

**TER (TRAVAIL D'ÉTUDE ET DE RECHERCHE) EN MASTER 1:
ÉTUDE DE PROFILS DE GRAVURE DU NITRURE DE GALLIUM GaN
A L'AIDE DE L'AFM**

Virginie Hoel, François Lecourt, Farida Bendriaa, Henri Happy
Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie - DHS
Avenue Poincaré - B.P. 60069 - 59652 Villeneuve d'Ascq Cedex
E-mail: virginie.hoel@iemn.univ-lille1.fr

I- INTRODUCTION

Dans cette communication, nous présentons les résultats d'un projet de TER (Travaux d'Etude et de Recherche) soutenu en juin 2010 par un binôme d'étudiants (nommés étudiant A et étudiant B) de niveau M1 du master MiNT (Micro-Nanotechnologies et Télécommunications) de l'Université Lille1. L'ensemble des informations concernant la formation du Master MiNT sont disponibles à l'adresse suivante : <http://master-mint.univ-lille1.fr/>

Ce projet comporte deux aspects. Le premier repose sur un travail avec les étudiants autour la technologie des composants au travers de l'étude de profils de gravure d'une profondeur de l'ordre d'une dizaine de nanomètre en utilisant l'AFM (microscope à force atomique (AFM) di-Caliber de la société Veeco) disponible dans la salle blanche du pôle CNFM de Lille. Le second objectif est de parvenir à sensibiliser les étudiants à la recherche afin de mettre en évidence des compétences telles que : (1) la gestion du temps, planification, tenue des délais, (2) le travail en autonomie, (3) l'interprétation de documents ou de résultats, (4) le travail en équipe, et enfin (5) la capacité d'adaptation et d'innovation.

Les étudiants sont sensibilisés à la démarche du chercheur avec des difficultés à des degrés divers : appréhender la structure du composant, puis du contact ohmique, analyser la structure de la couche transistor afin de comprendre l'intérêt de l'étape de gravure, la nature des contacts ohmiques, localiser les trous tout d'abord à l'aide du logiciel de dessin layout editor, puis à l'aide de l'AFM. Ils sont confrontés à la difficulté de visualiser une marche dans le semiconducteur de 10 nm de profondeur sans motifs de repérage. Ce travail s'appuie sur des études menées dans le cadre des travaux de thèse de M. François Lecourt.

II- PRESENTATION DU PROJET

Il s'agit d'un travail expérimental comportant plusieurs phases. Il s'est déroulé dans la salle blanche du pôle CNFM de Lille sur la paillasse AFM (Figure 1) :

Phase 1 : recherche bibliographique et compréhension du transistor HEMT

Cette première phase a consisté à définir le sujet lors d'une séance de travail afin de présenter les différentes étapes technologiques et le fonctionnement du transistor. Ce travail a été suivi d'une recherche bibliographique menée par les étudiants. Ils ont ainsi affiné la découverte du projet, et identifier clairement les contacts ohmiques et les verrous technologiques. L'étude porte sur la réalisation d'un réseau de trous situé en dessous du contact ohmique. L'aspect très rugueux de la surface du contact ohmique après recuit est très souvent observé sur GaN. Le contact est recuit à 840 °C et à cette température, la formation d'agrégats est très marquée. Par conséquent, les objectifs sont d'améliorer à la fois la rugosité et la résistance de contact R_c (Ω .mm) sans alourdir le procédé technologique. Pour la résistance du contact, la présence d'un cap layer non dopé très épais, est une contrainte très importante. Afin de réaliser un contact ohmique performant, il est nécessaire de graver le semi-conducteur avant la métallisation. On approche ainsi la métallisation

du gaz 2D ce qui permet de diminuer la résistance de contact R_c . L'inconvénient de l'étape de gravure vient du non contrôle en temps réel de l'épaisseur gravée. Le souci, dans ce cas, est de trop graver et de passer au travers du gaz 2D. Le masque comporte différents motifs de trous, dessinés à l'aide du logiciel layout editor. Les motifs sont écrits par le masqueur électronique. Il s'agit de ces réseaux de trous gravés que les étudiants observent à l'aide de l'AFM.

Phase 2 : mesure et caractérisation des motifs gravés de profondeur nanométrique

✓ Premier niveau de difficulté : observation au microscope optique

L'étude porte sur l'analyse de la gravure du semiconducteur de type nitrure de gallium GaN (profondeur, propreté, profil des bords ...). L'objectif est de déterminer les meilleurs paramètres de gravure. Les motifs sont difficilement indentifiables. Il est indispensable de faire le lien avec le masque et de repérer au préalable la position des marches dans le semiconducteur (Figure 2). Les étudiants positionnent l'échantillon sous le microscope afin de repérer la zone à mesurer à l'AFM. Une fois que la binoculaire est placée sur la zone identifiée d'après le masque, ils font varier la polarisation de la lumière afin d'identifier les motifs rectangulaires gravés dans le GaN. Une fois cette étape réalisée, ils prennent conscience de la difficulté du travail à faire à l'AFM, ainsi que de la taille du motif et des échelles nanométriques.

✓ Deuxième niveau de difficulté : observation AFM

La suite du travail repose sur la visualisation à l'AFM de ces motifs. A ce stade du travail, les étudiants se rendent compte de l'importance du pré-positionnement de l'échantillon pour que le balayage de la pointe AFM se fasse bien sur les motifs gravés. Il est important de tenir compte de la limite des courses des micromanipulateurs en x et en y qui commandent la platine sur laquelle est fixée l'échantillon.

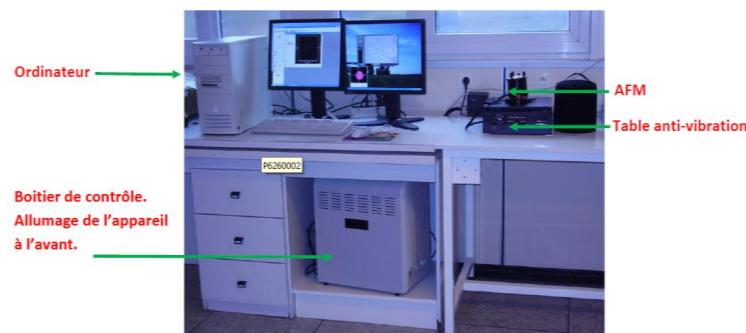


Figure 1 : Photo de la paillasse AFM et de ses différents équipements

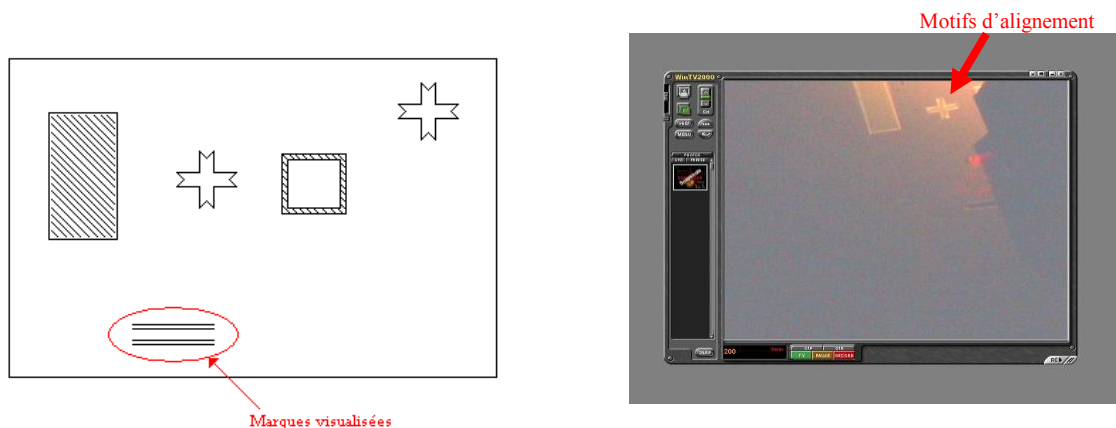


Figure 2 : Motifs d'alignement, du masque (à gauche), visualisés à la caméra de l'AFM (à droite)

✓ Troisième niveau de difficulté : rugosité du contact

La mesure de la rugosité du contact est faite par les étudiants afin d'illustrer l'une des problématiques de ce sujet. Comme nous pouvons le voir sur la figure 3, la mesure faite à l'aide de l'AFM Veeco (diCaliber) par les étudiants. Cette mesure montre une rugosité de la métallisation après recuit très significative liée à la température de recuit de 840°C évoquée dans la phase 1.

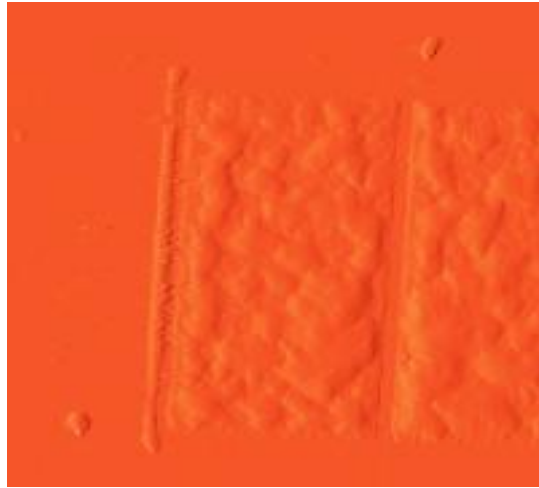


Figure 3 : Image AFM 150x150 μm^2 des contacts ohmiques et de leur rugosité

✓ Quatrième niveau de difficulté : la surface du semiconducteur

La nature du nitrure de gallium rend également l'analyse des mesures AFM difficile. En effet, en raison de plusieurs facteurs tels que la cinétique de croissance et la technique de croissance, la surface du matériau GaN peut présenter une rugosité de la surface qui se développe lentement avec une topographie en collines larges de 1 μm et de hauteur moyenne (rms) avoisinant 5 nm. La cinétique de développement de cette rugosité est alors dénommée rugosité cinétique. Cet état de surface est visible pour une surface de 10x10 μm sur la figure 4. A partir de cette mesure, les étudiants se rendent compte de la difficulté de mesurer une marche de 10nm de profondeur.

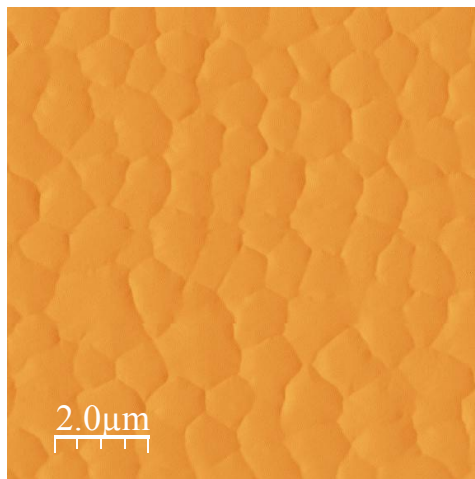


Figure 4 : Image AFM 10x10 μm^2 des états de surface du Nitrure de Gallium

L'approche a été faite de la façon suivante. Après le premier scan de 100x100 μm^2 , les étudiants sont passés à une surface plus faible de 50x50 μm^2 . Ces étapes sont reportées figure 5.

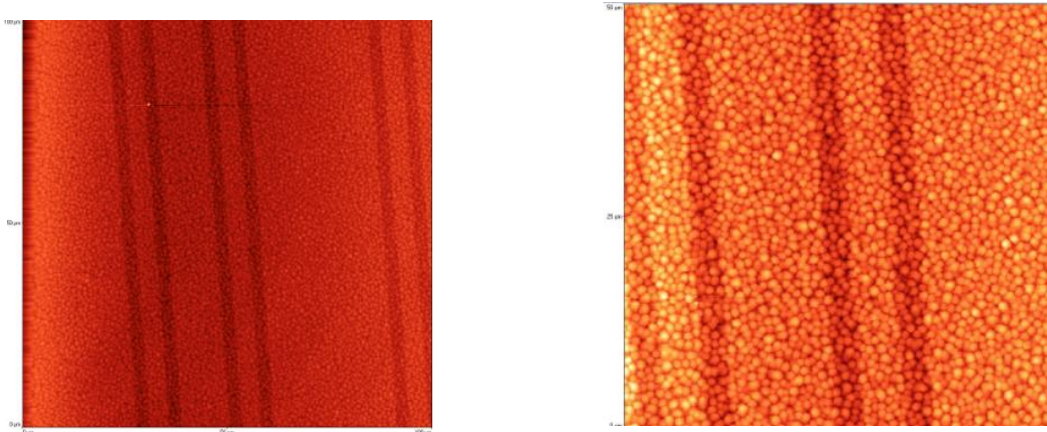


Figure 5 : Images AFM 100x100 μm^2 (à gauche) et 50x50 μm^2 (à droite) de la gravure

Après avoir identifié les grands rectangles, les étudiants ont affiné les réglages afin de caractériser plus finement la profondeur de gravure. La mesure réalisée par les étudiants est reportée figure 6. En positionnant les curseurs sur deux collines, une étant dans la zone gravée et l'autre dans la zone non gravée, les étudiants sont remontés à une hauteur de gravure proche de 13 nm.

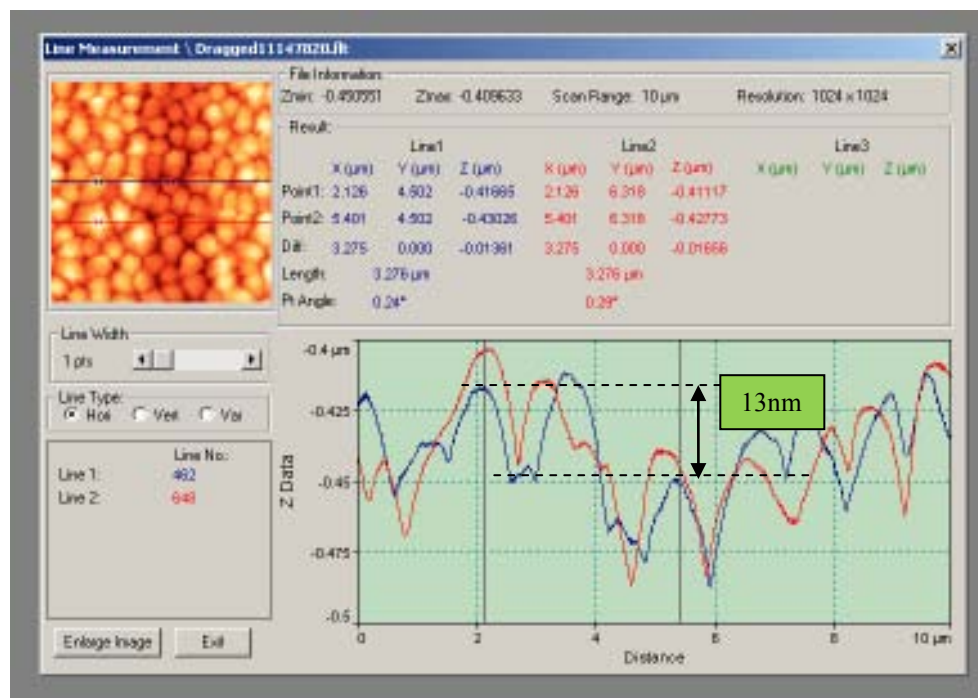


Figure 6 : Mesure de la profondeur de gravure

Phase 3 : comparaison mesure en enseignement et mesure en recherche

La gravure est réalisée à l'intérieur d'un bâti de métallisation par un procédé appelé « Ion Beam Etching » qui consiste à envoyer des ions Ar^+ à une énergie de 300eV sur la surface du Nitrure de Gallium afin de le graver. Nous avons déterminé à l'aide de différents tests et mesures une vitesse de gravure de l'ordre de 4 nm/min.

Les mesures sont confirmées par la caractérisation AFM faite au laboratoire de recherche IEMN (Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie). Nous pouvons voir

nettement la marche engendrée par la gravure (Ar^+ - 300eV – 2 min) du semiconducteur sur la figure 7.

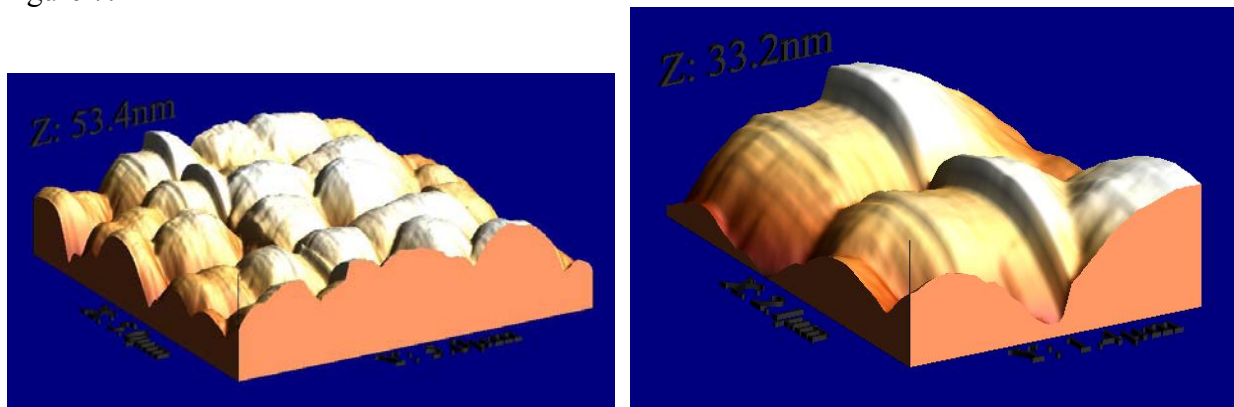


Figure 7 : Images AFM 5x5 μm^2 (à gauche) et 2,1x1,4 μm^2 (à droite) de la marche de gravure

La figure 8 nous indique une hauteur de marche, et donc une profondeur de gravure, d'environ 8 nm.

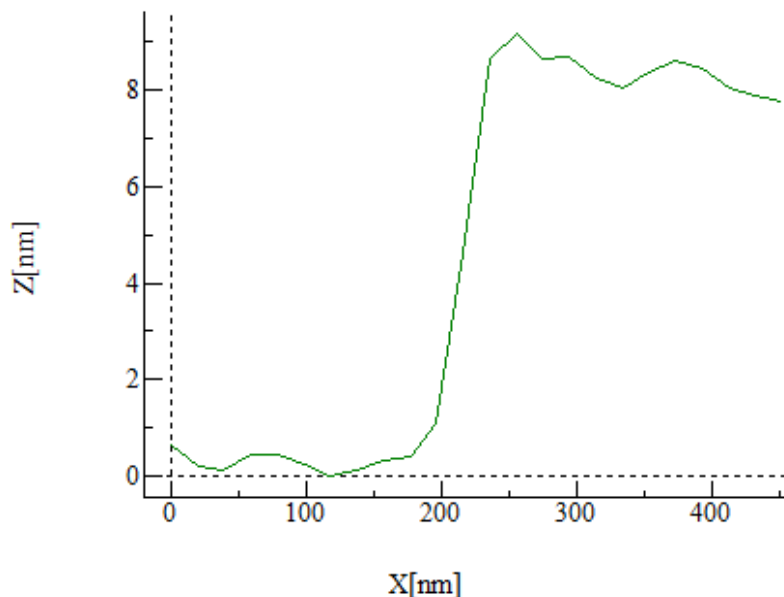


Figure 8 : Relevé topographique de la surface – Profondeur de gravure

Nous trouvons donc un résultat similaire pour la mesure de la profondeur de gravure entre l'IEMN (mesure du test de gravure Ar^+ - 300eV – 2 min) et le pôle CNFM (mesure du test de gravure Ar^+ - 300eV – 3 min). Cela indique une très bonne adéquation entre les deux équipements AFM (enseignement di-caliber de VEECO – recherche Dimension 3100 VEECO).

Phase 4 : présentation des travaux lors d'un exposé oral et d'un rapport de stage

Les étudiants ont rédigé un rapport qui a été corrigé volontairement par un autre enseignant – chercheur qui n'a pas suivi le binôme pendant le TER. Un des éléments remarquable a été l'absence de légende et d'échelle indiquant la taille des surfaces scannées dans le traitement des images. En ce qui concerne la soutenance, les étudiants ont fait une bonne prestation orale devant le jury avec un projet relativement bien structuré montrant leur progression dans le TER. La réponse aux questions a également été satisfaisante pour les deux étudiants.

III- LE DEVENIR DES ETUDIANTS

Avant de faire ce travail, l'étudiant A n'avait pas d'avis sur la poursuite de ses études. Il avait déjà suivi le module d'initiation à la mesure AFM. L'étudiant B souhaitait poursuivre ses études dans le domaine des télécommunications. Ce dernier n'avait pas suivi le module d'initiation à l'AFM du master 1. Ces deux étudiants ont validé leur première année de master et poursuivi leur cursus à l'Université Lille1. L'étudiant A a intégré le master MiNT spécialité Micro-Nanotechnologie tandis que l'étudiant B a intégré le master MiNT spécialité Télécom.

IV- CONCLUSION

Ce projet d'étude a permis aux étudiants de s'initier à la formation par la recherche. Ils ont rapidement acquis une autonomie dans leur travail, et ont montré une progression continue tout au long du projet. Ils ont acquis une très bonne connaissance des techniques de mesures en champ proche. De ce fait ils ont été rapidement autonomes. L'utilisation de l'AFM leur a permis d'améliorer leur connaissance sur le fonctionnement du microscope à force atomique.