

Exemple I

Le transistor à haute mobilité électronique de type HEMT AlGaN/GaN sur substrat Si(111)

Introduction

(....) Depuis la première observation d'un gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG) à l'hétérojonction (Al,Ga)N/GaN en 1992 [1] et les premières performances en régime statique (DC) en 1993 [2] et en régime dynamique (RF) en 1996 [3], les domaines d'application du HEMT (Al,Ga)N/GaN ne cessent de se multiplier (HEMT = High Electron Mobility Transistor). De plus en plus, les applications faible bruit et faible consommation font partie de son domaine de prédilection, mais les hautes fréquences restent son application principale. C'est la maîtrise des techniques de croissance cristalline des composés III-N qui, ajoutée à la plus-value de l'utilisation de l'hétérojonction (Al,Ga)N/GaN, a permis le développement du HEMT III-N dont découle une nette amélioration fréquentielle comparé à son plus proche parent le MESFET GaN (Metal Semiconductor Field Effect Transistor). Ces dernières années, les performances en fréquence et en puissance des transistors HEMT III-N n'ont cessé de progresser grâce à des améliorations progressives des techniques de croissance, de la qualité des matériaux épitaxiés, des procédés technologiques et des topologies des composants optimisées.

Performances fréquentielles

Des améliorations sur le profil de grille, sur la barrière et sur les couches tampons ont permis d'augmenter les performances fréquentielles des transistors HEMT :

Ingénierie de la grille :

Le *recess* de grille, qui consiste à graver une partie de la barrière avant le dépôt métallique, permet une augmentation de la transconductance (amélioration du contrôle du 2DEG) par la réduction de la distance grille-canal, tandis que le profil en T donne l'avantage d'une grille courte (réduction du temps de transit des électrons) tout en gardant une résistance métallique faible. De plus, cette technique autorise l'utilisation d'un cap dopé n (amélioration des contacts ohmiques et réduction des résistances d'accès de source R_s et de drain R_d).

Ingénierie de la couche tampon :

L'utilisation d'une couche tampon (Al,Ga)N (DH-HEMT [40]) ou GaN compensée (Fe [41-43], C [44, 45]), ou encore l'utilisation d'une contre-barrière (In,Ga)N [46, 47], permet un meilleur confinement des électrons dans le canal ainsi qu'une réduction des courants de fuites et des capacités parasites. Cela peut limiter le *gate lag* ou *drain lag* (retard à l'établissement du courant de drain après application d'un court stimulus de la tension V_{ds} , quand il est lié à des pièges dans les couches inférieures).

Ingénierie de la barrière :

L'insertion d'un espaceur AlN [21] à l'interface entre l'(Al,Ga)N et le GaN réduit fortement la pénétration des électrons dans la barrière et permet d'améliorer les propriétés de transport du 2DEG. Certains auteurs ont proposé des hétérostructures HEMTs AlN/GaN [24-26] (barrière AlN limitée en épaisseur [27, 28]) ou AlGaN/GaN/AlN/GaN [48] ou encore de remplacer l'alliage (Al,Ga)N par un super-réseau $n \times (AlN / GaN)$ [22, 23].

L'utilisation d'une barrière (Al,In)N en accord de maille avec le GaN (barrière non contrainte) permet d'atteindre des densités d'électrons plus importantes ($N_s > 2.10^{13} \text{ cm}^{-2}$) en raison des constantes de polarisations de l'InN et de l'AlN supérieures à celle du GaN [31, 33, 49].

Performances en puissance

La gestion du profil du champ électrique côté drain et des phénomènes mettant en jeu la surface ont contribué à l'amélioration des performances en puissance :

Ingénierie du champ électrique :

L'ingénierie du champ électrique entre la grille et le drain permet d'augmenter la tension de claquage des composants en étalant la zone de charge d'espace (ZCE) au-delà de la grille et en réduisant par la même le pic de champ électrique côté drain. Nous pouvons citer le *double recess* de grille et le profil de grille *field plate* (2003) [50, 51]. C'est un avantage pour les applications telles que les commutateurs haute tension et les amplificateurs haute puissance dans lesquels des tensions de claquage très importantes sont nécessaires. Ce contrôle effectif du canal au-delà de la grille primaire améliore également la linéarité du composant. Cependant, la contrepartie de cette approche est l'augmentation de la capacité grille-drain qui limite les performances fréquentielles.

Ingénierie de la surface :

Les HEMTs (Al,Ga)N/GaN souffrent d'une dispersion DC-RF entre la puissance de sortie prédite en fonctionnement statique (DC) par le réseau de caractéristiques $I_{ds}(V_{ds}, V_{gs})$ et la puissance de sortie réellement mesurée en fonctionnement dynamique (RF). Cet effet appelé *compression* peut trouver son origine dans un retard à l'établissement de la commande de grille (*gate lag*). Cette dispersion DC-RF qui limite les performances en puissance du HEMT est souvent attribuée aux pièges de surface [52]. La mise au point de passivations de la surface avec des diélectriques comme SiN_x [53, 54] ou SiO₂ [55, 56] permet d'y remédier. Cependant, l'efficacité de la passivation dépend fortement du procédé et de la qualité des structures traitées. Une autre solution pour régler le problème de dispersion DC-RF est l'épaississement du cap (Al,Ga)N, avec l'utilisation d'un *recess* de grille profond, pour éloigner le 2DEG des fluctuations du potentiel en surface [57-60].

D'autres innovations

D'autres types de structures III-N ont récemment été proposés :

MISHEMT (ou MOSHEMT)

Ce type de structure permet de combiner les avantages de la structure MOS (Metal Oxide Semiconductor) qui réduit fortement la fuite de grille, et l'hétérojonction (Al,Ga)N/GaN qui offre un produit $Ns\mu$ important [61].

HEMT à polarité N (ou inversée)

Ce type de structure a la particularité d'avoir le canal GaN en surface, ce qui permet d'avoir des résistances de contacts plus faibles, de réduire les fuites de grille, un meilleur confinement des électrons et une réduction de la dispersion DC-RF [62-65].

Difficultés de la filière HEMT III-N

Une des principales limitations rencontrées pour le développement du marché des composés III-N est liée à la difficulté d'élaboration de ces matériaux. Les performances, la fiabilité et la reproductibilité dans l'élaboration de dispositifs à base de composés III-N sont aujourd'hui principalement conditionnées par l'absence de substrat GaN ou AlN disponible avec des qualités et des coûts compatibles avec la production à l'échelle industrielle. Ceci a pour conséquence le recours à l'hétéroépitaxie de GaN sur des substrats de nature différente tels que le saphir (Al₂O₃), le carbure-desilicium (SiC) ou le silicium (Si). D'ici quelques années, des progrès significatifs seront sans doute réalisés dans la synthèse à l'échelle industrielle de pseudo-substrats GaN (GaN autosupporté) compatibles avec la réalisation de dispositifs hyperfréquences, mais le prix de tels pseudo-substrats reste cependant encore trop élevé (30 à 100 fois supérieur à celui du silicium).

Le Silicium : un substrat stratégique pour la filière III-N

Le silicium présente un attrait important de par son prix très compétitif, la taille des substrats disponibles (jusqu'à 12") et sa bonne conductivité thermique qui en font un candidat de choix pour les composants de puissance. Notons que l'orientation privilégiée dans la filière silicium est la (001) et non pas la (111). Cependant, la croissance des nitrures d'élément III sur substrat silicium est particulièrement délicate car les difficultés liées aux différences de paramètres de maille et de coefficients d'expansion thermique sont encore plus critiques que sur substrat saphir ou SiC. Ces difficultés peuvent être à l'origine de phénomènes de courbures excessives voire de fissuration des films déposés. La présence de défauts cristallins et de contraintes dans les matériaux élaborés peuvent, s'ils ne sont pas maîtrisés, dégrader les performances des dispositifs électroniques. En effet, les défauts structuraux, principalement des dislocations, peuvent se comporter comme des pièges pour les électrons limitant ainsi les propriétés de transport (mobilité, vitesse) mais aussi la commande de charge (instabilités, dispersions en fréquence) ; les contraintes résiduelles dans les matériaux, de même que les champs de contraintes et les impuretés qui décorent les dislocations sont également à l'origine de défaillances des composants.

Caractère innovant du projet

L'objectif du projet est d'améliorer les performances des structures HEMTs sur Si(111) en explorant différentes possibilités d'amélioration portant sur les conditions de croissance et le dessin des structures HEMTs réalisées par EJM sur substrat Silicium orienté (111). Le projet est donc centré sur la compréhension des paramètres clés de la croissance épitaxiale et de l'agencement des empilements de matériaux semiconducteurs nécessaires à la réalisation de transistors HEMT/Si(111) performants dans la filière III-N. Le cœur du projet est d'identifier les paramètres de croissance susceptibles d'avoir un impact notable sur la qualité structurale et électrique de la structure HEMT, et notamment sur l'isolation électrique des couches tampon et le transport des électrons dans le canal. Les buts recherchés est l'amélioration de la fiabilité et des performances en puissance et/ou en fréquences de fonctionnement des transistors, en proposant une approche compatible avec les exigences d'une future fabrication à l'échelle industrielle. Pour cela (...)

Exemple II

Nouveaux mécanismes moléculaires impliqués dans la résistance aux contraintes osmotiques chez le bactéroïde.

(...) La biosynthèse de la proline bêtaïne (PB) chez la luzerne a lieu dans les organes chlorophylliens et est réalisée à partir de deux méthylation successives de la L-proline, mais le(s) gène(s) correspondants chez les plantes ne sont pas connus (Hanson *et al.* 1994). Le stress salin a un effet mineur sur la biosynthèse de PB mais réduit fortement son catabolisme, favorisant son accumulation. Ainsi, chez *M. sativa* exposée à un stress salin pendant 4 semaines, on observe une augmentation de la concentration en PB de 10, 4 et 8 fois respectivement dans les tiges, les feuilles et les nodosités (Trinchant *et al.* 2004). La teneur en PB des tiges (50 $\mu\text{moles/g}$ poids sec) est tout à fait comparable à la teneur en GB rencontrée chez de nombreuses halophytes. Il est donc raisonnable de penser que l'accumulation de PB chez la luzerne contribue efficacement à maintenir une pression de turgescence nécessaire à la vie cellulaire en condition de stress salin. Concernant la nodosité, des travaux initiaux menés sur des jeunes plantes de *M. sativa* soumises à un stress hydrique ont montré que l'application exogène de GB ou de PB entraînait une restauration partielle de l'activité fixatrice d'azote du bactéroïde (Pocard 1984). L'existence d'une activité de transport de GB, de PB et de choline a ensuite été démontrée chez des bactéroïdes isolés de nodosités de luzerne (Fougere *et al.* 1990). Lors du stress salin de 4 semaines appliqué à la plante hôte, l'augmentation de la concentration en PB dans la nodosité concerne le cytosol des cellules végétales infectées et les bactéroïdes. Ainsi, la concentration en PB a été estimée à 0,8 mM chez des bactéroïdes non stressés et à 11,8 mM chez des bactéroïdes stressés (Trinchant *et al.* 2004). En parallèle, on observe un gonflement de l'espace péribactéroïdien chez les nodosités stressées, qui pourrait être partiellement dû à l'élévation de la concentration en PB dans ce compartiment (Figure 22). Celle-ci contribuerait donc à une augmentation de la pression de turgescence à l'intérieur du symbiosome. De plus, les résultats obtenus avec un mutant bactérien surproduisant le transporteur BetS apportent des éléments particulièrement intéressants sur l'implication de la PB pour le maintien de la capacité fixatrice d'azote lors d'un stress salin (Boscari *et al.* 2006). Non seulement les bactéroïdes issus de cette souche ont une capacité de transport de PB 2 à 3 fois supérieure à celle des bactéroïdes provenant de la souche sauvage, mais ils accumulent plus rapidement cette bêtaïne dans la phase initiale de l'application du stress. Après 7 jours de stress, la teneur en PB des bactéroïdes issus de la souche surproduisant BetS croît de 120 % contre seulement 40 % pour les bactéroïdes de la souche sauvage. Parallèlement, la surexpression de *betS* limite la diminution de l'activité fixatrice d'azote lors du stress salin. En effet, alors que l'activité fixatrice d'azote des plantes nodulées par la souche sauvage est réduite de 50 % par rapport aux plantes non stressées, elle n'est diminuée que de 15 % chez les nodosités infectées par la souche surproductrice. Une corrélation étroite existe donc entre accumulation accrue de PB et maintien relatif de l'activité fixatrice d'azote. Néanmoins, après 14 jours de stress, cette surexpression n'exerce plus d'effet bénéfique, suggérant que l'accumulation de PB dépendante de BetS ne joue qu'un rôle transitoire, lors de la phase initiale du stress. Les mécanismes de résistance des plantes au stress osmotique ont été largement plus étudiés que ceux du bactéroïde. Ainsi, une stratégie souvent utilisée mais d'une efficacité relative a été de construire des plantes transgéniques accumulant des solutés compatibles, comme la proline, l'ectoïne ou des bêtaïnes. En revanche, à l'heure actuelle chez le bactéroïde, hormis le mutant de surexpression du gène *betS*, aucun mutant bactérien n'a présenté une amélioration de la résistance au stress salin lors de la symbiose, se traduisant par une meilleure activité fixatrice d'azote. Il apparaît donc nécessaire de caractériser chez le bactéroïde de nouveaux mécanismes moléculaires impliqués dans la résistance aux contraintes osmotiques. (...)