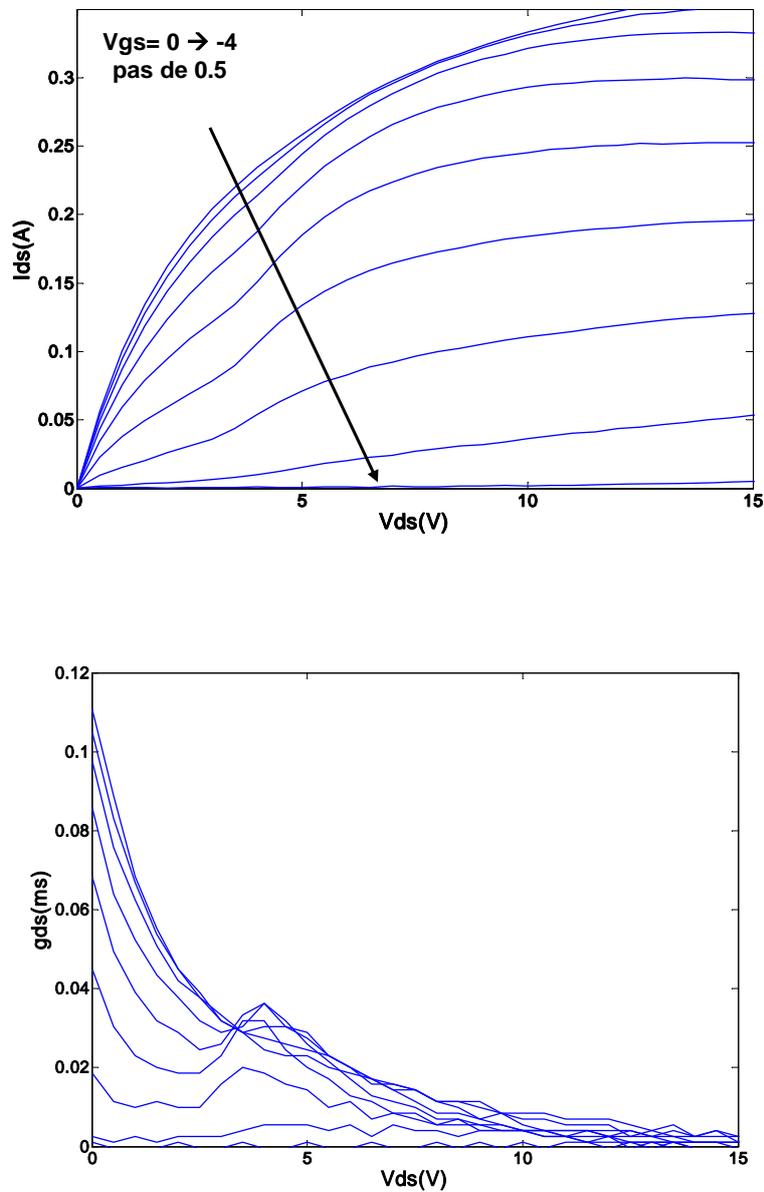


Fig. 2. Mise en évidence de l'effet de kink pour le transistor soumis au vieillissement à la température $T = 27^{\circ}\text{C}$

Les figures 1 et 2 illustrent la présence de l'effet de Kink pour le transistor soumis au vieillissement pour les températures 27°C et -100°C respectivement.

En observant le courant I_{ds} pour le transistor HEMT AlGaIn/GaN ($8 \times 75 \mu m$) soumis au vieillissement, aux deux températures, on apprécie l'apparition de l'augmentation brusque du courant I_{ds} pour des tensions supérieures à la tension de pinch-off, ce qui cause une augmentation de la conductivité de sortie pour une même tension de drain.

D'autre part on observe que l'effet de kink est plus visible à des températures faibles ($-100^\circ C$), ce qui est en accord avec des travaux publiés [14]. Comme il a été dit, l'effet kink est mis en rapport avec le phénomène d'ionisation par impact, une augmentation de la température peut offrir une énergie suffisante aux électrons recueillies dans les niveaux intermédiaires entre la bande de Valence et la bande de conduction pour passer à la bande de conduction et, par conséquent, prennent part à la conduction en augmentant, de cette manière, la valeur du courant I_{ds} .

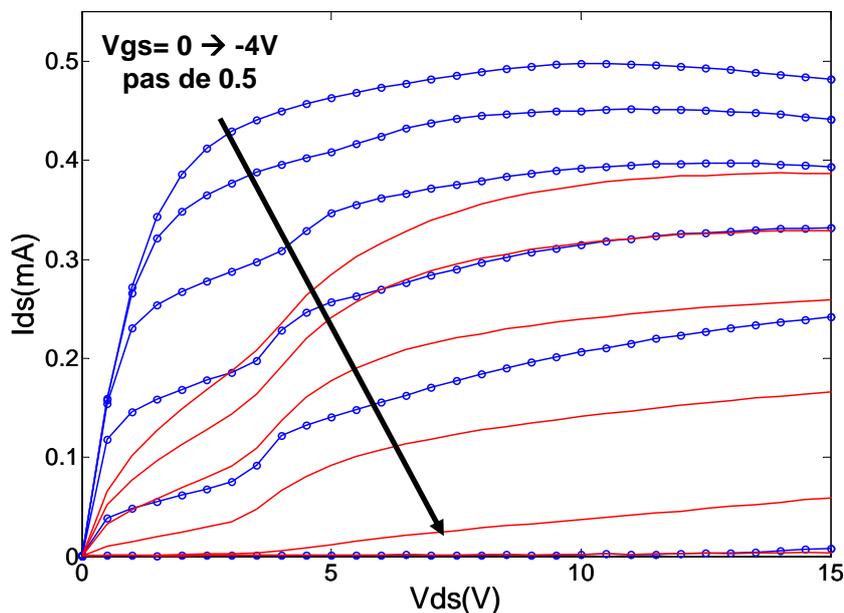


Fig. 3 : Illustration de l'effet Kink pour le transistor vierge (ligne pointé) et le transistor soumis au vieillissement (ligne) à la température ($-100^\circ C$).

La figure (3) présente le courant de drain I_{ds} , pour les deux transistors HEMT d'AlGaIn/GaN, vierge et soumis au vieillissement à la température (- 100 °C). On observe l'effet kink pour les deux dispositifs pour une même valeur de la tension V_{ds} , on observe également la diminution du courant I_{ds} pour le transistor soumis au processus de vieillissement thermique et électrique. Ceci met en évidence la dépendance des niveaux pièges vis-à-vis des processus de dégradation dû à ce vieillissement.

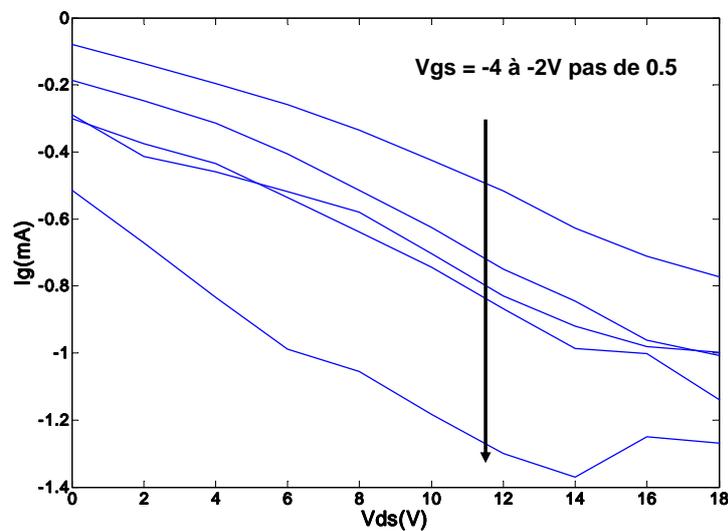


Fig. 4. Courant I_g de la grille pour le transistor vierge à $T=27^\circ\text{C}$.

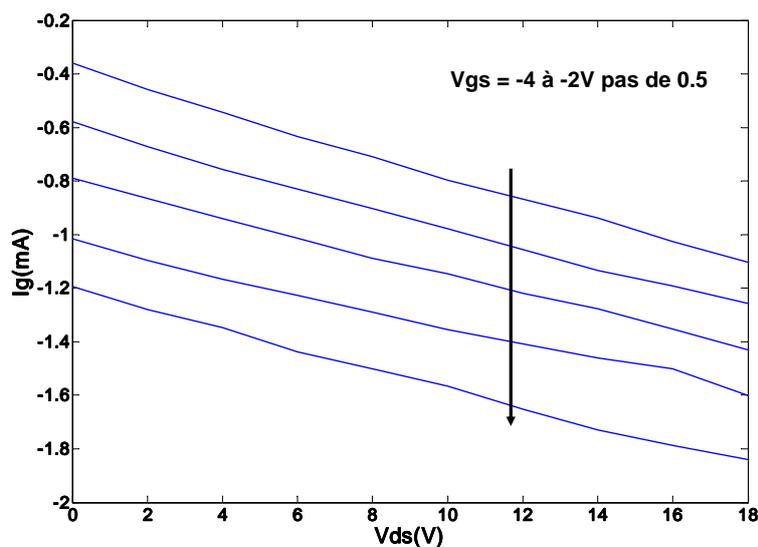


Fig. 5. Courant I_g de la grille pour le transistor soumis au vieillissement à $T=27^\circ\text{C}$.

Un des comportements anormaux qui est observé dans des transistors HEMT de GaN, et en particulier dans les dispositifs mesurés, est l'augmentation du courant de grille I_g . Certains auteurs [15] attribuent la présence de ce courant à la génération des trous suite au processus d'ionisation par impact. On a déjà signalé que les trous produits sont attirés aussi vers la grille chargée négativement. Les figures 4 et 5 présentent le courant I_g de la grille en fonction de V_{ds} et de V_{gs} pour les transistors étudiés à la température ambiante.

III- 4- Évolution de l'Effet kink avec la Température

Dans la littérature beaucoup de travaux se concentrent sur l'évolution de l'effet de kink à des hautes températures de fonctionnement [15]; des mesures des caractéristiques I/V en régime DC et RF sur les transistors HEMT AlGaIn/GaN à de hautes températures de fonctionnement ont été effectuées; et on indique que dans ce type de dispositifs, l'effet kink est dû principalement à la présence d'états de pièges.

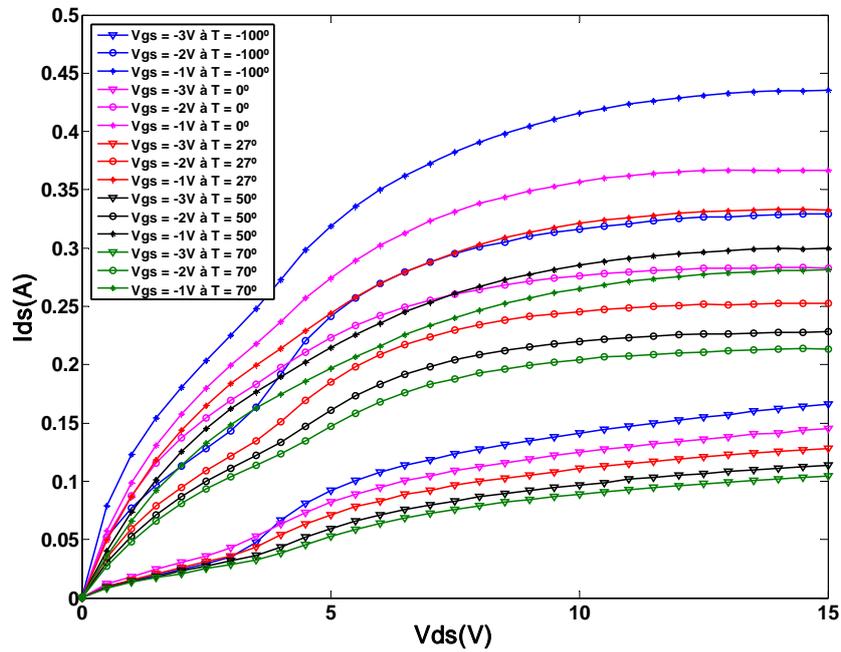


Fig. 6. Comparaison du courant I_{ds} pour le transistor soumis au vieillissement

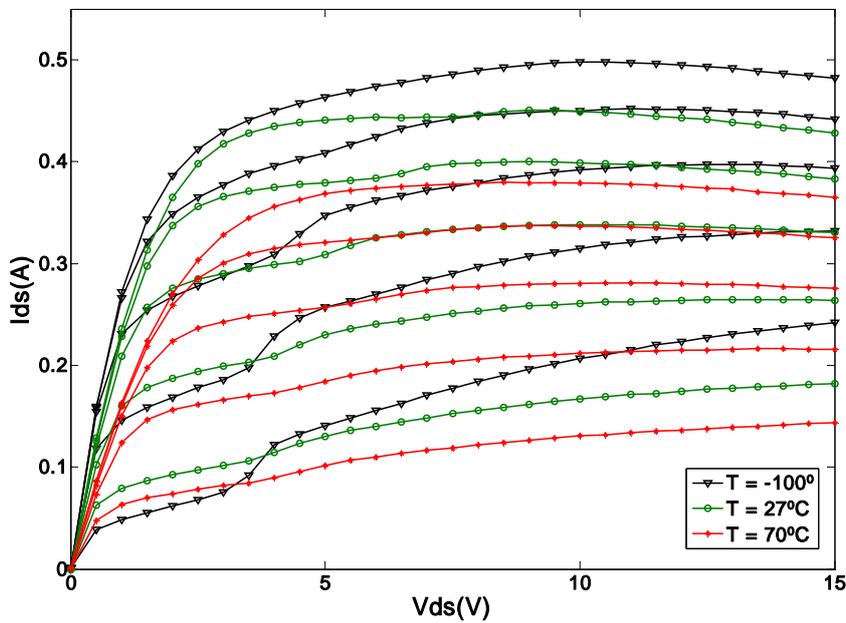


Fig. 7. Comparaison du courant I_{ds} pour le transistor vierge à $V_{gs} = -3.5V$ à $-0.5V$ avec un pas de $0.5V$.

Dans notre travail et pour l'étude de l'influence de la température sur l'effet de kink et dans le but de calculer l'énergie d'activation des électrons piégés d'une série de mesures DC à des températures différentes (-100°, -70°, -30°, 0°, 27°, 50° et 70°) sur des transistors HEMT AlGa_N/Ga_N (8x75 μm) vierges et des transistors HEMT AlGa_N/Ga_N (8x75 μm) soumis à un vieillissement électrique et thermique à la température T=300°C dans un test de III-V labs.

Les figures 6 et 7 présentent le comportement mesuré pour les transistors étudiés (vierge et soumis au vieillissement respectivement), de la caractéristique I/V en fonction de la température ; l'effet kink a peu d'importance pour des fortes valeurs de température, et spécialement pour le transistor soumis au vieillissement puisque ce dernier est soumis à des températures très élevée (300 °C) dans le processus de vieillissement ce qui entraîne la diminution de la présence de niveaux pièges suite à l'augmentation de la température.

L'effet de kink est lié au piégeage et dépiégeage des électron dans des niveaux d'énergie intermédiaire. Donc à la fois le champ électrique et la température peuvent influencer le taux de piégeage / dépiégeage des électrons.

Le courant I_{kink} est défini comme la différence entre le courant où tous les électrons sont libérés et le courant de début de piégeage des électrons à la tension V_{kink} dans notre cas [2.5V, 5V].

$V_{gs}(V)$	$I_{kink}(-100^{\circ}C)$	$I_{kink}(-70^{\circ}C)$	$I_{kink}(30^{\circ}C)$	$I_{kink}(0^{\circ}C)$	$I_{kink}(27^{\circ}C)$	$I_{kink}(50^{\circ}C)$	$I_{kink}(70^{\circ}C)$
-3	67.674	43.149	35.835	37.29	32.178	20.713	16.0894
-2.5	108.6	70.208	58.507	62.164	52.656	32.361	11.152
-2	128.35	84.104	72.402	56.313	59.901	36.018	14.26

Table1: Valeur du courant de kink I_{kink} pour le transistor HEMT de AlGa_N/Ga_N soumis au processus de vieillissement.

$V_{gs}(V)$	$I_{kink}(-100^{\circ}C)$	$I_{kink}(-70^{\circ}C)$	$I_{kink}(30^{\circ}C)$	$I_{kink}(0^{\circ}C)$	$I_{kink}(27^{\circ}C)$	$I_{kink}(50^{\circ}C)$	$I_{kink}(70^{\circ}C)$
-3	78.80	54.23	44.98	37.58	35.65	29.07	29.66
-2.5	68.56	50.33	41.52	34.81	23.95	21.97	20.29
-2	43.69	34.25	29.37	33.54	23.21	19.55	35.65

Table2: Valeur du courant de kink I_{kink} pour le transistor HEMT de AlGaIn/GaN vierge.

Les tables 1 et 2 présentent les valeurs du courant I_{kink} à des hautes températures (HT) : 70° et 50°, à la température ambiante 27° (TA) et à des températures basses (TB) : -100°, -70°, -30°, et 0° à différentes tensions V_{gs} : -3V, -2.5V et -2V pour les deux transistors étudiés vierge et soumis au processus de vieillissement.

A la TA et à HT l'effet de kink tend à disparaître pour les deux transistors. A des TB les valeurs du courant I_{kink} prouvent la forte influence de l'effet kink.

En fonction de la polarisation l'effet kink a plus ou moins d'importance selon qu'on approche de $V_{gs} = -3V$ pour le transistor vierge alors que pour les transistors soumis au vieillissement le kink a plus d'influence à $V_{gs} = -2V$

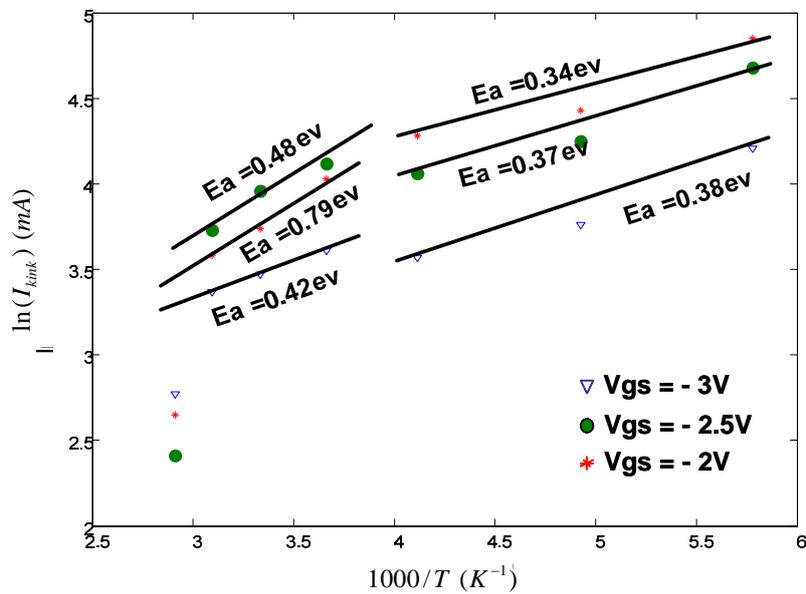


Fig. 8. Evolution du courant I_{kink} et de ses énergies d'activation pour le transistor HEMT de AlGaIn/GaN soumis au processus de vieillissement à $V_{gs} = -3$; -2.5 et -2V.

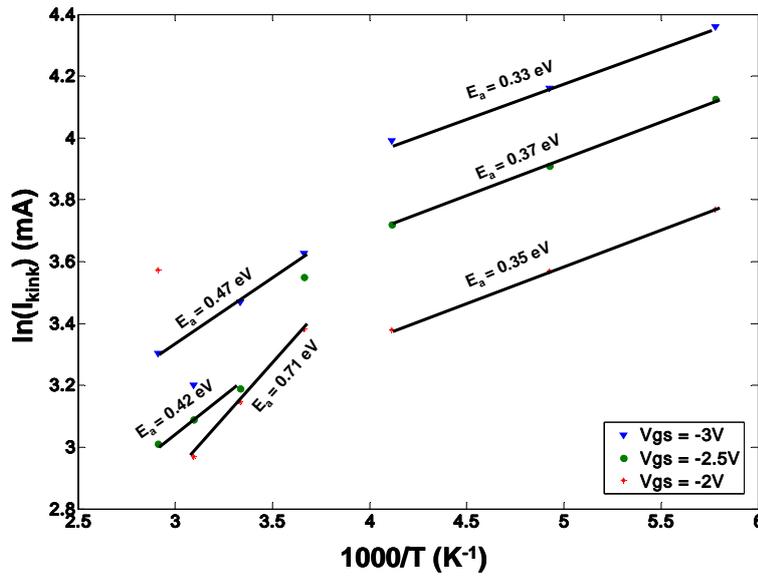


Fig. 9. Evolution du courant I_{kink} et de ses énergies d'activation pour le transistor HEMT de AlGaIn/GaN vierge à $V_{gs} = -3$; -2.5 et $-2V$

En fonction de l'évolution de l'amplitude du courant I_{kink} et en fonction de la température, le tracé d'Arrhenius donne deux énergies d'activation à basse température BT et à haute température HT, qui indiquent l'énergie des pièges impliqués.

Les figures 8 et 9 illustrent l'évolution du courant I_{kink} et les énergies d'activation déterminées pour les deux transistors étudiés.

$V_{gs}(V)$	$E_a(I_{kink})$			
	Transistor soumis au vieillissement		Transistor vierge	
	BT	HT	BT	HT
-3	0.42	0.38	0.47	0.33
-2.5	0.48	0.37	0.42	0.37
-2	0.79	0.34	0.71	0.35

Table 3 : Résumé des résultats des énergies d'activation pour les transistors étudiés.

La table 3 résume les résultats de la détermination des énergies d'activation pour les deux transistors étudiés à des températures basses et hautes.

A haute température les valeurs de E_a sont de l'ordre de 0.33 eV à 0.38 eV correspondant à V_{gs} de -3V à -2V pour les deux transistors.

A basse température les valeurs de E_a sont de l'ordre de 0.42 eV à 0.79 eV correspondant à V_{gs} de -3V à -2V mais aussi il y a une marge de variation de (0.04-0.08 eV) entre le transistor vierge et celui soumis au vieillissement et cela peut être lié à la forte température appliquée (300°C) lors du vieillissement.

Il est suggéré que l'effet kink peut être induit par le piégeage des électrons chauds assistés par le champ de piégeage au moyen des donneurs en forme de piège dans la couche de buffer de GaN [16]. L'énergie d'activation des pièges responsables de l'effet de kink se trouve à 589 ± 67 meV à partir des mesures dépendant de la température.

D'autre [17] ont montré que le kink est lié à des changements de tension de pincement, les pièges doivent être situés sous la grille, à la barrière AlGaIn ou dans la couche de buffer GaN. La présence de pièges profonds dans la couche buffer de GaN pourrait expliquer à la fois les expériences de la résolution spectrale de la photostimulation et l'accumulation de charge négative lente.

III- 5- Caractérisation des pièges

Dans la littérature beaucoup de chercheurs ont traités le problème des effets de pièges sur le comportement des transistors [18- 25]. Le nombre de charges piégées dépend de la polarisation de la grille, du drain et aussi de la température [26- 28].

L'énergie thermique et l'énergie du photon due à la lumière sont connues pour donner de l'énergie aux électrons piégés dans des niveaux d'énergie intermédiaires pour passer à la bande de conduction de façon à ce que la constante de temps des effets de pièges et le courant mesuré avec une polarisation de tension pulsée varient suivant ces conditions.

III-5-1- Mesure de gate-lag

Afin de caractériser les pièges et de calculer leur énergie d'activation une série de mesures du gate-lag a été effectuée.

Les composantes mesurées dans cette partie sont des transistors HEMTs de GaN 8x75 de la plaque AEC 1303 de III-V labs vierge et soumis à un vieillissement à la température $T=300^{\circ}\text{C}$. Les dispositifs sous test sont alimentés à la grille avec une tension pulsée $V_{gs} = (-4,0)$ de largeur de pulse de $1 \mu\text{s}$ et de période de 1ms et au drain avec une tension DC $V_{ds}=1\text{V}$. Le processus de la méthode de mesure de gate-lag est présenté sur la figure 10.

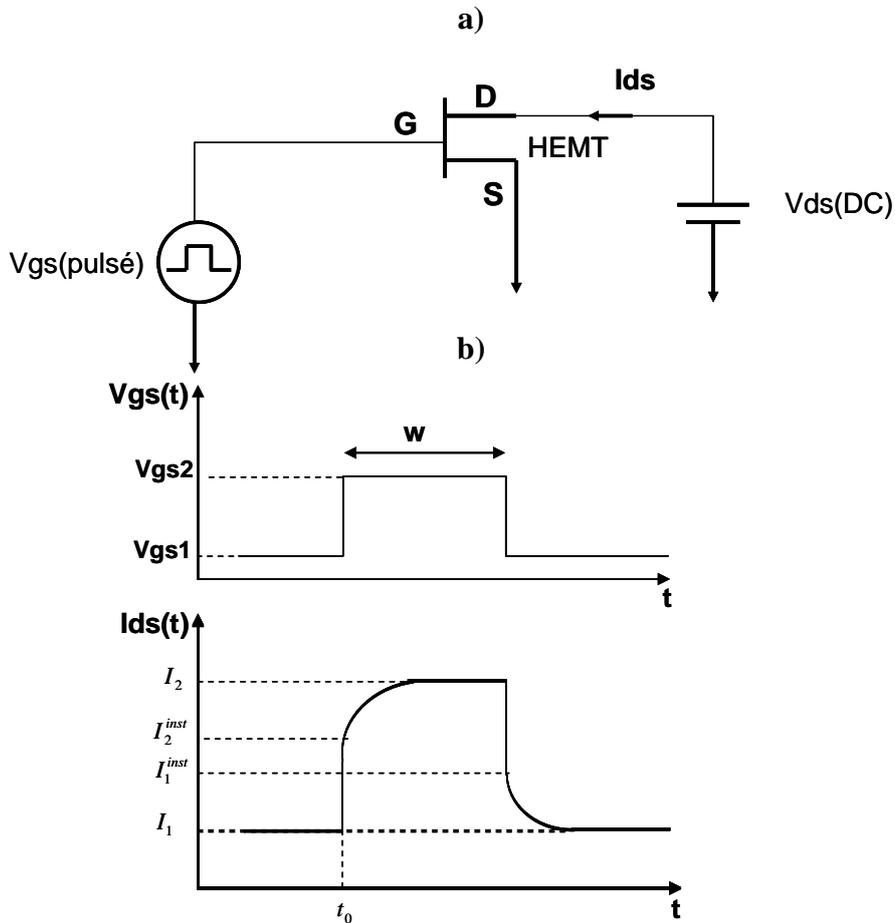


Fig. 10. : a) Schéma de mesure de gate-lag ; b) signal de $V_{gs}(t)$ et les mesures de $I_{ds}(t)$ en fonction du temps.

Les pièges sont des défauts électriquement actifs répartis spatialement dans les couches et aux interfaces des divers matériaux constituant les composantes et situés énergétiquement dans la bande interdite de ces matériaux semi-conducteurs. La réponse transitoire du courant de drain est lente lorsque la tension grille source V_{gs} est rapidement changée. Les pièges qui traduisent l'effet gate-lag émettent ou capturent des charges qui ne participent alors plus directement au courant de drain et qui sont l'origine de ces transitoires comme le montre la figure 10.

La figure 11 présente le comportement du courant $I_{ds}(t)$ pour des transistors HAMTs de GaN 8x75 de la plaque AEC 1303 de III-V labs vierge et soumis à un vieillissement à la température $T=300^{\circ}\text{C}$ pendant un temps de 6, 24, et 1038 heures. Les résultats présentés montrent une diminution du courant I_{ds} causée par l'effet de vieillissement et un comportement transitoire du courant de drain dû à l'effet du phénomène gate-lag expliqué précédemment.

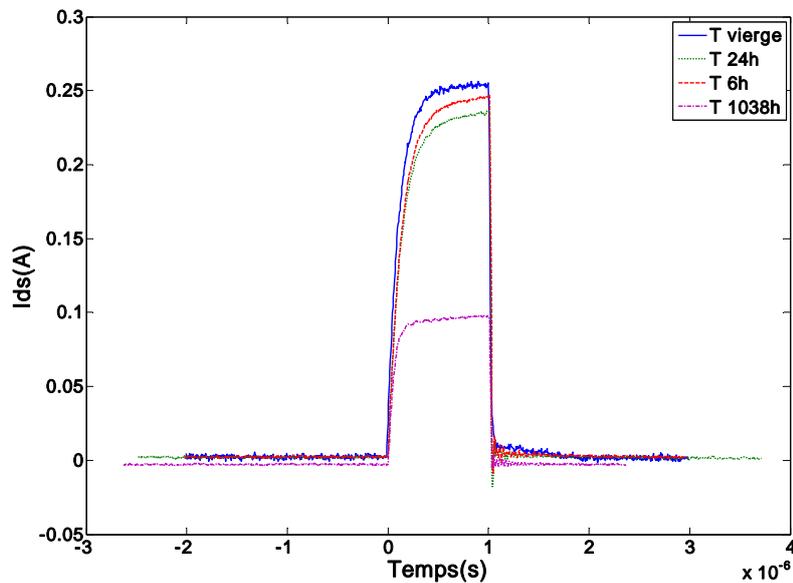


Fig. 11 : comportement transitoire de I_{ds} lors d'un pulse de V_{gs} de -4V à 0V et $V_{ds}=1\text{V}$ vierge et soumis au processus de vieillissement à la température 300° pendant 6h, 24h, et 1038h.

Les pièges réagissent normalement d'une façon exponentielle en fonction du temps. Le courant de drain peut être décrit par l'équation (1)

$$i_{ds}(t) = I_2 - \Delta I_2 e^{-(t-t_0)/\tau_g} \quad t_0 < t < t_0 + t_w \quad (1)$$

$$\Delta I_2 = I_2 - I_2^{inst}$$

L'émission de la charge est un phénomène lent, les mesures de l'effet gate-lag effectués peuvent être modélisés à partir de l'équation (1) dans le but de déterminer la valeur de la constante de temps.

Transistor étudié	T_Vierge	T_6h	T_24h	T_1038h
τ_g (s)	1.332 e-7	1.48 e-7	1.54 e-7	3.21 e-7

Table 4: Valeur de la constante de temps de gate-lag τ_g pour le transistor HEMT de AlGaIn/GaN soumis au processus de vieillissement à la température 320 °C pendant 6h, 24h, et 1038h.

A partir des résultats présentés au tableau 4 du calcul de la constante de temps τ_g pour les transistors HEMTs de AlGaIn/GaN vierge et soumis au processus de vieillissement à la température 300° pendant 6, 24, et 1038 heure on remarque que la constante de temps de gate-lag augmente à cause de la génération des pièges à la surface grille -drain; dans ce cas les pièges doivent être nourris par un "lent" mécanisme de conduction (comme le mécanisme de hopping), afin d'expliquer les constantes de temps régissant les transitoires gate-lag dans ces composantes.

III- 5- 2- Influence de la température sur l'effet de Gate-lag :

L'énergie thermique, comme l'énergie due à la lumière, contribue également à l'émission des porteurs piégés. Pour étudier l'influence de la température sur l'effet de gate-lag des mesures décrites à III- 5- 1 ont été effectuées pour les températures suivantes : 40 °C, 50 °C, 60 °C, et 75 °C, pour des transistors HEMTs de GaN 8x75 μm de la plaque AEC 1303 de III-V labs vierge et soumis à un vieillissement électrique et thermique à la température T=300°C pendant un temps de 1038 heure.

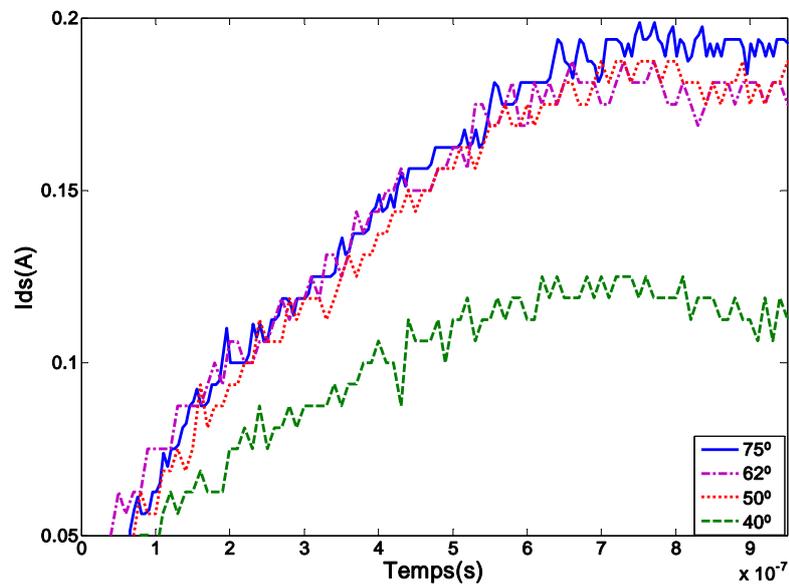


Fig. 13: Mesure de gate-lag pour le transistor HEMT de AlGaIn/GaN soumis au processus de vieillissement à la température 300 °C en fonction de la température.

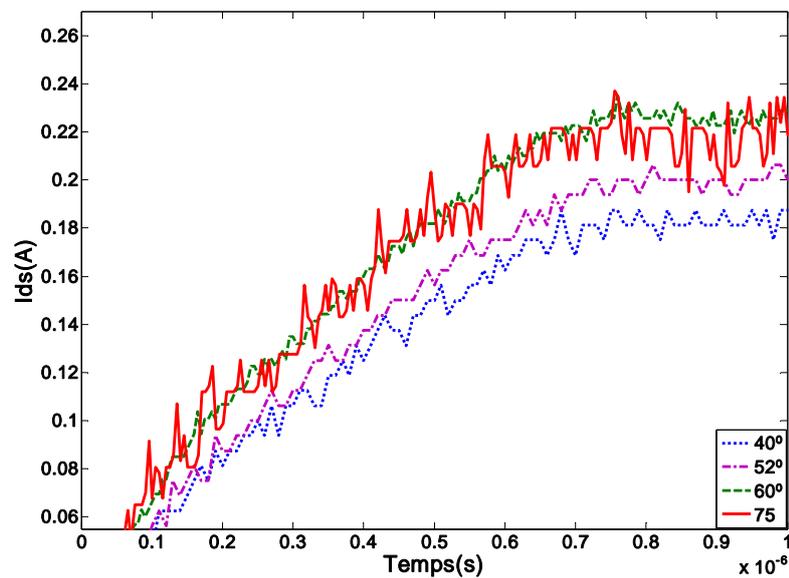


Fig. 14 : Mesure de gate-lag pour le transistor HEMT de AlGaIn/GaN vierge en fonction de la température

Les figures 13 et 14 présentent les résultats de mesure de gate-lag pour les transistors HEMTs de AlGaIn/GaN vierge et soumis au processus de vieillissement à la température 300 °C en fonction de la température.

A partir de ces mesures et la modélisation avec l'équation (1) nous avons déterminé les valeurs de la constante de temps τ_g des transistors étudiés en fonction de la température.

Les tables 5 et 6 rassemblent les valeurs calculées.

Température	40 °C	50 °C	60 °C	75 °C
τ_g	$2.3092 \cdot 10^{-7}$	$1.5380 \cdot 10^{-7}$	$1.1403 \cdot 10^{-7}$	$1.0044 \cdot 10^{-7}$

Table 5: Valeur de la constante de temps de gate-lag τ_g pour les transistors HEMTs de AlGaIn/GaN vierge en fonction de la température.

Température	40 °C	50 °C	60 °C	75 °C
τ_g	$3.15 \cdot 10^{-7}$	$2.4 \cdot 10^{-7}$	$2.01 \cdot 10^{-7}$	$1.2 \cdot 10^{-7}$

Table 6: Valeur de la constante de temps de gate-lag τ_g pour les transistors HEMTs de AlGaIn/GaN soumis au processus de vieillissement à la température 300 °C en fonction de la température.

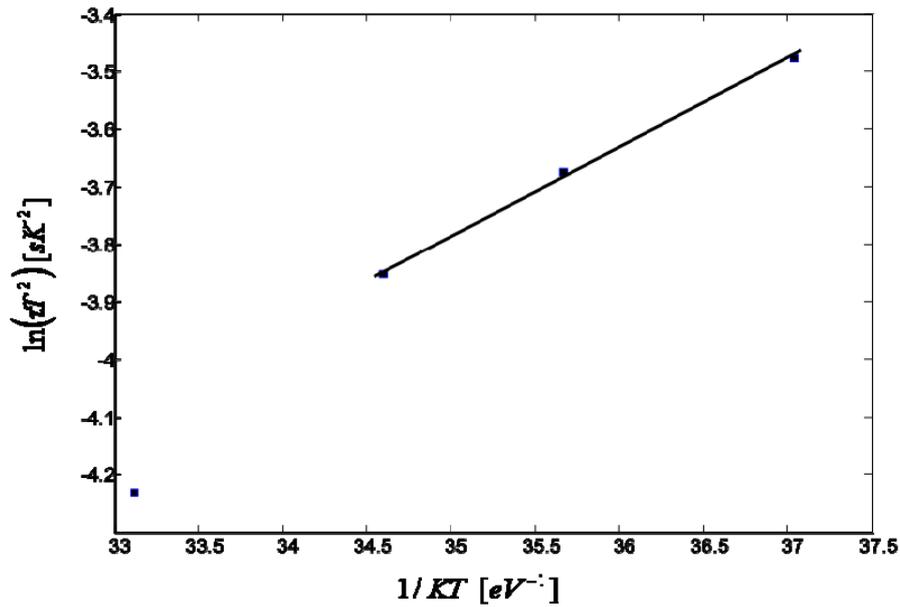


Fig. 15. Tracé d'Arrhenius en fonction de la température à partir des mesures de gate-lag pour le transistor soumis au processus de vieillissement.

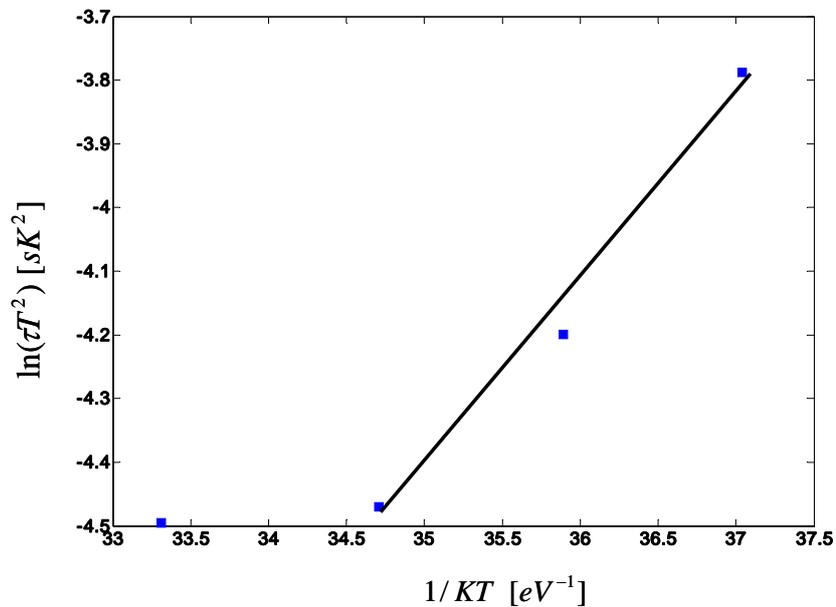


Fig. 16. Tracé d'Arrhenius en fonction de la température à partir des mesures de gate-lag pour le transistor vierge.

Les différentes constantes de temps calculées à des températures diverses ont été tracées dans un tracé d'Arrhenius pour extraire la valeur de l'énergie d'activation des pièges impliqués. Les figures 15 et 16 illustrent le tracé d'Arrhenius pour les deux transistors.

Pour le transistor vierge $E_a = 0.35\text{eV}$ à des haute température est relativement en accord avec la valeur extraite des mesures de l'effet de kink dans la même marge de température. De même pour le transistor soumis au processus de vieillissement la valeur calculée de $E_a = 0.33\text{eV}$ est dans la marge des valeurs d'énergie d'activation extraite dans le paragraphe précédent confirmant une identification correcte des pièges principaux présents dans les dispositifs.

III- 6- Modèle de dégradation d' I_{ds} :

On peut séparer les caractéristiques I/V d'un transistor HEMT en deux régions : une région linéaire dans laquelle le courant I_{ds} croît avec la tension V_{ds} et une région dite de "saturation" où le courant de drain est sensiblement indépendant de V_{ds} . Ce comportement met en jeu un ensemble de phénomènes.

- **Fonctionnement linéaire**

Pour les faibles valeurs de la tension de drain la densité de porteurs dans le canal reste sensiblement uniforme sous la grille. Cette densité dépend essentiellement de la tension qui polarise celle-ci. Le dispositif se comporte alors comme une conductance contrôlée par la grille : le courant I_{ds} varie proportionnellement à V_{ds} .

- **Régime de saturation du courant**

Lorsque la tension de drain s'accroît l'effet du champ électrique s'accroît à la sortie de la grille (extension de la zone de charge d'espace). Cela provoque le ralentissement de la croissance du courant de drain. Trois mécanismes sont alors susceptibles de provoquer la "saturation" du courant de drain : le pincement du canal, la saturation de vitesse des électrons en régime de transport et le transfert après régime de survitesse [29].

Dans le but de proposer un modèle de dégradation du courant de saturation et en se basant sur des mesures effectuées sur différents dispositifs HEMTs de AlGaIn/GaN,

on a étudié la dépendance envers le temps du courant de saturation I_{dss} du transistor représentative l'influence de ce type d'essais sur la technologie GaN.

Comme étayé par Y. C. Chou et al. [1], l'inter-diffusion de Ti dans la couche AlGaAs de la barrière de Schottky est le mécanisme principal de la dégradation des PHEMTs de GaAs après l'augmentation de la température. En conséquence, la baisse de profondeur de la grille évolue comme une loi de taux de diffusion parabolique [30].

Basé sur un test de vie à trois températures élevées, un modèle de dégradation de I_{dss} a été développé par Chou et al [31] pour prévoir la performance du courant de saturation I_{dss} , des transistors PHEMTs de GaAs de $0,15 \mu m$ fonctionnant à des températures de canal différentes pendant le test.

Une expression (2) dérivée de la proposée par Chou et al [31] a été utilisée pour ajuster les données expérimentales actuelles de la réduction du courant de saturation.

$$\Delta I_{dss} = S_0 * \exp\left(\frac{-E_a}{KT_{channel}}\right)(t - t_0)^\gamma \quad (2)$$

où t est la durée du test (en heures), t_0 est l'instant initial (heures), K est la constante de Boltzmann ($8,625 \cdot 10^5 \text{ eVK}^{-1}$) et $T_{Channel}$ la température du canal. S_0 , E_a et γ sont des paramètres à déterminer avec un processus d'optimisation approprié.

Dans la bibliographie le paramètre E_a est connu comme l'énergie d'activation d'une valeur de $-0,83$ pour l'AsGa et $\gamma=0.5$ [11].

Nous avons effectué des mesures sur des dispositifs HEMTs de AlGaIn/GaN $8 \times 75 \mu m$ fournis par différents fournisseur (III-V labs, Qinetiq) le tableau 7 résume les dispositifs mesurés, les conditions de mesure (polarisation et température) ainsi que le temps de mesure utilisé dans chacun d'eux.

TEST	V _{DS} (V)	Duré de test (heure)	Température du canal
Test HTRB	30	2000	200 °C
Test OCT	10	2000	III-V Labs : 199°C Qinetiq : 195°C
Test HTOL	20	2000	III-V Lab : 317°C Qinetiq : 195°C
Test IDQ	30	2000	III-V Labs : 75.5°C Qinetiq : 40°C

Tableau7 : Résumé des mesures réalisé pour les différents dispositifs.

L'optimisation de ces mesures avec l'équation (2) permet de déterminer les paramètres S_0 , E_a et γ la table 8 illustre les résultats de ces paramètres pour les transistors mesurés

	III-V Labs		Qinetiq	
	γ	E_a	γ	E_a
Test HTRB	0.25	0.33	0.25	0.32
Test OCT	0.25	0.34	0.25	0.32
Test HTOL	0.25	0.36	0.25	0.39
Test IDQ	0.25	0.42	0.25	0.42

Tableau 8 : Paramètres obtenus pour les différents dispositifs de la modélisation de la dégradation du courant de saturation Idss.

Les figures 17, 18, 19 et 20 présentent la comparaison entre l'évolution de la dégradation du courant Idss mesuré et les résultats d'optimisation en utilisant le modèle proposé (équation 2) pour 4 dispositifs étudiés.

Les résultats de mesure des dispositifs présentent une dégradation forte avant 600 heures pour tous les transistors et après elle se stabilise approximativement jusqu'à 2000 heures.

La dégradation du courant de saturation dépend de la température et du champ électrique appliqué, par exemple pour les dispositifs de III-V Labs à $T = 317^\circ\text{C}$ et $V_{ds} = 20\text{V}$ $dI_{dss} = -24\%$ alors que à $T = 75.5^\circ\text{C}$ et $V_{ds} = 30\text{V}$ $dI_{dss} = 30\%$ après 600 heures. Tandis que pour les transistors de Qinetiq à $T = 40^\circ\text{C}$ et $V_{ds} = 30\text{V}$ $dI_{dss} = 10\%$ et à $T = 200^\circ\text{C}$ et $V_{ds} = 30\text{V}$ $dI_{dss} = 25\%$ cela explique que l'augmentation de la température influe sur la dégradation du courant de saturation pour ces composantes.

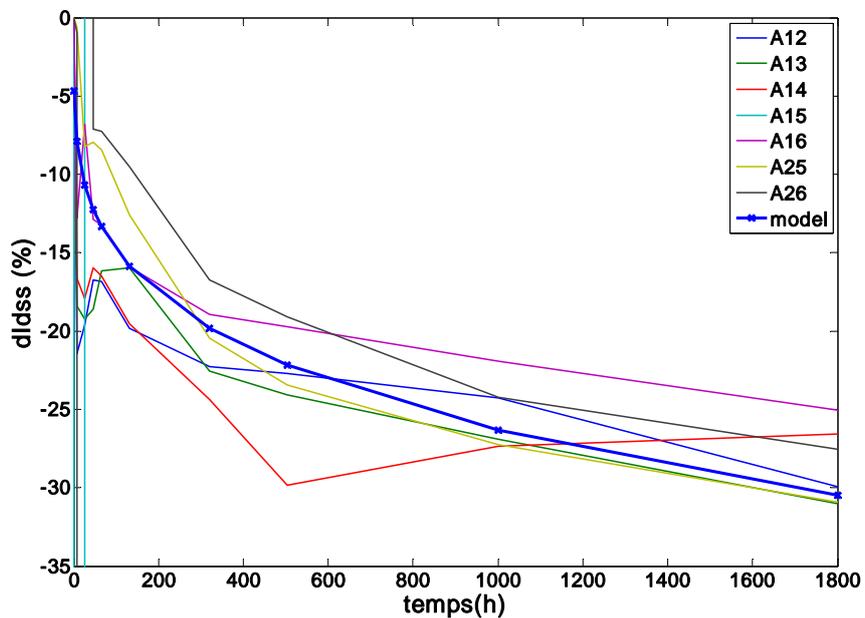


Fig. 17. Comparaison entre le modèle de réduction du courant de saturation et les résultats mesurés pour le dispositif HOTL de III-V Labs

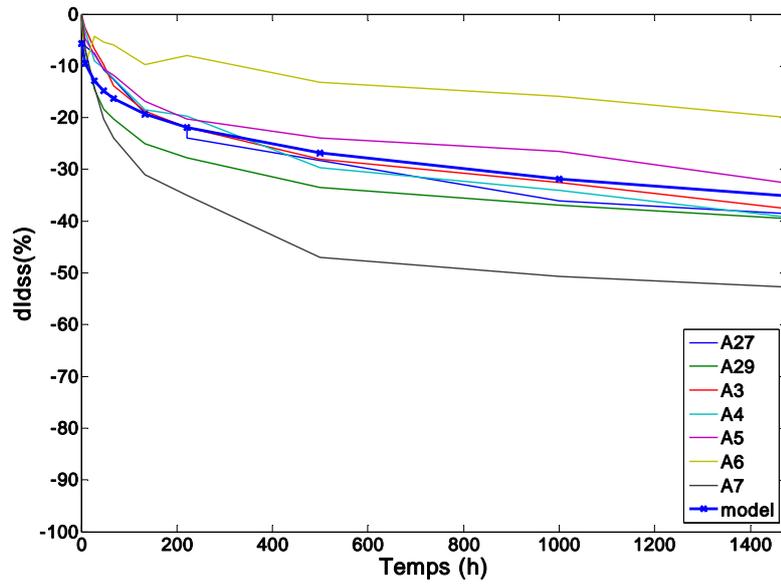


Fig. 18. Comparaison entre le modèle de réduction du courant de saturation et les résultats mesurés pour le dispositif IDQ de III-V Labs.

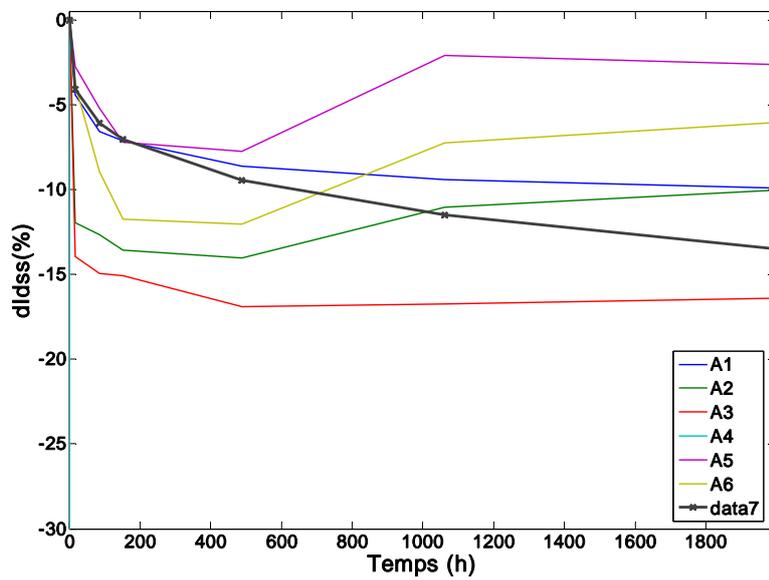


Fig. 19. Comparaison entre le modèle de réduction du courant de saturation et les résultats mesurés pour le dispositif HTOL de Qinetiq.

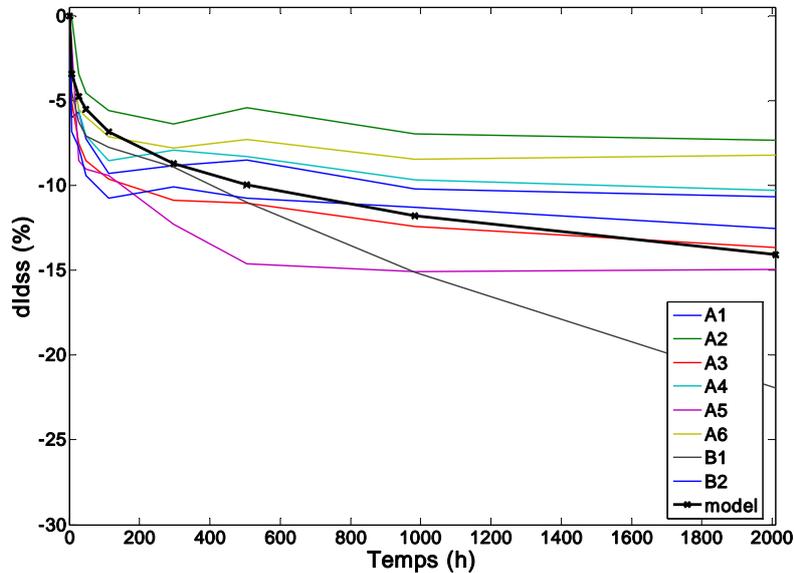


Fig. 20. Comparaison entre le modèle de réduction du courant de saturation et les résultats mesurés pour le dispositif IDQ de Qinetiq.

Les résultats affichés dans les Figures précédentes indiquent un excellent degré de précision pour le modèle de la dégradation du courant I_{dss} des transistors HEMTs de AlGaIn/GaN pendant un fonctionnement de longue durée à des températures de canal différentes.

Afin de valider ce modèle nous avons réalisé une série de mesure sur des transistors HEMTs de AlGaIn/GaN $2 \times 50 \mu m$ de la plaque 1262 de III-V Labs à trois températures 200° , 250° et $300^\circ C$ et à $V_{ds} = 25V$ pendant un temps de 2038h. L'optimisation de ces mesures avec l'équation 3 permet de déterminer les paramètres $E_a = 0.45 \text{ eV}$ et $\gamma = 0.25$. Il en résulte que le modèle proposé est valable pour ce type de transistors aussi.

Sur la figure 21 une comparaison se présente entre les résultats mesurés et ceux modélisés et obtenus à partir de l'équation (2).

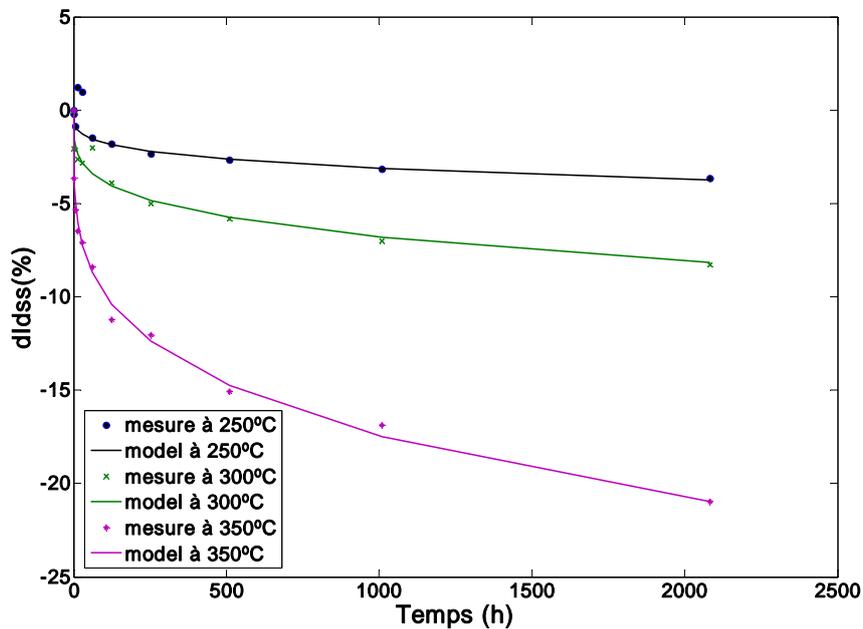


Fig. 21. Comparaison entre le modèle de réduction du courant de saturation et les résultats mesurés pour les transistors HEMTs de AlGaIn/GaN $2 \times 50 \mu m$ à des températures de canal différentes .

A partir de ces mesures aussi on voit bien l'influence de la température sur la dégradation du courant de saturation Idss, plus la température augmente plus la réduction du courant de saturation est plus forte.

III- 7- Conclusion

Dans ce chapitre une étude détaillée de l'effet kink a été effectuée. L'analyse électrique de cet effet à partir des mesures en DC à trois températures (-100° , 27° et 70°) permet d'observer l'augmentation brusque du courant de drain pour des tension Vds déterminées ainsi que l'augmentation de la conductivité de sortie gds et l'augmentation du courant de grille Ig pour des transistors HEMTs de AlGaIn/GaN $8 \times 75 \mu m$ vierge et soumis à un processus de vieillissement électrique et thermique à $T = 300^\circ C$ dans un test de III-V Labs.

Pour l'étude de l'influence de la température sur l'effet de kink et dans le but de calculer l'énergie d'activation des électrons piégés, une série de mesures DC a été réalisée à des températures différentes (-100°, -70°, -30°, 0°, 27°, 50° et 70°) sur les transistors étudiés.

En fonction de l'évolution de l'amplitude du courant I_{kink} (courant qui indique le taux de piégeage/ dépiégeage) et en fonction de la température, le tracé d'Arrhenius donne deux énergies d'activation à basse température BT et à haute température HT, qui indique l'énergie des pièges impliqués.

Les pièges dans les HEMTs sur GaN ont été caractérisés aussi en utilisant les mesures de gate-lag en fonction de la température afin d'indiquer la localisation et la concentration d'un piège et pour faciliter la détermination de son énergie d'activation pour les transistors étudiés.

Un modèle de dégradation de courant de saturation I_{dss} en fonction du temps est proposé se basant sur la proposition de Chou, et a été appliqué à des dispositifs HEMTs de AlGaIn/GaN de différentes tailles et des fabrications différentes aussi.

Les mesures montrent l'influence de la température et du champ électrique appliqué lors de l'essai. Les résultats indiquent un excellent degré de précision pour le modèle de la dégradation du courant I_{dss} proposé.

Références

- [1] Y. C. Chou, R. Grundbacher, D. Leung, R. Lai, P. H. Liu, Q. Kan, M. Biedenbender, M. Wojtowicz, D. Eng, and A. Oki, *IEEE Electron Device Lett.*, pp. 64-66, 2004.
- [2] U. K. Mishra, P. Parikh, and Y.-F. Wu, “AlGa_N/Ga_N HEMTs—An overview of device operation and applications,” *Proc. IEEE*, vol. 90, no. 6, pp. 1022–1031, Jun. 2002.
- [3] A. Matulionis, J. Liberis, L. F. Eastman, and Y. J. Sun, “Drift Velocity Saturation and Hot-Phonon Disintegration in Al Ga_N/Al_N/Ga_N Channels,” in *Proc. WOCSDICE*, A. Porch, R. Perks, and V. Morgan, Eds., Cardiff, U.K., 2005, pp. 71–72.
- [4] J. Deng, R. Gaska, M. S. Shur, M. A. Khan, and J. W. Yang, “Negative Differential Conductivity in AlGa_N/Ga_N HEMT : Real Space Charge Transfert from 2D to 3D States ?” *Mrs Internet J. Nitride Semicon.*, vol. Res.5S1 W4.5, 2000.
- [5] P. M. Fabis and H. Windischmann, “Thermal Management Enhancement for GaAs Devices Using CVD Diamond Heat Spreaders in a Plastic Package Environment,” *Journal of Electronic Packaging*, vol. 122 Issue 2, pp. 92–97, 2000.
- [6] R. Aubry, “Etude des Aspects Electrothermiques de la Filière HEMT AlGa_N/Ga_N pour les Applications de Puissance Hyperfréquence,” Ph.D. dissertation, Université de Lille, France, 2001
- [7] S. M. Sze, *Semiconductor Devices - Physics and Technology*, Wiley, Ed., 1985.
- [8] M. S. Shur, “Ga_N and Related Materials for High Power Applications,” in *Symposium Proceedings of Material Research Society, Symposium E*, Fall 1997.
- [9] S. L. Delage, M. A. Poisson, C. Brylinski, and H. Blanck, “Composant Semiconducteur avec Dissipateur Thermique Intégré,” 25 Juillet 1995.
- [10] B. Brar, K. Boutros, R. E. DeWames, V. Tilak, R. Shealy, and L. Eastman, “Impact ionization in high performance AlGa_N/Ga_N HEMTs,” in *Proc. IEEE Lester Eastman Conf.*, 2002, pp. 487–491.

- [11] A. S. Brown, U. K. Mishra, C. S. Chou, C. E. Hooper, M. A. Melendes, M. Thompson, L. E. Larson, S. E. Rosenbaum, and M. J. Delaney, “ AlInAs-GaInAs HEMT’s utilizing low-temperature AlInAs buffers grown by MBE,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 10, no. 12, pp. 565-568, 1989.
- [12] T. Zimmer, D. Ouro Bodi, J. M. Dumas, N. Labat, A. Touboul, and Y. Danto, “Kink effect in HEMT structures: A trap-related semi-quantitative model and an empirical approach for spice simulation,” *Solid-State Electron.*, vol. 35, no. 10, pp. 1543-1548, 1992.
- [13] Ching-Hui Lin, Wen-Kai Wang, Po-Chen Lin, Cheng-Kuo Lin, Yu-Jung Chang, and Yi-Jen Chan, “Transient Pulsed Analysis on GaN HEMTs at Cryogenic Temperatures,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 16, no. 10, pp. 710-712, 2005.
- [14] Tatsushi Akazaki, Hideaki Takayanagi, and Takatomo Enoki, Member, IEEE “Kin Effect in an InAs-Inserted-Channel InAlAs/InGaAs Inverted HEMT at Low Temperature” *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, VOL. 17, NO. 7, JULY 1996
- [15] R. Cuervo, Y. Pei, Student Member, IEEE, Z. Chen, Senior Member, IEEE, S. Keller, S. P. DenBaars, Fellow, IEEE, F. Calle, and U. K. Mishra, Fellow, IEEE “The Kink Effect at Cryogenic Temperatures in Deep Submicron AlGaIn/GaN HEMTs” *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, VOL. 30, NO. 3, MARCH 2009.
- [16] Maojun Wang and Kevin J. Chen, Senior, “Kink Effect in AlGaIn/GaN HEMTs Induced by Drain and Gate Pumping”, *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, VOL. 32, NO. 4, APRIL 2011.
- [17] G. Meneghesso, F. Zanon, M. J. Uren, and E. Zanoni, “Anomalous kink effect in GaN high electron mobility transistors,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 30, no. 2, pp. 100–103, Feb. 2009.
- [18] J. Joh, J. A. del Alamo and J. Jiménez, “A simple current collapse measurement technique for GaN High-Electron Mobility Transistors” *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 29, no. 7, pp. 665-667, Jul. 2008.
- [19] J. M. Tirado, J. L. Sánchez-Rojas and J. I. Izpura, “Trapping effects in the transient response of AlGaIn/GaN HEMT devices” *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 54, no. 3, pp. 410-417, Mar. 2007.
- [20] G. Meneghesso, G. Verzellesi, R. Pierobon, F. Rampazzo, A. Chini, U. K. Mishra, C. Canali and E. Zanoni, “Surface-Related Drain Current Dispersion Effects in AlGaIn-GaN HEMTs” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 51, no. 10, pp. 1554–1564, Oct. 2004.

- [21] J. Y. Shiu, V. desmaris, N. Rosman, K. Kumakura, T. Makimoto, H. Zirath and E. Y. Chang, "DC and microwave performance of AlGaIn/GaN HEMTs passivated with sputtered SiNx" *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 22, pp. 717-721, 2007.
- [22] M. F. Romero, A. Jiménez, J. Miguel-Sánchez, A. F. Braña, F. González-Posada, R. Cuerdo, F. Calle and E. Muñoz, "Effects of N₂ plasma pretreatment on the SiN passivation of AlGaIn/GaN HEMT" *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 29, no. 3, pp. 209-211, Mar. 2008.
- [23] M. Faqir, G. Verzellesi, G. Meneghesso, E. Zanoni and F. Fantini, "Investigation of High-Electron-Field degradation effects in AlGaIn/GaN HEMTs" *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 55, no. 7, pp. 1592-1602, Jul. 2008.
- [24] R. Vetry, N. Q. Zhang, S. Kellerand and U. K. Mishra, "The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGaIn/GaN HFETs" *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 48, pp. 560-566, Mar. 2001.
- [25] J. M. Tirado, J. L. Sanchez-Rojas and J. I. Izpura, "2D simulation of static surface states in AlGaIn/GaN HEMT and GaN MESFET devices" *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 20, pp. 864-869, 2005.
- [26] J. Kuzmik, M. Blaho, D. Pogany, E. Gornik, A. Alam, Y. Dikme, M. Hueken, P. Javorka, M. Marso and P. Kordos, "Backgating, high-current and breakdown characterisation of AlGaIn/GaN HEMTs on silicon substrates" *33rd Conference on European Solid-State Device Research, ESSDERC '03*, pp. 319-322, Sept. 2003.
- [27] J. D. Albrecht, R. P. Wang and P. P. Ruden, "Electron transport characteristics of GaN for high temperature device modeling" *Journal of Applied Physics*, vol. 83, no. 9, pp. 4777-4781, May 1998.
- [28] Binari. S. C. et all, "Trapping effects in GaN and SiC microwave FETs", *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, n°. 6, pp. 1048-1058, 2002.
- [29] R. Castagne, J.P. Duchemin, M. Gloanec, C. Rumelhard, "Circuits Intégrés en Arséniure de Gallium", Masson
- [30] O. Wada, S. Yanagisawa, and H. Takanash, *Appl. Phys. Lett.*, pp. 263-265, 1996
- [31] Y. C. Chou, D. Leung, Q. Kan, M. Biedenbender, D. Eng, R. Lai, T. Block, and A. Oki "Reliability Model for Predicting Long-Term DC/RF Performance in GaAs PHEMTs", *IEEE* 2005.

Chapitre 4

Approche du model de fiabilité du courant de fuite I_{leak}

IV- 1- Introduction

Dans les applications telles que des amplificateurs de haute puissance et de haute fréquence pour les stations à base de dispositifs HEMTs de AlGaN / GaN, offrent plus d'avantages par rapport aux dispositifs GaAs plus traditionnelles Il s'agit principalement de la capacité de ces dispositifs de gérer les tensions de fonctionnement élevées dans des conditions de courant. Leur principal inconvénient, concerne leur fiabilité qui a besoin d'être amélioré considérablement [1]. Alors que les problèmes de fiabilité ont été considérés par les autres dispositifs basés sur AlGaN /GaN [2-3] ils ont traités la dégradation dans le courant de sortie, la puissance dissipée et la résistance de drain R_d de ces dispositifs.

Les effets de la dégradation du courant de fuite de la grille sur les paramètres électriques de base de ces dispositifs sont importants. L'effet sur le courant de saturation et les paramètres de tension de claquage méritent d'être soulignés [4].

Un fort courant de grille, induit une consommation plus élevée, une faible impédance, et une augmentation de bruit du HEMT. Ces conséquences limitent les performances du transistor HEMT de GaN pour les applications visées tel que les chaînes d'émission RF [5]. Les composants étudiés durant mes travaux présentent un courant de grille élevé (chap.2-3-3). Il est donc nécessaire de déterminer les mécanismes de transport qui sont à l'origine de ce courant.

L'étude du contact Schottky d'un transistor à effet de champ est l'une des étapes de la caractérisation indispensable pour la compréhension d'un grand nombre de phénomènes physiques qui limitent les performances des composants. Ces limitations sont bien souvent liées à des défauts intrinsèque au matériau sur lequel le contact a été réalisé ou alors à la fabrication de celui-ci.

IV- 2- Physique de la jonction sous la grille

Pour l'étude des transistors HEMT à base de Nitrure de Gallium en régime statique, le schéma équivalent choisit est celui utilisé pour des transistors à effet de champ réalisé en semi-conducteurs III-V usuel. Ce schéma équivalent représenté sur la figure 1 a été élaboré à partir de considération physiques et technologiques, et se scinde en deux zones : une zone dite intrinsèque qui correspond au « cœur » ou zone active du transistor et une zone dite extrinsèque qui correspond les éléments d'accès R_g , R_s , et R_D .

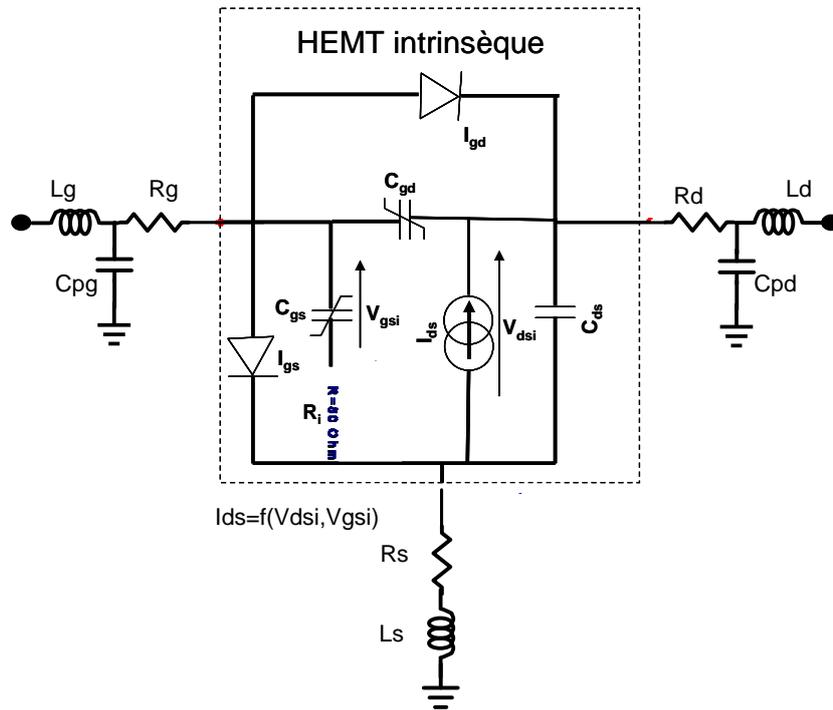


Fig.1. schéma équivalent du transistor HEMT AlGaIn/GaN.

L'électrode de commande ou grille, permet de moduler la densité d'électron du canal lorsque celui-ci est polarisé par une tension positive ou négative. La grille est un contact métal semi-conducteur de type Schottky ou redresseur. Pour réaliser ce type de contact, le choix de métal est primordial et dépend de la nature du semi conducteur avec lequel il est associé. Comme nous l'avons déjà évoqué au premier chapitre, le nitrure de gallium est naturellement de type n. par conséquent la réalisation d'un contact redresseur nécessite d'utiliser un métal dont le travail de sortie (ϕ_m) est supérieur à celui du semi conducteur (ϕ_s) avec lequel se trouve en contact, c'est-à-dire le GaN ou l'AlGaIn suivant la structure considérée.

Le diagramme énergétique du métal et du semi conducteur de type n telle que $\phi_m > \phi_s$ est représenté sur la figure 2 [6-8].

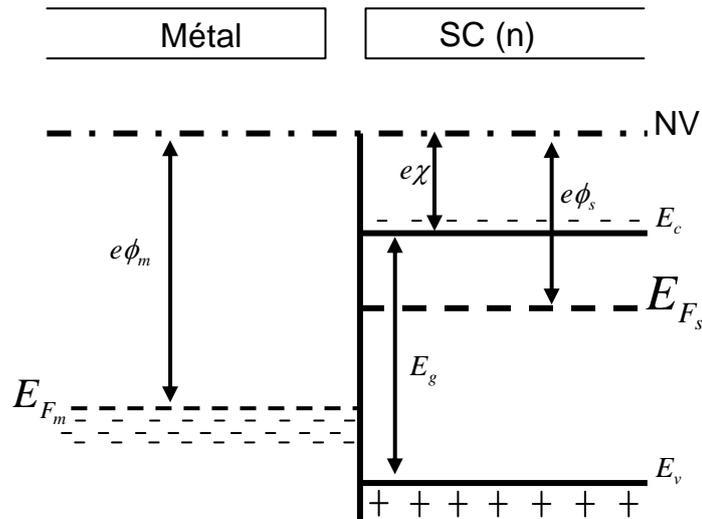


Fig.2. Diagramme énergétique d'un métal et d'un semi conducteur de type n (sans contact).

Lorsque les deux matériaux sont mis en contact, le travail de sortie du semi conducteur étant inférieur à celui du métal, les électrons passent du semi conducteur dans le métal. Il apparait dans le semi conducteur une charge d'espace positive, les donneurs ionisés n'étant plus compensés par les électrons. Le nombre de charge positive (ions donneurs) développés dans le semi conducteur est égal au nombre de charge négative (électrons) développées dans le métal. Le régime d'équilibre est alors défini par l'alignement des niveaux de Fermi. Le diagramme énergétique du contact métal semi-conducteur (n) à l'équilibre thermodynamique est représenté figure 3 [6-8].

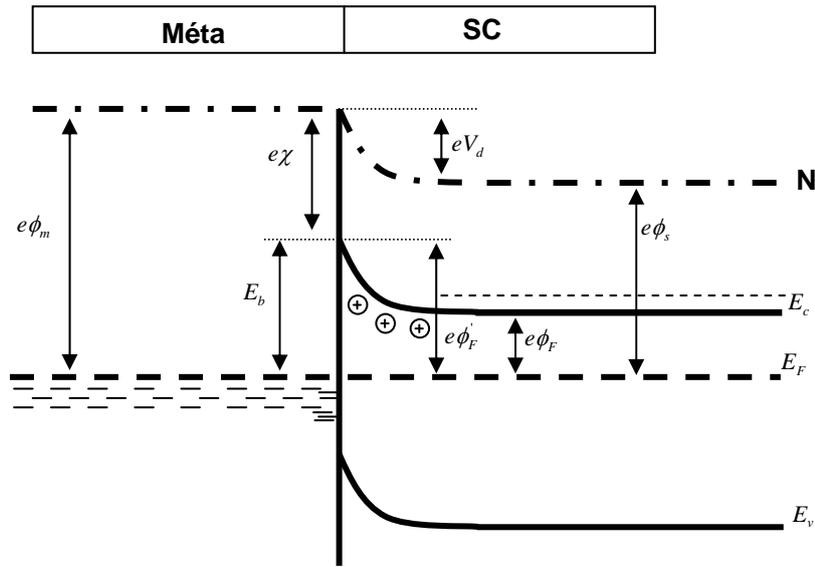


Fig.3. Diagramme énergétique d'un métal et d'un semi-conducteur de type n (avec contact).

Au voisinage de l'interface, la «distance» bande de conduction niveau de Fermi est plus importante que dans la région neutre du semi-conducteur (loi de l'interface) $e\phi'_F > e\phi_F$. Cette distance est définie comme étant la hauteur de la barrière Schottky ϕ_B . A cette double charge d'espace sont associés un champ électrique et donc une tension de diffusion V_d qui équilibrent les forces de diffusion et fixent l'état d'équilibre.

Un électron du métal peut, si son énergie thermique est suffisante, franchir la barrière ϕ_B du contact (figure 4). Lorsque la jonction métal semi-conducteur est polarisée en direct, la tension V_d devient plus faible, ce qui facilite le passage d'un courant par effet thermoïonique. La forte augmentation de ce courant peut entraîner la destruction de la grille [6-8].

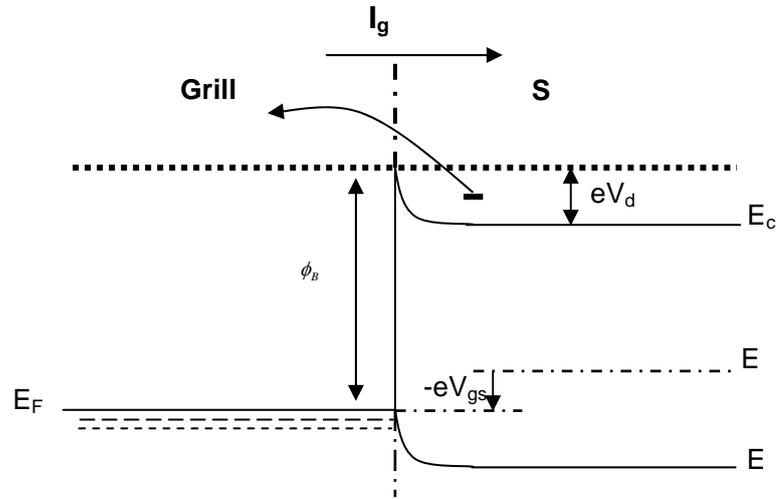


Fig.4. Jonction métal/semi conducteur de type N polarisée en direct.

En polarisant la jonction métal semi-conducteur en inverse, la bande de conduction se courbe de plus en plus (figure 5).lorsque cette courbure devient plus grande, une quantité non négligeable d'électrons peut traverser la barrière ϕ_B par effet tunnel vers la zone où les niveaux d'énergie sont plus faible, le composant peut être détruit dès que le courant de grille devient trop élevé [6-8].

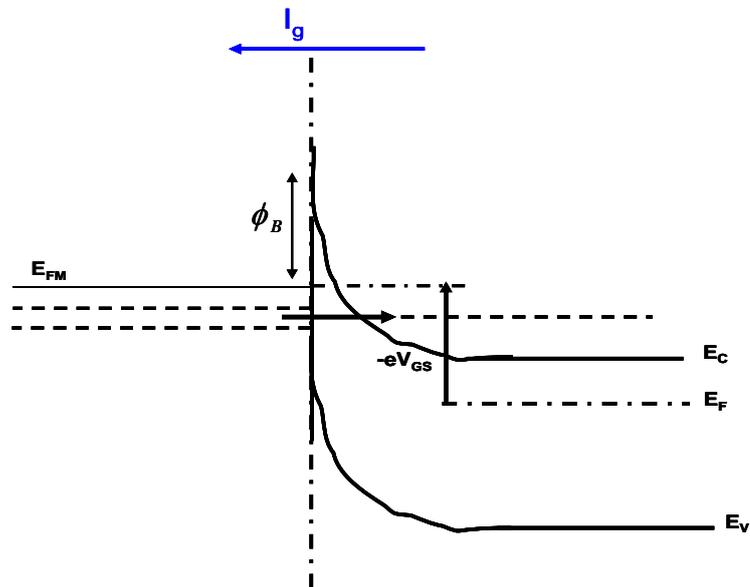


Fig.5. Jonction métal/semi-conducteur de type N polarisée inverse.

De plus de l'effet de la température ou de pièges, le nombre d'électrons (coté métal) ayant une énergie plus grande augmente. Ces électrons verront donc une barrière plus fine et moins haute qui entraîne une augmentation de transfert par effet tunnel, on parle alors d'effet tunnel assisté thermiquement ou assisté par pièges [9].

IV- 3- Composants étudiés et caractéristique $I_{\text{gs}}(V_{\text{gs}}, T, t)$

Les composants étudiés sont des HEMTs de la technologie AEC1388, de largeur de grille $8 \times 75 \mu\text{m}$, et de $2 \times 75 \mu\text{m}$ fabriqués par III-V lab (Alcatel-Thales). Sa structure est explicitée par la figure 6.

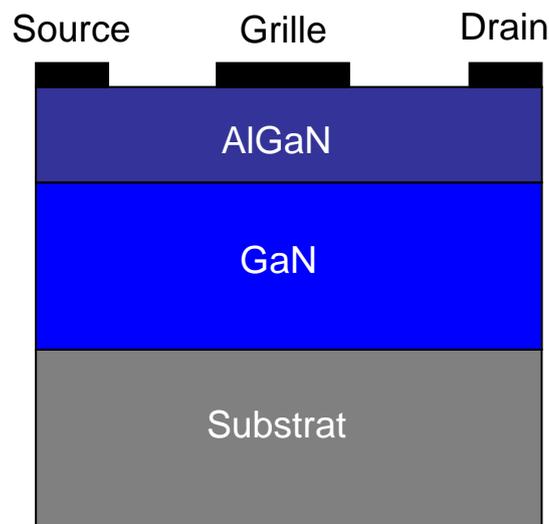


Fig.6. Structure du HEMT étudié.

La caractéristique $I_{\text{gs}}(V_{\text{gs}}, t)$ en polarisation inverse, est représenté sur la figure 7. Les composants étudiés durant mes travaux présentent un courant de grille élevé il est donc nécessaire de déterminer les mécanismes de transport qui sont à l'origine de ce courant de fuite. Dans cet objectif, une approche de modèle de fiabilité a été développée en s'appuyant sur l'évolution d' I_{gs} en fonction de temps en polarisation inverse.

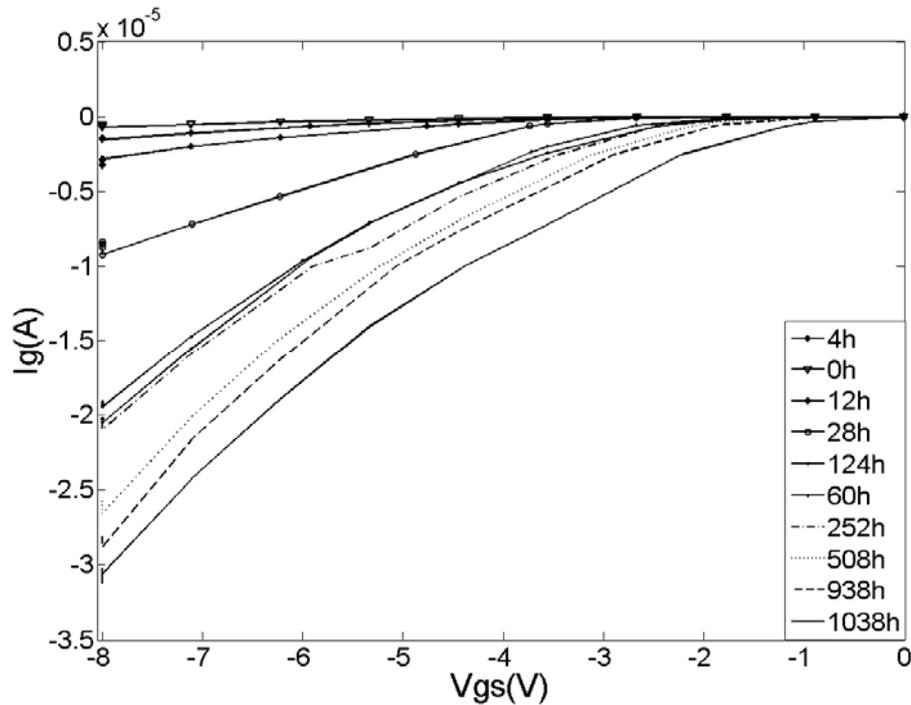


Fig. 7. Évolution d' I_{gs} en fonction du temps en polarisation inverse.

IV- 4- Mécanismes de transport

Le courant de fuite de grille est souvent mis en cause dans la dégradation des performances des HEMTS AlGa_N/Ga_N avant ou après vieillissement, dans la littérature beaucoup de recherche ont traité l'origine de ce courant de fuite [10, 11, 12, 13].

Les processus de conduction électrique observables dans une diode Schottky sont de plusieurs natures [14]. Nous avons présenté les différents mécanismes de conduction intervenant dans une diode Schottky sous polarisation directe et inverse.

IV- 4- 1- En polarisation directe :

A fin de déterminer la hauteur de la barrière Schottky du contact de grille, il est judicieux de commencer par modéliser la caractéristique $I_{gs}(V_{gs})$ en polarisation directe. Lorsqu'on polarise la jonction Schottky du HEMT en direct. Le courant à travers cette

jonction peut prévenir de trois principaux mécanismes :

- Passage des porteurs majoritaires du semi conducteur par un saut au dessus de la barrière : le modèle thermoïonique rend compte de ce phénomène.
- Passage des porteurs à travers la barrière par effet Tunnel.
- Recombinaison sur les états d'interface. Les électrons du semi conducteur sont piégés sur un centre d'interface, puis passent par effet Tunnel dans le métal.

Dans un contact idéal le phénomène d'émission thermoïonique est dominant. Le courant à travers une jonction Schottky est donné par la loi thermoïonique, corrigée par le facteur d'idéalité η [15] :

$$I_{gs} = A A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{KT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_{gs}}{\eta KT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

A : la section de la diode.

A^* : la constante de Richardson pour la couche AlGaN.

T : la température.

K : la constante de Boltzmann.

V_{gs} : la tension appliquée sur la grille.

η : le facteur d'idéalité qui tient compte, dans le processus de transport de la diode, de l'effet Tunnel, des phénomènes de génération/recombinaison ou encore des états de surface à l'interface du contact.

IV- 4- 2- En polarisation inverse :

En raison de la hauteur de la barrière Schottky du courant de grille ϕ_B , le courant thermoïonique sera très faible en polarisation inverse. Dans la littérature quatre mécanismes sont généralement évoqués.

- Effet thermoïonique assisté par le champ électrique TEF (Thermionic Field Emission), ce mécanisme a été proposé par Hasegawa [16-21] et c'est le plus souvent utilisé pour décrire le courant I_{gs} .

Ce courant est défini par l'équation 2 [9] :

$$I_{gs} = I_{s,TEF,r} \exp\left(\frac{V_r}{\varepsilon'}\right) \quad (2)$$

avec :

$$I_{s,TEF,r} = \frac{A A^* T^2 \sqrt{\pi E_{00}}}{V_t \cosh(E_{00}/V_t)} \exp\left(\frac{\phi_B}{E_0}\right) \sqrt{\phi_B - V \cosh^2(E_{00}/V_t)} \quad (3)$$

$$E_0 = \frac{E_{00}}{\tanh(E_{00}/V_t)} \quad (4)$$

$$E_{00} = \frac{qh}{4\pi} \sqrt{\frac{N_d}{m^* \varepsilon_s}} \quad (5)$$

$$\varepsilon' = \frac{E_{00}}{E_{00}/V_t - \tanh(E_{00}/V_t)} \quad (6)$$

E_{00} représente l'énergie seuil définissant le mode de transport à travers la barrière Schottky dans le rapprochement Wentzel-Kramers-Brillouin, qui dépend de la densité de donateurs N_d .

- si $E_{00} \gg KT$, l'émission thermoïnique prédomine.
- si $E_{00} \approx KT$, l'émission thermoïnique est assistée par le champ électrique ; le mécanisme TFE prédomine.
- si $E_{00} \ll KT$, l'émission par effet tunnel direct prédomine.

- Le second type de mécanisme qui est souvent évoqué est lié au transport assisté par des pièges par effet Poole-Frenkel ou mécanisme de hopping. Ce mécanisme a déjà été évoqué par Zhang [22]. C'est un mécanisme de transport des électrons assisté par des pièges. En effet, l'électron capturé puis réémis par un piège vers la bande de conduction, puis il est de nouveau capturé et réémis par le piège suivant vers la bande de conduction et ainsi de suite. Les pièges qui participent à ce mécanisme sont proches du minimum de la bande de conduction.

- Le troisième mécanisme est une variation spatiale de la hauteur de barrière Schottky liée aux défauts de fabrication. Parish et al. ont ainsi montré que la modélisation du courant de grille de HEMT pouvait être réalisée en considérant deux diodes de section et de hauteur différentes [23].

- Lorsque $|V_{\text{gs}}|$ continue d'augmenter, un autre mécanisme prend le relais. En raison de la fine épaisseur de la couche AlGa_N, et de la courbure de la bande de conduction, E_c , et de valence, E_v , un courant de Tunnel peut apparaître.

Lorsque V_{gs} se rapproche de la tension de seuil, la bande de valence dans la couche AlGa_N se trouve alignée avec la bande de conduction dans le puits de potentiel à l'hétéro interface AlGa_N/Ga_N. Ainsi la probabilité de passage par effet tunnel bande à bande augmente.

Ce mécanisme participe principalement au transport des électrons pour de valeur de V_{gs} proche de la tension de seuil. Aussi ce courant tunnel bande à bande perd son influence lorsque la température diminue.

IV- 4- 3- Courant de fuite (leakage) de la grille

Comme indiqué précédemment, les dispositifs HEMTs de AlGa_N/Ga_N sont bien adaptés à haute puissance à haute fréquence pour applications telles que les amplificateurs de puissance élevée et des applications pour stations de base sans fil. Pour ces cas il y a une obligation générale pour un courant de grille d'entrée faible et une figure de haute fiabilité pour le périphérique. Dans le travail précédemment rapporté [10] le rôle joué par la dégradation avec le temps dans le courant de fuite de grille est important dans la compréhension de la question de la fiabilité de l'appareil.

D'un point de vue physique de la dégradation, et donc les changements observés avec le périphérique, découlent de défauts dans la région de grille. Ceux-ci deviennent plus évidents à un point critique de la valeur du champ électrique [11]. La formation de piège dans l'appareil soit à la surface semi-conducteurs ou dans la masse est aussi un problème limitant la performance. À ce jour, cependant, une explication claire sur les mécanismes physiques qui lie l'échec ou la fiabilité de l'appareil et la dégradation de ses caractéristiques électriques est indisponible.

Le courant de fuite porte de surtensions comme une conséquence du traitement de surface et des questions de passivation. Dans les dispositifs à effet de champ mécanique quantique tunnel a été clairement démontré un effet important d'être

représenté [11]. Alternativement, les électrons peuvent s'accumuler sur la surface à côté de la grille ou se déplacer à travers la couche AlGa_N vers le canal de conduction [12].

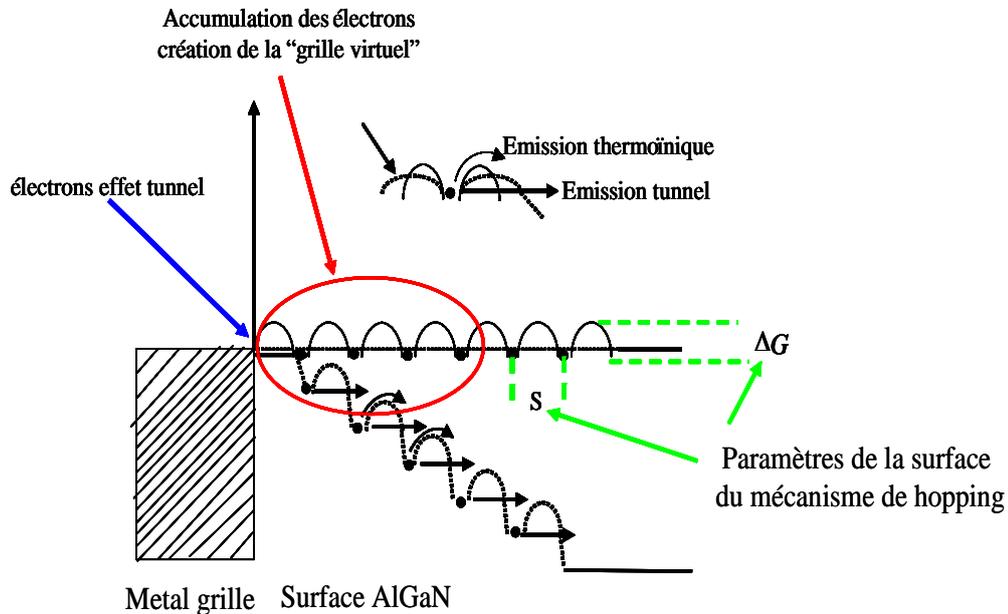


Fig.8. Mécanismes proposés du courant de fuite grille surface.

Deux principales voies actuelles pour les courants de fuite de grille peuvent être identifiés. Le trajet principal est établi par les fuites du tunnel d'électrons de la grille, avec des électrons circulant le long ou près de la surface d'AlGa_N vers le contact de drain. La conduction électronique produite par un mécanisme pas par pas de Hopping, où les deux émissions thermoionique et de tunnels sont probablement impliqués, comme illustré sur la figure 8 [12].

Un modèle pour simuler la fuite de grille actuelle dans GaAs MESFET en raison d'effets tunnel est décrit dans [13]. Ce modèle a ensuite été modifié dans [24] pour être applicable aux dispositifs GaN. Le courant de fuite de grille dû à l'effet tunnel est représenté sous forme de circuit comme un générateur relié entre les bornes de grille et le drain de l'appareil. Le champ électrique au bord de la borne de grille est réduit par les réactions électrostatiques. Cela réduit le courant tunnel d'électrons de fuite. Comme le nombre d'électrons augmente au bord de grille comme une fonction du temps de courant

de fuite de la grille diminue en raison de la rétroaction (feedback). En outre, l'augmentation de densité d'électrons sur la surface de AlGa_N diminue le nombre d'électrons 2DEG ce qui provoque la diminution du courant de la grille [12-13].

IV- 5- Model de dégradation du courant de Leakage :

Le mécanisme de fuite dans GaN et d'AlGa_N interfaces Schottky a été examiné par Yu et al [25] et Miller et al [26]. Ce travail était basé sur le transport à émission de champ tunnel en supposant une distribution triangulaire Schottky potentiels. Pour obtenir un bon accord avec les résultats expérimentaux, cependant, exige une valeur pour la densité des donateurs qui est plus élevé que dans la pratique. Cela les a conduit à proposer un mécanisme de défaut assisté tunnel pour augmenter le courant de fuite.

Un modèle de patch de surface a été proposé par Sawada et al [27] pour expliquer les caractéristiques courant directes. Miller et al [28] ont également proposé un mécanisme de fuite associée à une distance variable de la conduction de saut grâce dislocations.

Comme il sera démontré plus tard, nous avons trouvé l'émission de champ thermoïonique (TFE) modèle pour fournir un bon compromis entre la précision et la facilité d'extraction de paramètres.

Dans le modèle de TFE, le courant inverse, I_{leak}, découle d'électrons qui sont excités thermiquement de la jonction métal Fermi et tunnel à travers la couche d'ozone semi-conducteurs pour la bande de conduction des semi-conducteurs [9].

Le courant inverse peut être exprimé par les équations suivantes [9] :

$$I_{leak} = I_{s,TEF,r} \exp\left(\frac{V_r}{\mathcal{E}}\right) \quad (7)$$

Du test de vie (dans la région de 2000 heures) les résultats expérimentaux, nous observons que le temps le plus de paramètres dépendants ont été la hauteur de barrière de Schottky et la densité de donateurs N_d [25-26].

De inverse des mesures de courant (réalisée sur un large éventail de modèles d'appareils et sous polarisation différente et conditions de température ambiante), nous avons observé que la dépendance du temps de N_d paramètres et peuvent être exprimées, à partir d'un point de vue macroscopique, comme:

$$N_d = N_{d0} \exp\left(-\frac{t-t_0}{N_{d1}}\right) \quad (8)$$

$$\phi_{Bn} = \phi_{B0} + p_1(t-t_0)^{p_2} + p_3 \tanh\left(\frac{t-t_0}{p_4}\right) \quad (9)$$

Où N_{d0} est la densité des donneurs à $t = 0h$, est ϕ_{B0} la hauteur de la barrière de Schottky à $t = 0h$, N_{d1} , P_1 , P_2 , P_3 et P_4 sont les paramètres de l'équation décrivant le comportement de l'expression.

Ces expressions montrent que les conditions de haute température de fonctionnement entraînent des changements importants à la hauteur de barrière Schottky et à la distribution des donateurs. Cela a également été observé à travers les différents tests de vie des expériences menées sur de nombreux échantillons différents.

IV- 5- 1- Description de dispositifs et les mesures effectuées

Afin de valider le model proposé pour la dégradation du courant de Leakage, des dispositifs (dont deux avec une largeur de grille de $8 \times 75 \mu m$ et deux avec une largeur de grille de $2 \times 75 \mu m$) fournies par III-V Lab (Alcatel-Thales) seront employées. Les mesures (en direct et en inverse) ont été réalisées sous de différentes polarisations et dans les conditions de température ambiante. La figure 9, par exemple, montre la variation du courant de grille en fonction de temps pour le dispositif de largeur de grille de $8 \times 75 \mu m$. Les mesures ont été effectuées en fonction de V_{gs} à V_{ds} du 25V.

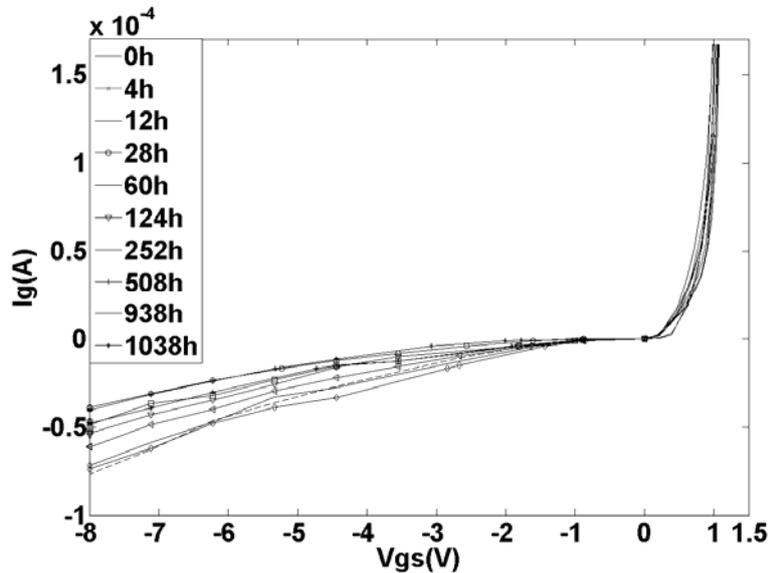


Fig. 9. Courant de grille en fonction de V_{gs}(V) et le temps(h) à V_{ds}=25V pour le HEMT 8x75 μm d'AlGa_{0.27}N/GaN.

Les dispositifs de 8x75 μm, ont été fabriqués en utilisant une structure non dopée multicouche constituée d'une couche de buffer de GaN (1,5 μm), suivie par une couche barrière AlGa_{0.27}N (22,0 nm d'épaisseur, 27% de concentration de l'Al). Ces HEMT GaN ont été fabriqués sur toutes les plaquettes en utilisant le même processus industrielle, y compris la formation de contact ohmique par le dépôt de Ti/ Al / Ni / Au et la formation de l'électrode Schottky de la grille par le dépôt de Mo/ Au.

Les dispositifs de 2x75 μm, ont été fabriqués en utilisant une structure non dopée multicouche constituée d'une couche de buffer de GaN (1,0 μm), suivie par une couche barrière AlGa_{0.303}N (27.5 nm d'épaisseur, 30.3% de concentration de l'Al). Ces HEMT GaN ont été fabriqués sur toutes les plaquettes en utilisant le même processus industrielle, y compris la formation de contact ohmique par le dépôt de Ti/ Al/ Pt/ Au et la formation de l'électrode Schottky de la grille par le dépôt de Ni/ Au.

La table 1 présente le résumé des conditions de mesure pour les dispositifs durant le test de vie.

Dispositif	Dimension (μm)	Température ($^{\circ}\text{C}$)	(Vgs, Vds) (V)	Durée de test (heure)
D1	8x75	250	(-2.3 V, 25 V)	1038
D2	8x75	275	(-2.3 V, 25 V)	1038
D3	2x75	150	(-3.2 V, 25 V)	2000
D4	2x75	175	(-3.1 V, 25 V)	2000
D5	8x75	175	(-3.1 V, 25 V)	2000

Table 1. Dispositifs et conditions de mesure durant le test

IV- 5- 2- Extraction des paramètres de modèle :

Pour déterminer la valeur de la hauteur de la barrière Schottky du contact de grille à $t = 0$ heure nous avons modélisé la caractéristique $I_{gs}(V_{gs},t)$ en polarisation directe. La figure 10 présente la variation du courant de grille, en polarisation directe, en fonction de temps pour le dispositif de largeur de grille de $8 \times 75 \mu\text{m}$.

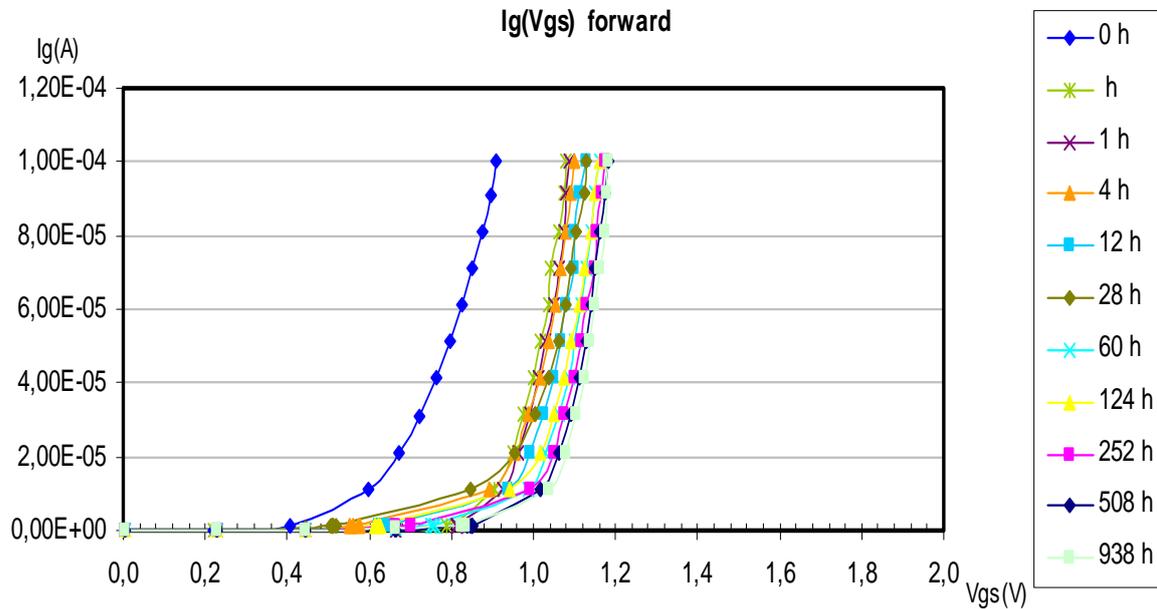


Fig.10. variation d'I_{gs} en polarisation directe en fonction de temps pour un HEMT de AlGa_n/Ga_n de largeur de grille de $8 \times 75 \mu\text{m}$

Le processus de conduction en polarisation directe est décrit dans le paragraphe (IV-4) d'où on peut calculer la valeur de la hauteur de la barrière de Schottky et le facteur d'idéalité.

Les dispositifs sont soumis à un vieillissement selon les conditions indiquées dans le tableau 1. Pour chaque dispositif et l'état de test, les mesures sont effectuées en directe (étape (i)) et en conditions de polarisation inverse la figure 9. Les paramètres N_{d0} (au temps $t = 0h$) et N_{d1} sont déterminés à partir des mesures de polarisation inverse. Les paramètres (p_1 , p_2 , p_3 et p_4) de l'équation (3) sont obtenus à partir des mesures de polarisation directe et inverse (Figure 9.) Avant l'extraction de ces paramètres les valeurs mesurées actuelles sont ajustées en utilisant les valeurs des paramètres de l'équation (7) déterminée précédemment.

Les tables 2 et 3 présentent les valeurs des paramètres des équations (8, 9).

Dispositif	ϕ_{B0} (eV)	p_1 (V/heure)	p_2	p_3 (V)	p_4 (heure)
D1	0.86	-5.79e ⁻⁶	5.567e-1	1.555e-1	-1.071e5
D2	0.783	1.313e-5	5.509e-1	1.118e-1	-1.913e3
D3	0.505	1.047e-2	1.192e-1	-1.745e-2	1.375e1
D4	0,492	1.205e-1	2.982e-2	-1.289e-1	3.067e-1
D5	0.8819	-1.822e-2	9.991e-2	-3.291e-1	2.476e-5

Table 2 : paramètres de l'équation de ϕ_B .

Dispositif	N_{d0} (cm ⁻³)	N_{d1}
D1	7.510 ¹⁷	5.559e7
D2	10 ¹⁸	4.559e7
D3	10 ¹⁷	4.113e8
D4	910 ¹⁷	1.948e7
D5	7.110 ¹⁶	4.559e7

Table: paramètres de l'équation de N_d .

IV-5- 3- Résultats et discussion

Les dispositifs étudiés dans ce travail sont des différents transistors HEMT de GaN de la plaque (AEC1303) et la plaque (AEC1388) soumis à un vieillissement thermique et électrique différente, comme le montre le tableau 1, et c'est pourquoi nous voyons une différence entre la valeur des paramètres de l'équation 7 pour les dispositifs étudiés, par exemple la valeur de la P1 pour le dispositif D1 et D5 est négatif alors que pour l'autre appareil est positive, et qui peut être expliquée par: les résultats de mesure avec des I_g diminue le temps et aussi la première partie de l'équation 7 est un polynôme.

Les dispositifs d'essai considérés ici sont de type N HEMT avec Ni / Au jonctions Schottky, on peut constater que les résultats présentés ici sont en accord avec ceux qui doivent être prévus et présentés par ailleurs [29]. Par exemple, la valeur de ϕ_B est inférieure à 1V. Notez également que pour le dispositif de $8X75 \mu m$ la valeur du paramètre diminue à mesure que la température ambiante augmente. Ceci est également en accord avec les résultats présentés par ailleurs [30-31]. Ceci peut être expliqué par le fait que les atomes additionnelles ionisés de dopage, découlant de la charge positive fixe à la surface, augmente le nombre d'atomes ionisés de dopage à la surface. Effet tunnel est, par conséquent, plus facile puisque la barrière est plus mince à la surface. Les figures 11 et 12 illustrent l'évolution de la barrière de Schottky ϕ_B avec le temps pour les dispositifs d'essai.

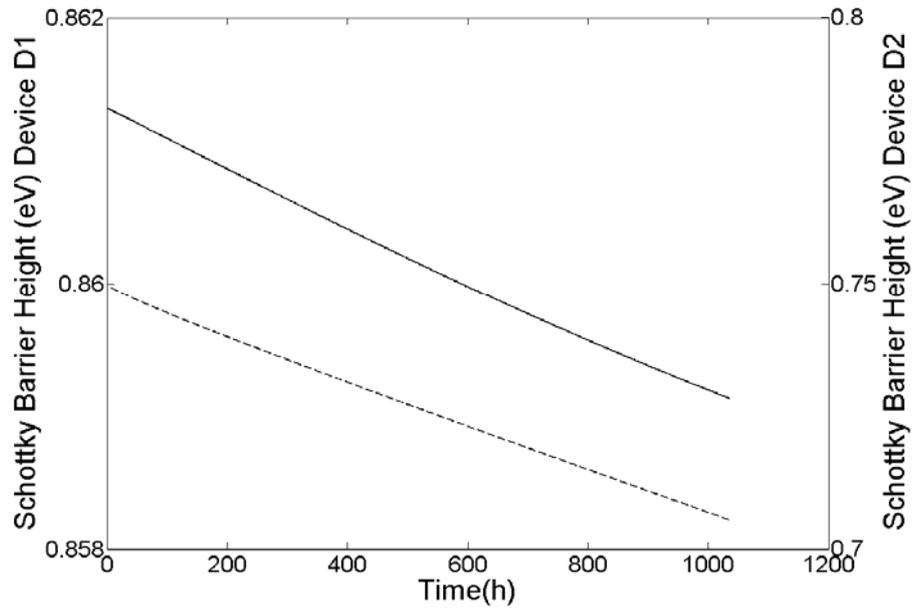


Fig. 11. Evolution de ϕ_B avec le temps des dispositifs D1 (en pointillé) et D2 (en trait pleins).

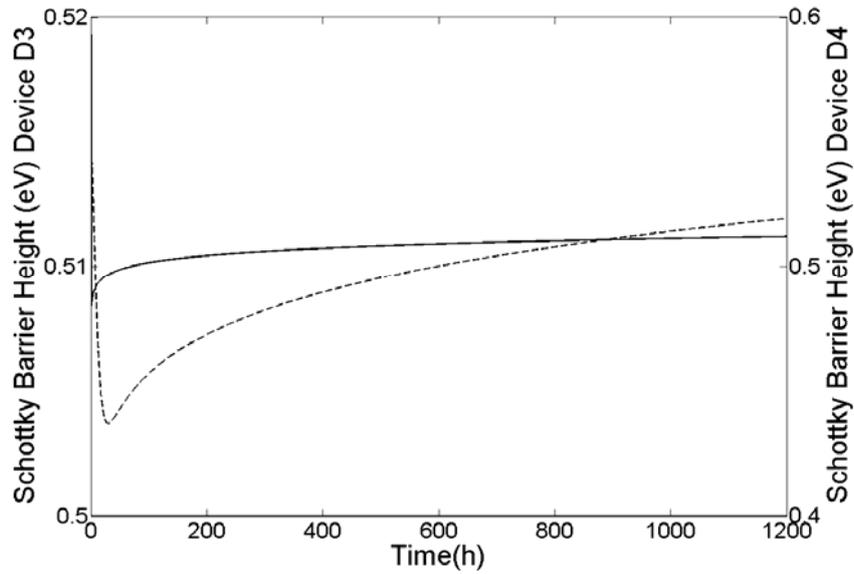


Fig. 12. Evolution de ϕ_B avec le temps des dispositifs D3 (en pointillé) et D4 (en trait pleins).

Les figures 13, 14, 15, 16 et 17 présentent la comparaison entre le courant de fuite de la grille mesurée et le résultat d'optimisation en utilisant l'équation actuelle (1) en fonction du temps pour des dispositifs de largeur de grille $8 \times 75 \mu\text{m}$ et $2 \times 75 \mu\text{m}$ utilisant les conditions indiquées dans le tableau 1. Les résultats indiquent un bon accord entre les résultats expérimentaux et la modélisation.

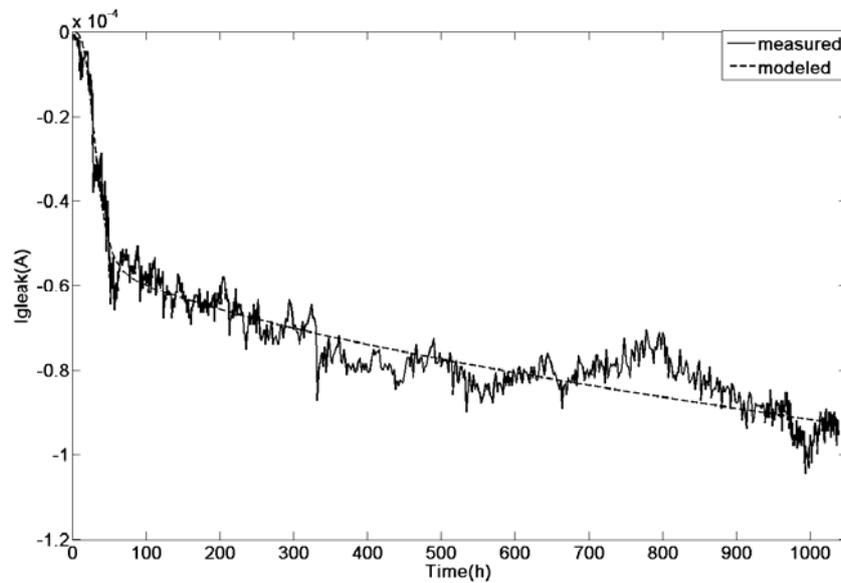


Fig.13. Comparaison entre le model de l'évolution du courant de fuite de grille et les résultats de mesure du dispositif D1.

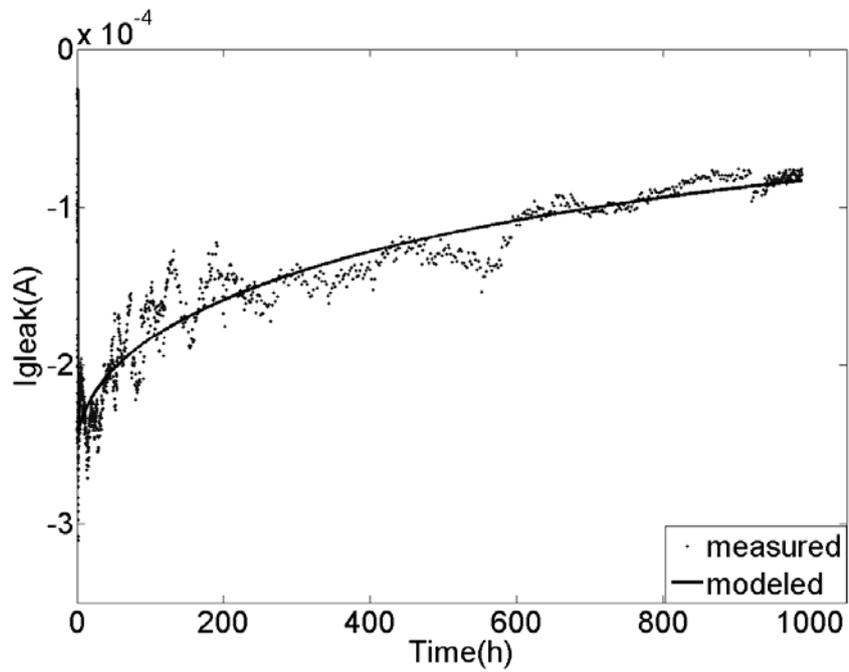


Fig. 14. Comparaison entre le model de l'évolution du courant de fuite de grille et les résultats de mesure du dispositif D2.

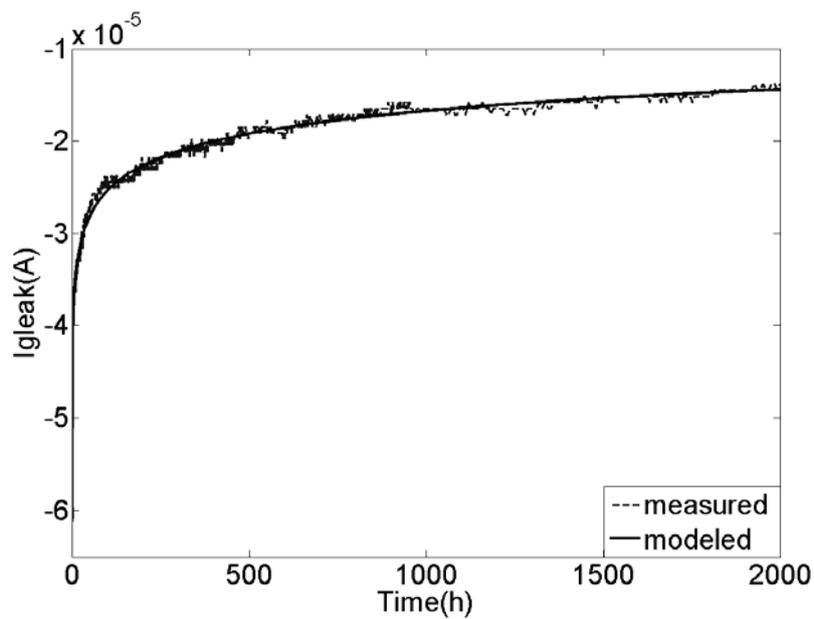


Fig.15. Comparaison entre le model de l'évolution du courant de fuite de grille et les résultats de mesure du dispositif D3.

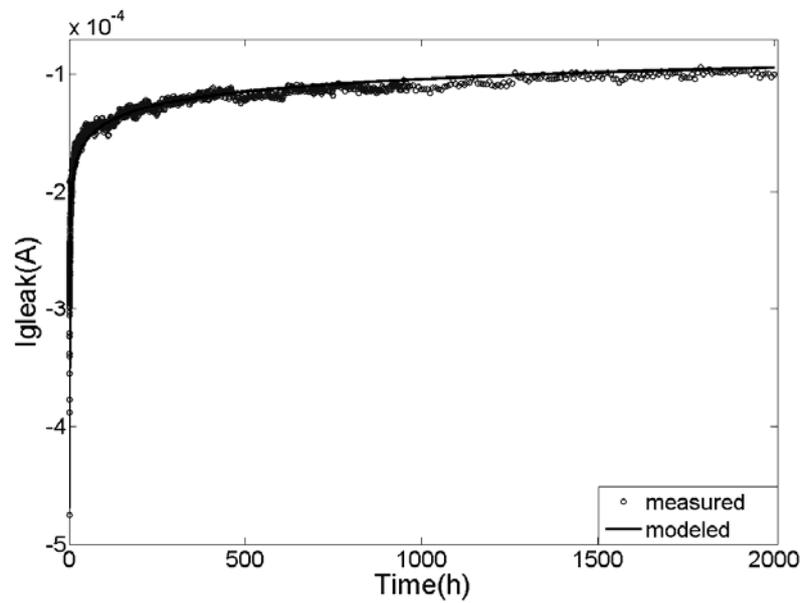


Fig.16. Comparaison entre le model de l'évolution du courant de fuite de grille et les résultats de mesure du dispositif D4.

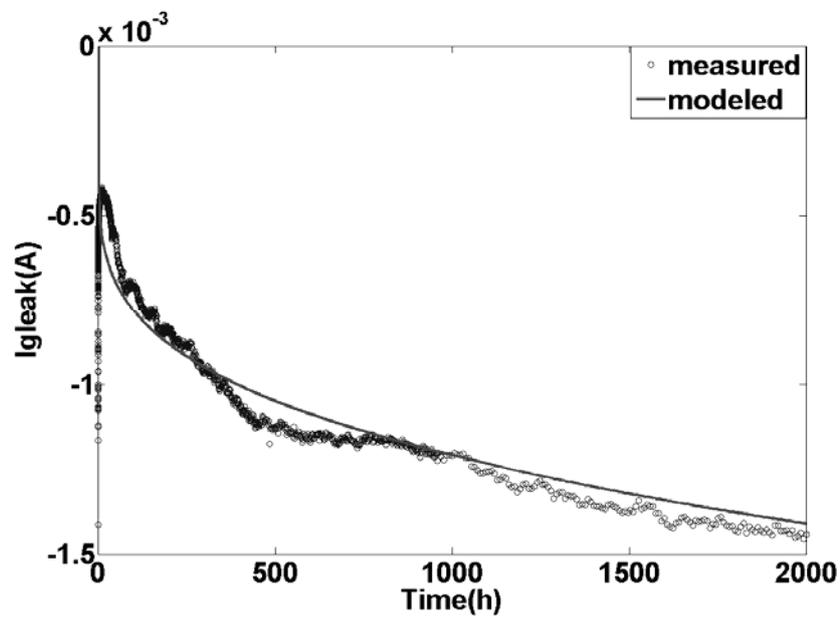


Fig.17. Comparaison entre le model de l'évolution du courant de fuite de grille et les résultats de mesure du dispositif D5.

Pour les dispositifs 4 et 5 on observe une augmentation du courant de fuite de la grille Igleak et l'augmentation de la densité de donneurs avec la diminution de la largeur de la grille. Il faut se rappeler que les mesures de ces deux dispositifs ont été effectuées dans des conditions identiques. Ces résultats sont en accord à ceux présentés dans [32].

IV- 6- Conclusion

Un approche de modèle pour la dégradation du courant de fuite en fonction de temps a été appliquée à des dispositifs HEMTs de AlGaN / GaN de différentes tailles provenant de fabricants différents. Ils ont été mesurés dans des conditions d'essai, y compris divers points de la température. Les résultats montrent clairement une dépendance forte entre le courant de fuite, la hauteur de la barrière Schottky et la densité des donneurs de la jonction grille-drain. Ces résultats démontrent également la forte influence de la présence de pièges de surface ou/et profond sur le courant de fuite. Également démontrent la forte dépendance entre ces variables et la température.

Reference

- [1] C. Lee, L. Witkowski, H.-Q. Tserng, P. Saunier, R. Birkhahn, Dan Olson, G. Munns, S. Guo, B. Albert, “Effects of AlGa_N/Ga_N HEMT structure on RF reliability”, *Electron. Lett.*, vol. 41 no. 3, pp. 155-157, Feb. 2005.
- [2] K.S. Boutros, P. Rowell, and B. Brar, “A study of output power stability of Ga_N HEMTs on SiC substrates”, in *Proc. of the IEEE Int. Rel. Phys. Symp. (IRPS)*, pp. 577-578, 2004.
- [3] N. Malbert, N. Labat, A. Curutchet, C. Sury, V. Hoel, J.-C. de Jaeger, N. Defrance, Y. Douvry, C. Dua, M. Oualli, C. Bru-Chevallier, J.-M. Bluet, W. Chikhaoui “Characterisation and modelling of parasitic effects and failure mechanisms in AlGa_N/Ga_N HEMTs” *Microelectronics Reliability*, 49, pp. 1216-1221, 2009.
- [4] Jungwoo Joh and Jesús A. del Alamo, “Mechanisms for Electrical Degradation of Ga_N High-Electron Mobility Transistors”, *Electron Devices Meeting, 2006. IEDM '06, International*, pp. 1-4, Dec. 2006.
- [5] W. Saito, M. Kuraguchi, Y. Takada, K. Tsuda, I. Omura, and T. Ogura. “Influence of surface defect charge at AlGa_N-Ga_N HEMT upon schottky gate leakage current and breakdown voltage”. *IEEE Transaction on Electron Device*, 52 (2): 159-164, 2005.
- [6] H. Mathieu, « physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 5^{ème} Edition, Dunod, Paris, 2004, ISBN 2 10 048633 0.
- [7] C. Charbonniaud, « caractérisation et modélisation électronique non-linéaire de transistors à effet de champ Ga_N pour l’amplification de puissance micro-onde », Thèse de doctorat, université de Limoges, Octobre 2005.
- [8] [http:// www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/](http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/).
- [9] Padavoni FA, “Stratton R. Field and thermionic-field emission in Schottky barriers”, *Solid –State Electron*, pp. 9-695, 1966.
- [10] Y. Inoue et al., “Degradation-mode analysis for highly reliable Ga_N HEMT”, *IEEE IMS Technical Digest*, pp. 639-642, June 2007.
- [11] J. Joh and J. A. del Alamo, “Mechanisms for electrical degradation of Ga_N high-electron mobility transistors”, *IEEE IEDM Tech. Dig.*, pp. 415–418, 2006.

- [12] R. J. Trew, Y. Liu, W. W. Kuang, and G. L. Bilbro, “The physics of reliability for high voltage AlGa_N/Ga_N HFET’s”, IEEE CSICS Symp. Dig., San Antonio, TX, pp. 103-106, 2006.
- [13] Robert J. Trew, Daniel S. Green, and Jeffery B. Schealy, “AlGa_N/Ga_N HFET Reliability”, IEEE microwave magazine, pp. 116-127, Jun. 2009.
- [14] K. Suzue et Al, “Electrical conduction in platinumium-gallium nitride Schottky diodes”, journal of applied physics, 15 Octobre 1996, volume80, number 8, pp 4467-4478.
- [15] E.H. Rhoderick, R.H. Williams, Metal–Semiconductor Contacts, 2nd ed., Claredon Press, Oxford, 1988.
- [16] H. Hasegawa and M. Akazawa. “Mechanism and control of current transport in Ga_N and AlGa_N schottky barriers for chemical sensor application”. Applied surface Science, 254: 3653-3666, 2008.
- [17] H. Hasegawa and S. Oyama. “Mechanism of anomalous current transport in n-type Ga_N schottky contacts”. J. Vaccum Science Tech., B20: 1647-1655, 2002.
- [18] T. Hashizume, J. Kotani, and H.Hasegawa. “Leakage mechanism in Ga_N and AlGa_N schottky interfaces”. Applied Physics Letters, 84(24): 4884-4886, 2004.
- [19] G. Hellings, J. John, A. Lorenz, and R. Mertens. “AlGa_N schottky diodes for detector applications in the uv wavelength range”. conference MELECON 2008, 2008.
- [20] J. Kotani, H. Hasegawa, and T. Hashizume. “computer simulation of current transport in Ga_N and AlGa_N schottky diodes based on thin surface barrier model”. Applied surface Science, 237, pp 213-218, 2004.
- [21] J. Kotani, T. Hashizume, and H.Hasegawa. “Analysis and control of excess leakage currents in nitride-based schottky diodes based on thin surface barrier model”. J. Vaccum Science Tech., B22: 2179-2189, 2004.
- [22] H. Zhang, E.J. Miller, and E.T. Yu. “Analysis of current mechanisms in schottky contacts to Ga_N and AlGa_N/Ga_N grown by MBE”. Applied Physics Letters, 99 : 023703, 2006.
- [23] G. Parish, R.A. Kennedy, G.A. Umana-Membreno, and B.D. Nener. “Localised defectinduced schottky barrier lowering in n-Ga_N schottky diodes”. Solid-State Electronics, 52: 171-174, 2004.
- [24] Q.Z.LIU and S.S. LAU, “A Reviews Of The Metal-Ga_N Contact Technology”, Solid-State Electronics Vol.42, N°5, pp. 677-691, 1998.

- [25] L. S. Yu, Q. Z. Liu, Q. J. Xing, D. J. Qiao, and S. S. Lau and J. Redwing, “The role of the tunnelling component in the current–voltage characteristics of metal–GaN Schottky diodes”, *J. Appl. Phys.* 84, pp. 71-76, 1998.
- [26] E. J. Miller, X. Z. Dang and E. T. Yu, “gate leakage current mechanisms in AlGa_N/Ga_N heterostructure field-effect transistors”, *J. Appl. Phys.* 88, pp. 5951-5998, 2000.
- [27] T. Sawada, Y. Ito, K. Imai, K. Suzuki, H. Tomozawa and S. Sakai, “Electrical properties of metal/GaN and SiO₂/Ga_N interfaces and effects of thermal annealing”, *Appl. Surf. Sci.* 159-160 (2000) 449-455.
- [28] E. J. Miller, E. T. Yu, P. Waltereit and J. S. Speck, “Analysis of reverse-bias leakage current mechanisms in Ga_N grown by molecular-beam epitaxy”, *Appl. Phys. Lett.* 84, N°4, pp. 535-537, 2004.
- [29] E.A.Douglas, C.Y. Chang and all, “AlGa_N/Ga_N Electron mobility transistor degradation under on- and off-state stress” *Microelectronics Reliability* (2010).
- [30] Q.Z.LIU and S.S. LAU, “A Reviews Of The Metal-GaN Contact Technology,” *Solid-State Electronics* Vol.42, N°5, pp. 677-691, 1998. Applications Symposium, Bologna, Italy – September 3rd-5th, 1997.
- [31] J. Osvald , J. Kuzmik and all, “ Temperature dependence of Ga_N Schottky diodes I/V characteristics”, *Microelectronic Engineering* 81, pp. 181-187, 2005.
- [32] J. Kotani and all, “Tunneling Injection of Electrons at Nanometer-Scale Schottky Gate Edge of AlGa_N/Ga_N Heterostructure Transistors and Its Computer Simulation”, *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* Vol. 3, pp. 433-438, 2005.

Conclusion générale

Dans le but d'étudier la fiabilité des transistors HEMT AlGaN/GaN, les composants étudiés dans de ce travail sont des dispositifs vierges et soumis à un processus de vieillissement électrique et thermique à des températures très élevés ($T_1=200^\circ\text{C}$ et $T_2=300^\circ\text{C}$) pendant un temps de 1038 heure.

Les moyens de caractérisation électrique sont présentés et discutés. Dans le cadre de ces travaux, les HEMTs ont été caractérisés en régime statique et pulsé. Les mesures en régime pulsé permettent de s'affranchir dans une certaine mesure des effets thermiques et/ ou les phénomènes liées au pièges.

Le vieillissement des transistors est généralement évalué par la variation de la tension de seuil V_{th} , la réduction de la transconductance g_m et l'augmentation de la densité moyenne des états d'interface sous la grille ce qui mène à la réduction du courant de sortie I_{ds} et l'augmentation du courant de fuite I_g .

Le phénomène gate-lag et l'effet de courant de collapse associé peuvent être expliqué par:

- la génération de pièges de surface
- La génération de pièges dans la barrière AlGaN.
- La génération de pièges dans le buffer GaN.
- La génération de pièges de surface et de buffer.
- La génération de pièges de surface, de la barrière et de buffer.

L'influence de la température sur les états piège est déterminé à partir Des mesures pulsées des caractéristiques I/V du transistor pour deux points de polarisation différents et pour deux températures différentes (27°C et 70°C).

L'effet de Kink est l'un des phénomènes observés pour les HEMTs de AlGaN/GaN. Une analyse électrique et l'influence de la température sur cet effet est effectué. Il est suggéré que l'effet kink peut être induit par le piégeage des électrons.

En fonction de l'évolution de l'amplitude du courant I_{kink} (courant qui indique le taux de piégeage/ dépiégeage) et en fonction de la température, le tracé d'Arrhenius donne

deux énergies d'activation à basse température BT et à haute température HT, qui indique l'énergie des pièges impliqués.

Les pièges dans les HEMTs sur GaN ont été caractérisés aussi en utilisant les mesures de gate-lag en fonction de la température afin d'indiquer la localisation et la concentration d'un piège et pour faciliter la détermination de son énergie d'activation pour les transistors étudiés.

Un modèle de dégradation de courant de saturation I_{dss} en fonction du temps est proposé se basant sur la proposition de Chou, et a été appliqué à des dispositifs HEMTs de AlGaIn/GaN de différentes tailles prévenants des fabrications différentes aussi.

Les mesures montrent l'influence de la température et du champ électrique appliqué lors de l'essai. Les résultats indiquent un excellent degré de précision pour le modèle de la dégradation du courant I_{dss} proposé.

Le courant de fuite est souvent mis en cause dans la dégradation des performances des HEMTS AlGaIn/GaN avant ou même après vieillissement. Une étude sur les mécanismes à l'origine de ce courant a été présenté.

Un approche de modèle pour la dégradation du courant de fuite en fonctionne de temps a été appliquée à des dispositifs HEMTs de AlGaIn / GaN de différentes tailles provenant de fabricants différents. Ils ont été mesurés dans des conditions d'essai, y compris divers points de la température. Les résultats montrent clairement une dépendance forte entre le courant de fuite, la hauteur de la barrière Schottky et la densité des donneurs de la jonction grille-drain. Ces résultats démontrent également la forte influence du présence du pièges de surface ou/et profond sur le courant de fuite. Également démontrent la forte dépendance entre ces variables et la température.