

Synthèse Du Gallium Nitride Gan Par Implantation Ionique A Haute Energie

Dr. Abd Ulwahab Queka*

(Déposé le 6 / 4 / 2009 . Accepté 4 / 2 / 2009)

□ Résumé □

Dans ce travail nous rapportons une nouvelle technique pour produire le GaN, à savoir la synthèse par implantation ionique d' azote dans un substrat de GaAs.

Les substrats de GaAs (001) semi isolants ont été implantés à une dose de $3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ (de $3 \cdot 10^{17} \text{ N}^+/\text{cm}^2$) à 50 keV, ensuite recuits classiquement à 950 °C pendant 30 min sous un flux d' argon. Les caractérisations structurales par TEM ont permis de confirmer la présence d' une couche cristalline de profondeur de 100 nm de β -GaN épitaxiée sur GaAs. avec une relation d'épitaxie parfaite.

La croissance a été formée dans la phase métastable (β -GaN), la réalisation de la phase hexagonale classique semble être possible par la modification des conditions du traitement thermique.

Mots-clés: Semi-conducteurs, Implanter Ionique, Implantation Ionique, Couches Minces, Microscopie Électronique à Transmission, Élaboration du GaN, Recuit Thermique, Caractérisation Structurale, Analyse SIMS.

* Enseignant, Département de Sciences Basiques, Faculté de Génie électrique et électronique, Université d'Alep.

تصنيع مادة نتريد الغاليوم GaN بواسطة الزراع الأيوني بطاقة عالية

الدكتور عبد الوهاب قعقع*

(تاريخ الإيداع 6 / 4 / 2009. قُبِلَ للنشر في 4 / 2 / 2010)

□ ملخص □

سوف نستعرض في هذا العمل تقنية جديدة لإنتاج مادة نتريد الغاليوم GaN، المغايرة لتقنيات الانتشار (Diffusion)، ألا وهي تقنية التركيب بواسطة الزرع الأيوني (Implantation Ionique) للأزوت ضمن ركيزة (Substrat) من مركب زرنبيخ الغاليوم GaAs. لقد تمّ زرع بضع ركائز من الـ GaAs نوات الاتجاه البللوري (0 0 1) نصف العازلة بجرعة أيونات من الأزوت قدرها $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ (أي: $3 \times 10^{17} \text{ N}^+ / \text{cm}^2$) طاقتها 50 keV، ثم شبيها في فرن كلاسيكي بدرجة حرارة 950°C لمدة ثلاثين دقيقة ضمن جو من غاز الأرغون الخامل. وقد سمح التوصيف البنيوي بواسطة الـ T. E. M (Microscopie Electronique en Transmission) بالتأكيد على وجود طبقة متبلورة من الـ $\beta\text{-GaN}$ عمقها 100nm متنتضة (épitaxiée) على ركيزة الـ GaAs بعلاقة تنضد (épitaxie) تامة. إن عملية النمو (La croissance) البللوري كانت قد تشكلت في طورها المكعب شبه المستقر $\beta\text{-GaN}$ ، كما أن إنجاز الطور السداسي المستقر الكلاسيكي $\alpha\text{-GaN}$ يبدو أنه ممكن من خلال تغيير شروط المعالجة الحرارية.

الكلمات المفتاحية: أنصاف نواقل، الزارع الأيوني، الزرع الأيوني، الطبقات الرقيقة، المجهر الإلكتروني TEM، تصنيع الـ GaN، الشبي الحراري توصيف بنيوي، التحليل بواسطة الـ SIMS.

*مدرس - قسم العلوم الأساسية - كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية - جامعة حلب - حلب - سورية

Introduction:

Le but de ce travail expérimental a consisté, dans un premier temps, à mettre en fonction, tester puis étalonner un implantateur ionique de type **Varian 200-20A2F**. Il s'agissait ensuite d'élaborer de nouveaux matériaux à l'aide de ce même implantateur.

Un faisceau d'ions de différentes espèces ionique (N, Ar, O, B) a pu être rapidement obtenu. Nous avons mesuré la taille du spot ionique délivré par l'implantateur pour plusieurs conditions d'accélération et ce afin de nous assurer de sa symétrie. Cette étape nécessaire à l'obtention d'un bon alignement de l'ensemble de la machine, est particulièrement importante car elle détermine en grande partie l'uniformité finale de la dose d'implantation sur la cible.

Nous avons ensuite étalonné la dose puis mesuré son uniformité à partir d'une implantation de Bore dans une tranche de silicium de trois pouces et une mesure de résistivité.

Enfin, une première élaboration d'une couche de GaN a été obtenue en bombardant une cible de GaAs avec de l'azote avec une dose importante permettant de modifier la stoechiométrie locale et de ce fait réussir à synthétiser du GaN.

Dans la première partie, nous tirons le bilan de fonctionnement de notre nouvel implantateur ainsi que les perspectives d'amélioration du système.

L'importance et les objectifs de la recherche:

Ce travail de recherche se concentre sur la technique de l'implantation ionique utilisée dans le synthèse et la fabrication des matériaux, puisque cette technique offre de nombreux avantages par rapport aux autres de techniques connues. D'autre part, le but essentiel de cette recherche est de servir cette technique en effectuant la synthèse du Gallium Nitride – une matière d'une grande importance pour le domaine de l'optoélectronique – par l'implantation des ions de l'azote dans le GaAs. L'importance de la matière GaN vient de la possibilité de son utilisation pour fabriquer des composants électroniques émetteurs de lumière dans toute la gamme visible, surtout le bleu, ces composants étant capables de supporter des hautes températures, des grandes puissances et des hautes fréquences.

La méthodologie et les outils de la recherche:

Dans premier temps, nous allons faire une brève présentation de la théorie de l'implantation ionique et du dispositif expérimental avec la description de l'implantateur ionique et du principe de son fonctionnement.

Dans la partie expérimentale de notre travail, nous allons effectuer l'étalonnage de l'implantateur pour ajuster les paramètres géométriques et le courant ionique du faisceau pour obtenir une dose ionique uniforme.

Après avoir effectué l'étalonnage et avoir choisi une énergie du faisceau et une dose ionique appropriées, nous allons procéder à l'implantation des ions de l'azote dans un substrat du GaAs. Ensuite, nous allons effectuer l'analyse SIMS de l'échantillon avant le recuit thermique pour connaître la vraie dose ionique implantée. Enfin, nous allons procéder à la caractérisation structurale de l'échantillon et ce sera la dernière étape dans l'évaluation des résultats obtenus.

1- Théorie de l'implantation ionique

L'implantation ionique consiste à bombarder un substrat avec des ions accélérés de l'élément désiré. Ces ions vont ensuite perdre leurs énergies par des collisions successives avec les atomes et les électrons de la cible. On assiste alors, après implantation, à

distribution des ions dans le substrat qui dépend des paramètres d'implantation (énergie, dose, température du substrat).

1-1 Généralités sur les interactions ion/cible

Un ion énergétique pénétrant dans un matériau perd son énergie selon les deux principales interactions suivantes:

1) Les collisions élastiques entre les noyaux des atomes de la cible et l'ion incident. Ce processus est appelé ralentissement nucléaire. Au cours de ce type d'interaction, l'ion incident cède une partie de son énergie à un atome cible. Ce choc donne lieu, d'un part, à la modification de la direction de la vitesse de l'ion et éventuellement au déplacement de l'atome percuté.

2) L'ion incident est soumis à des interactions continues avec les nuages électroniques des atomes du substrat. Le ralentissement électronique est caractérisé par l'ionisation et l'excitation électronique de ces atomes. Il peut aussi modifier l'état de charge de l'ion.

Ces phénomènes d'interaction ion-matière peuvent être à l'origine de nombreux effets secondaires que l'on peut détecter expérimentalement (processus de pulvérisation et rétrodiffusion Rutherford). Enfin, les interactions de l'ion avec le substrat peuvent donner lieu à des réactions nucléaires. Les produits de ces réactions peuvent être éjectés à l'extérieur du solide.

Ces différents processus, résultant des interactions entre l'ion et les atomes de la cible, sont présentés sur la figure (1). Ils se produisent avec des probabilités différentes qui dépendent des caractéristiques de la particule incidente et de la cible.

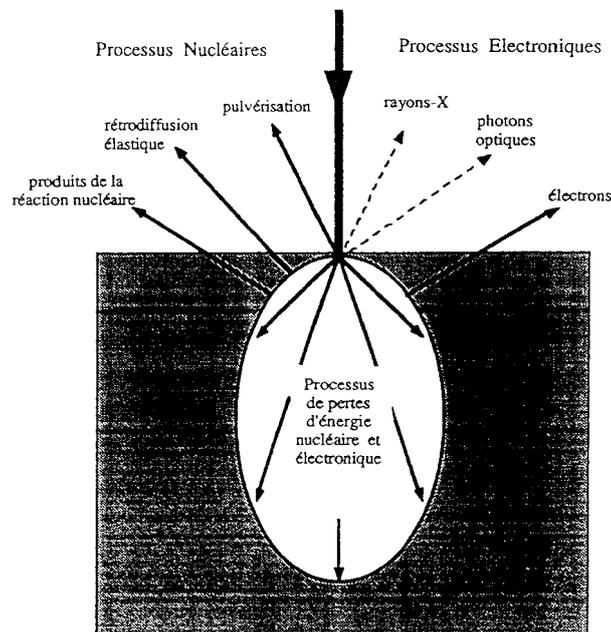


Figure (1): Différents processus nucléaires et électroniques dus à l'interaction ion/matière

1-2 Notion de parcours des ions dans les solides

Le ralentissement de la particule est caractérisé par la perte d'énergie par unité de longueur parcourue dans la cible dE/dx . En tenant compte des deux principaux mécanismes d'interactions (nucléaire et électronique indépendants). L'énergie totale perdue par l'ion et par unité de longueur s'écrit [14]:

$$-\frac{dE}{dx} = N.S_t(E) = N.[S_n(E) + S_e(E)] \quad (1)$$

où N est la densité des atomes cibles, $S_t(E)$ est le pouvoir d'arrêt total, $S_n(E)$ est le pouvoir d'arrêt nucléaire qui représente la perte d'énergie moyenne par unité de distance parcourue et $S_e(E)$ est le pouvoir d'arrêt électronique représentant la perte d'énergie moyenne par unité de distance parcourue.

On appelle parcours moyen R , d'une particule d'énergie incident E dans un substrat, la distance parcourue par la particule avant son arrêt. La projection de cette quantité sur la direction normale à la surface de la cible constitue le parcours projeté R_p . Ces deux quantités sont définies sur la figure (2). L'expression du parcours moyen de l'ion est donnée [6, 14] par:

$$R = \int_0^{E_0} \frac{dE}{N.[S_n(E) + S_e(E)]} \quad (2)$$

La détermination de cette quantité nécessite la connaissance des pouvoirs d'arrêt nucléaires et électroniques.

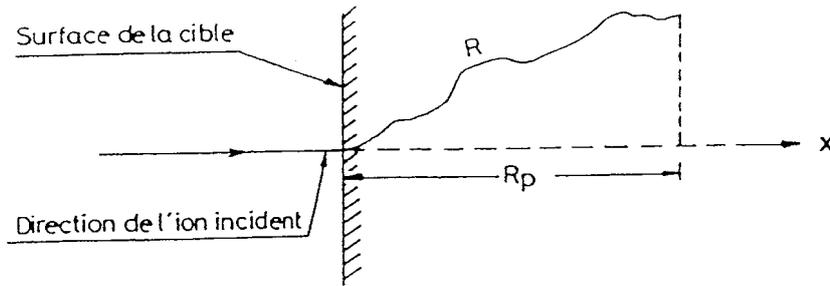


Figure (2): Notion de parcours projeté

a) Pouvoir d'arrêt nucléaire

Le mécanisme de perte d'énergie de la particule incidente, par interaction nucléaire avec des atomes de la cible, peut être écrit mathématiquement par la section efficace différentielle de collision. Ainsi, le pouvoir d'arrêt nucléaire s'écrit:

$$S_n(E) = \int_0^{T_m} T.d\sigma(E, T) \quad (3)$$

où T est l'énergie transmise par un ion de masse M_1 et de charge Z_1 et d'énergie E lors d'une collision avec un atome de masse M_2 et de charge Z_2 au repos, σ la section efficace différentielle de collision.

Pour décrire l'interaction ion-matière, on utilise un potentiel de coulomb écrané et issu du modèle de Thomas-Fermi dont l'expression est donnée par:

$$V(r) = \frac{Z_1.Z_2.e^2}{r} \phi\left(\frac{r}{a_{TF}}\right) \quad (4)$$

où r est la distance de séparation entre l'ion et l'atome, ϕ est la fonction d'écran de Thomas-Fermi, Z_1 et Z_2 sont les numéros atomiques de l'ion incident et d'un atome de la cible respectivement et a_{TF} est donné par:

$$a_{TF} = \frac{0.8853}{(Z_1^{1/2} + Z_2^{1/2})} a_0 \quad (5)$$

avec $a_0 = 0.0053$ nm (rayon de Bohr).

Dés lors que la diffusion est étudiée dans un tel potentiel [1, 12, 13, 14], deux paramètres doivent être définis:

- le premier, réduit en énergie, est relié au rayon de Thomas-Fermi a_{TF} par:

$$\varepsilon = \frac{a_{TF} \cdot M_2}{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2 (M_1 + M_2)} E \quad (6)$$

- le second est un paramètre relatif à l'épaisseur Z traversée par l'ion. Son expression est:

$$\rho = 4\pi a_{TF}^2 N \frac{M_1 \cdot M_2}{(M_1 + M_2)^2} Z \quad (7)$$

si $\varepsilon \gg 1$ alors les collisions de paramètres d'impacts inférieures à a_{TF} sont très probables. La répulsion est alors quasiment coulombienne privilégiant des interactions de type électroniques.

si $\varepsilon < 1$ alors l'effet d'écran devient prépondérant, ce qui favorise les interactions de type nucléaires.

b) Pouvoir d'arrêt électronique

Nous nous limitons à une gamme d'énergie telle que la vitesse de l'ion soit inférieures à la vitesse moyenne des électrons des atomes cibles, c'est-à-dire à une limite supérieure de quelques MeV. Dans cette gamme d'énergie, le pouvoir d'arrêt électronique est proportionnel à la vitesse de l'ion [2, 14] soit:

$$S_e(E) = - \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho} \right)_e = k \cdot \varepsilon^{1/2} \quad (8)$$

Où k dépend de l'ion et de la cible est défini par la relation qui suit [3, 14]:

$$k = \frac{0.0793 Z_1^{2/3} \cdot Z_2^{1/2} (M_1 + M_2)^{3/2}}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{3/4} M_1^{3/2} \cdot M_2^{1/2}} \quad (9)$$

Les valeurs typiques de ce paramètre sont comprises entre 0.1 et 0.25.

La figure (3) représente les variations du pouvoir d'arrêt électronique pour $k=0.15$ ainsi que le pouvoir d'arrêt total réduit qui s'écrit:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{d\rho} \right) = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho} \right)_n + \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho} \right)_e \quad (10)$$

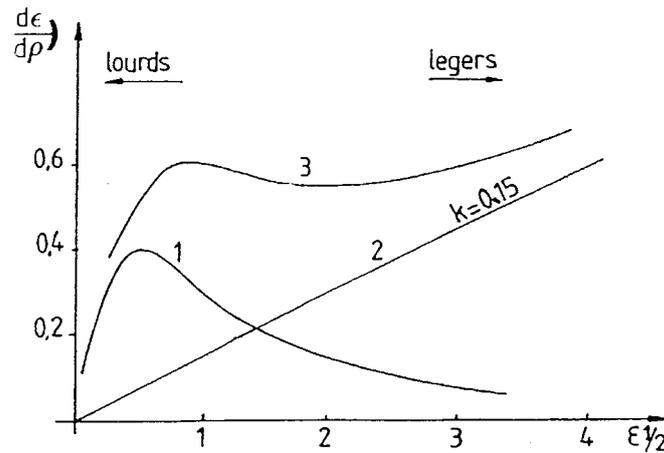


Figure (3): pouvoir d'arrêt réduit. 1. pouvoir d'arrêt nucléaire; $\left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_n$, 2. pouvoir d'arrêt électronique; $\left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_e$, 3. pouvoir d'arrêt total; $\left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)$

A partir de cette figure, on identifie alors trois zones:

- (i) si $\varepsilon < 0.2$, le pouvoir d'arrêt nucléaire domine, c'est le domaine des ions " lourds ",
- (ii) si $0.2 < \varepsilon < 4$, le pouvoir d'arrêt est presque constant, c'est le domaine des ions " intermédiaire ",
- (iii) si $\varepsilon > 4$, c'est le domaine des ions " légers", le pouvoir d'arrêt électronique est dominant.

Notons que les dénominations "lourds", "légers", ou "intermédiaire" ne se rapportent pas uniquement à la masse de l'ion. Elle décrivent aussi l'efficacité du freinage vis-à-vis des processus de perte d'énergie. Ainsi, un ion d'argon peut être considéré comme lourd à 10 keV et léger à 300 keV.

1-3 Distribution des parcours projetés

Du fait des nombreuses déviations dues aux interactions avec le matériau, les ions incidents n'auront pas le même parcours durant leur pénétration. Par conséquent, ils auront des positions d'arrêt différentes. C'est ainsi qu'il nous faut introduire la notion de distribution des parcours projetés qui permet de caractériser la pénétration des ions dans la direction incidente. La détermination de cette distribution a fait l'objet de plusieurs études théoriques [4, 5, 11, 14]. En première approximation, une description gaussienne de ces profils s'avère satisfaisante. La distribution des parcours projetés en fonction de la profondeur x s'exprime alors par:

$$N(x) = \frac{D}{\sqrt{2\pi} \sigma_p} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\sigma_p} \right)^2 \right] \quad (11)$$

où D est la dose d'ions implanté, R_p et σ_p sont respectivement le parcours projeté moyen et la déviation standard.

Le parcours projeté moyen R_p donne la profondeur de pénétration moyen des ions dans la direction incidente. Il peut être calculé à partir des caractéristique de l'ion incident

et du matériau cible. Pour les énergies typiques de 10 keV à 500 keV, R_p varie entre 100Å et 1000Å selon le type d'ion et la nature de la cible. La déviation standard σ_p caractérise la dispersion des parcours projetés autour de cette valeur moyenne. Pour des énergies équivalentes, elle varie typiquement entre 10Å et quelques milliers d'angströms. La concentration finale des ions implantés suit approximativement une gaussienne centrée sur le parcours projeté moyen R_p , avec une déviation standard σ_p .

1-4 Avantages

La méthode d'implantation ionique présente plusieurs avantages pour la fabrication de dispositifs semi-conducteurs. Les principaux d'entre eux sont les suivants:

- 1) Vitesse, homogénéité et reproductibilité du procédé.
- 2) Contrôle précis du nombre d'atomes (dopants) introduits par une mesure du courant ionique. Ceci est particulièrement important pour les faibles concentrations de dopant quelquefois nécessaires dans l'élaboration des transistors MOS.
- 3) Cette technique permet de réaliser des couches dont la concentration en l'espace implanté dépasse largement sa limite de solubilité dans le substrat. Précisons que ceci n'est pas réalisable par un procédé classique telle que la diffusion.
- 4) Des implantations multiples peuvent être réalisées en changeant la tension accélératrice en cours d'implantation, ce qui permet d'obtenir des profils plats d'impuretés implantées.
- 5) Enfin, grâce à la faible profondeur de pénétration des ions et à leur diffusion latérale faible [9, 10], l'implantation ionique offre la possibilité de fabriquer des composants de très petites dimensions, condition nécessaire à la poursuite de la course vers les hautes densités d'intégration.

3-2 Dispositif expérimental – Implanter ionique Varian200-20A2F

Le modèle d'implanteur d'ions (Varian 200-20A2F) est conçu spécifiquement comme un outil de fabrication de composants semi-conducteurs à ions implantés à hauts niveaux de dopage. En mode de fonctionnement manuel l'appareil peut être utilisé pour effectuer des travaux bien spécifiques, les paramètres et les modes de traitement d'échantillons pouvant être ajustés selon les besoins de l'utilisateur

A quelques modifications près, tous les implanteurs sont généralement constitués de mêmes organes et fonctionnent selon le même principe. Nous présentons dans ce qui suit les constituants et le mode de fonctionnement de l'implanteur ionique 200-20A2F que nous avons utilisé pour réaliser ce travail.

2-1 Constituants

Le schéma de l'implanteur ionique **200-20A2F** est présenté sur la figure (4). Il se compose de cinq parties [8].

1) Chambre de source

C'est une chambre où sont produits les ions. Elle contient un filament dans lequel circule un fort courant électrique. Des électrons sont alors émis et mis en mouvement par le champ magnétique appliqué par une bobine extérieure. Dans cette chambre où règne un vide primaire, est introduit un gaz (Ar, N, O, B,...) qui va interagir avec les électrons en produisant des ions. Les ions ainsi obtenus sont extraits de la source par une électrode d'extraction polarisée à quelque dizaines de kilovolts. L'élément à implanter est alors ionisé par des chocs électroniques de décharge. Le gaz introduit peut, en certaines circonstances, être remplacé par un solide vaporisé dans un creuset chauffant situé à l'intérieur de la source.

2) Prisme magnétique

Une fois que les ions sont extraits, ils sont sélectionnés dans l'analyseur de masse qui constitue la deuxième partie de l'implanteur. Là, un champ magnétique B généré par des bobines et perpendiculaire à la vitesse des ions, donne lieu à une force de Lorentz qui incurve leurs trajectoires. Le rayon de courbure ρ est fonction de la masse m_{ion} et de la charge q_{ion} de chaque ion [7, 12]:

$$\rho = \frac{m_{ion} \cdot v_{ion}}{q_{ion} \cdot B} = \frac{1}{B} \cdot \sqrt{\frac{2 m_{ion} \cdot V_{extract}}{q_{ion}}} \quad (12)$$

où $V_{extract}$ est la tension d'extraction appliquée (25 KV) à la sortie de la source. Comme le courant d'alimentation des bobines est réglable, la valeur de B peut être ainsi ajustée ($B = \mu_0 \cdot N \cdot I$) pour sélectionner l'espèce à implanter.

3) Accélération

Une fois sélectionnés, les ions atteignent la troisième partie de l'implanteur qui est la colonne d'accélération. A cet endroit, ils acquièrent l'énergie désirée sous une tension d'accélération qui peut atteindre 200 KV.

4) Systèmes de focalisation et balayage

La quatrième partie est constituée des lentilles quadripolaires et d'un balayage électronique. Les lentilles permettent de focaliser le faisceau d'ions. Quant au balayage, il permet d'appliquer une tension continue qui dévie le faisceau en permanence pour éliminer les neutres produits tout le long du trajet. Ce balayage permet aussi d'obtenir une implantation uniforme des ions sur toute la surface de l'échantillon.

5) Chambre de cible

Cet échantillon est placé dans la cinquième partie de l'implanteur appelée chambre de cible où un vide secondaire de quelques 10^{-6} torr est présent. Nous trouvons également à cet endroit un système de mesure du courant ionique constitué de cages de Faraday et enfin le support d'échantillon portant la cible.

La cage de Faraday permet la détermination du flux (ϕ) implanté à partir du courant qu'elle délivre I_F et de ses caractéristiques géométriques:

$$\phi \left[\text{ions} / \text{cm}^2 \right] = \frac{I_F}{S} \cdot 1.06 \times 10^{19} \quad (13)$$

où I_F est le courant de Faraday exprimé en μA , S est la surface du diaphragme d'entrée de la cage.

La dose implantée est $D = t \cdot \phi$ (ion/cm²) où t est le temps d'implantation. Notons que le fonctionnement de l'implanteur nécessite un vide permanent de l'ordre de $2 \cdot 10^{-6}$ torr qui est assuré par un système de pompage comportant quatre pompes à palettes et trois autres à diffusion.

Cet outil, très largement utilisé dans le domaine de la micro-électronique, permet de doper les matériaux avec un grand nombre d'ions atomiques ou moléculaires dans des gammes de dose et d'énergie très étendues avec une très bonne homogénéité et de façon reproductible. C'est ainsi que l'implantation ionique a su faire l'unanimité dans le domaine de la micro-électronique.

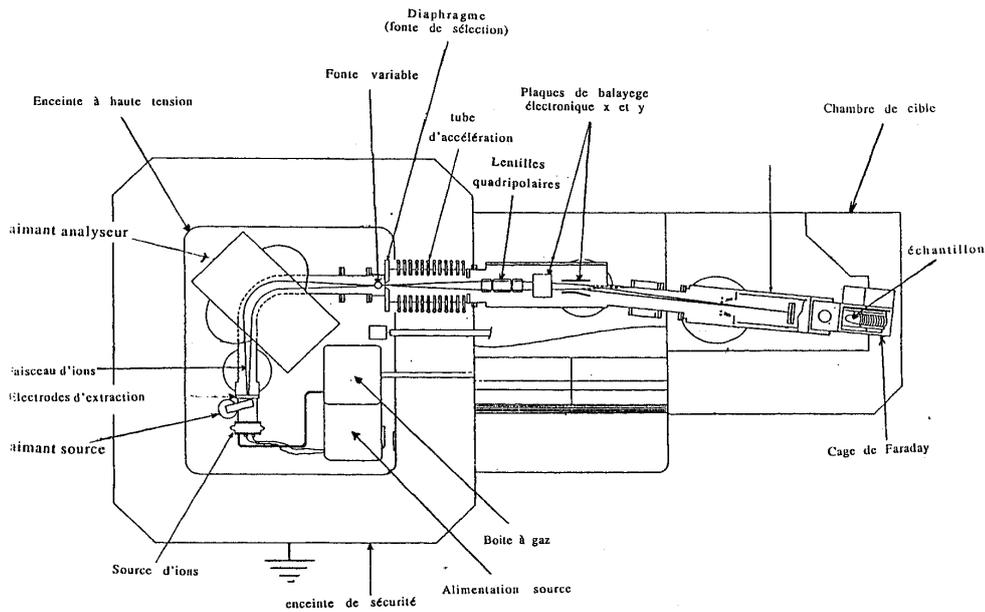


Figure (4): L'implanteur ionique Varian 200-20 A2F

2-2 Principe de fonctionnement

Cette partie fournit la description globale du fonctionnement de l'implanteur d'ions (figure-4). Un faisceau d'ions est ainsi extrait de la source par le champ électrostatique placé entre l'ouverture de sortie de cette même source et l'électrode d'extraction. Ces ions sont accélérés avec une énergie de 25 KeV et pénètrent dans l'analyseur magnétique de masse dans le terminal de haute tension. Le courant magnétique est ajusté de telle façon que seuls les ions de l'espèce désirée poursuivent leur chemin à travers l'aimant pour être ensuite focalisés dans le point-image de l'analyseur. Les autres ions (espèces indésirables) suivent des chemins différents dépendant de leurs masses et énergies pour être déviés sur les parois de la chambre d'analyseur, ou encore sur les côtés de l'ouverture de résolution située dans le plan-image.

L'ouverture de résolution a un diamètre tel que seul le faisceau d'ions de l'espèce désirée passe à travers l'aimant. C'est cette ouverture qui confère à l'implanteur sa résolution ou son pouvoir de séparation. Le faisceau d'ions passe aussi à travers une fente variable, située juste avant le plan de résolution. Cette fente, par ouverture et fermeture, contrôle l'intensité du faisceau. Ainsi en variant l'ouverture de la fente, les intensités du faisceau peuvent être contrôlées d'une valeur minimale jusqu'à la valeur maximale propre à l'implanteur.

La source d'ions, l'analyseur de masse et le système de fente variable sont contenus dans le terminale de haute tension (qui est maintenu au potentiel de la tension d'accélération, 0 - 175 KeV). Ce terminale de haute tension est situé à l'intérieur de l'enceinte pour écarter tous dangers au personnel.

En sortant de l'ouverture d'analyseur, le faisceau entre dans le tube d'accélération dont un côté est relié au terminale de haute tension et l'autre à la terre. Le champ dans ce tube fournit la principale accélération au faisceau qui sort ainsi avec une énergie totale de 25 à 200 KeV ($25_{ext} + 0_{acc} = 25 \text{ KeV}$, $25_{ext} + 175 = 200 \text{ KeV}$).

A la sorti du tube d'accélération, le faisceau d'ions traverse la lentille quadripolaire. Il est ainsi focalisé puis est ensuite soumis à l'action des plaques de déviation qui

permettent d'abord d'éliminer les neutres, puis ensuite de réaliser un balayage en xy afin qu'une grande surface de l'échantillon soit effectivement implantée. La cage de Faraday fournit la mesure du courant ionique.

Par ailleurs, pour les appareils industriels, il est fréquent de trouver des systèmes automatisés de chargement d'échantillons.

Etudes expérimentales et résultats:

Avant effectuer une implantation ionique donnée, un étalonnage expérimental doit être effectué. Son but est de déterminer les paramètres de faisceau ionique (énergie, température de l'échantillon, etc...) qui permettent d'élaborer le matériau ainsi désiré. En fonction de ces paramètres, la durée de l'implantation peut varier de quelques dizaines de minutes à quelques jours. Ce n'est qu'avec une bonne maîtrise de ces paramètres associées à une bonne préparation des échantillons que les résultats peuvent être satisfaisants et reproductibles.

1- Première partie - Etalonnage

a) Mesure de la taille du faisceau ionique

Nous avons mesuré la taille du faisceau ionique pour diverses conditions d'accélération et ce afin de s'assurer de sa symétrie et de mesurer aussi la distribution du courant dans le spot ionique.

a-1) Méthode expérimentale

Elle requiert l'utilisation d'un oscilloscope de contrôle. L'une de ses voies reçoit le courant du faisceau délivré par la cage de Faraday, l'autre un signal représentatif du balayage (en x ou en y) du faisceau d'ions. La figure (5) illustre les régions correspondantes aux différentes positions du faisceau ionique incident sur le diaphragme ($L=7.46$ cm, en supposant que le faisceau est une gaussienne):

(1) correspond au balayage du faisceau à l'extérieur de la cage de Faraday, (2) et (3) correspondent au spot ionique balayé sur le bord du diaphragme. Ces deux régions de transition permettent une excellente mesure de la dimension du faisceau dans la direction du balayage. On peut par ailleurs déterminer les caractéristiques du spot en x puis en y.

(4) correspond au faisceau balayé dans la cage de Faraday. L'observation d'un plateau horizontal indique un fonctionnement stable de la source. Cette région donne des indications sur l'uniformité du courant ionique.

(5) correspond à la chute du courant central dans la cage de Faraday secondaire de la courbe. Cette région est une bonne indication de l'état de focalisation et d'alignement du faisceau ionique.

Les régions (6), (7), (8) et (9) représentent la même chose par symétrie.

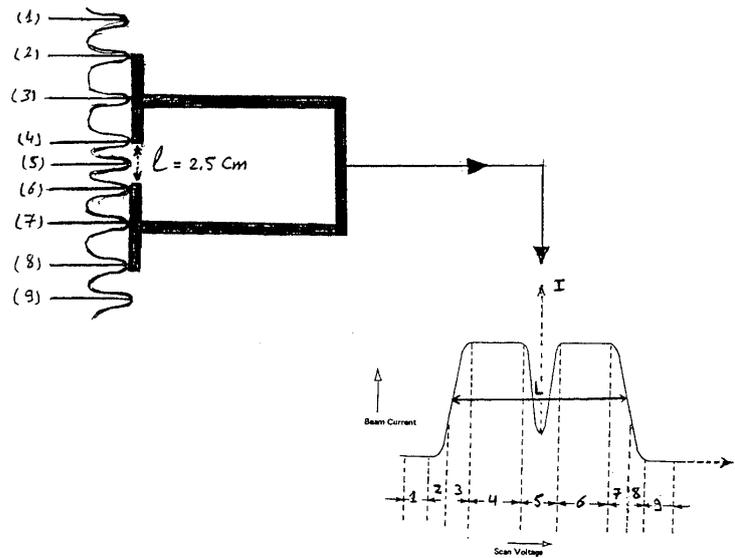


Figure (5): Profil du courant du faisceau

a-2) Mesures expérimentales

Nous avons tracé $I(x)$ et $I(y)$ pour différentes énergies du faisceau ionique comme le montre la figure (6-a et b) pour deux types d'ions (azote et argon).

Azote:

Nous remarquons sur la figure (6-a) que la section du faisceau en fin de station n'est pas symétrique et nous avons pu mesurer une différence entre les axes x et y d'environ 5 mm. Cette géométrie reste à peu près stable, mais elle change légèrement quand on augmente l'énergie du faisceau.

Argon:

Nous remarquons sur la figure (6-b) que le spot est pratiquement symétrique et circulaire au voisinage d'une énergie du faisceau de 70 KeV.

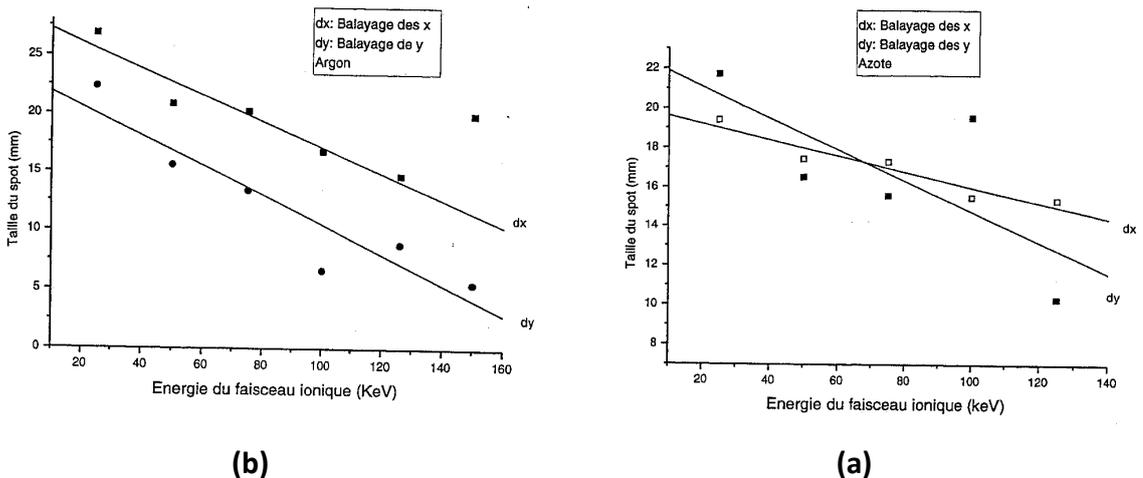


Figure (6): Les balayages du faisceau suivant x et y en fonction d'énergies utilisées pour l'azote et l'argon.

a-3) Conclusion

Les résultats obtenus sur les paramètres géométriques du faisceau sont satisfaisants pour obtenir une dose uniforme. Nous démontrerons dans la deuxième partie de ce paragraphe par des mesures électriques (mesure de résistivité) que les résultats obtenus assurent l'uniformité de la dose implantée, du courant ionique de notre faisceau et que la section du faisceau sur l'échantillon est suffisamment correcte pour être symétrique.

b) Uniformité de la dose implantée

b-1) Implantation du Bore sur le silicium

Pour élaborer la dose implantée et mesurer son uniformité, nous avons implanté des ions Bore dans une tranche de silicium de trois pouces pour diverses conditions d'accélération. Les énergies utilisées sont E=5, 25, 100 KeV pour des doses respectives correspondantes de $D=10^{14}$, 10^{15} , 10^{16} ions/cm².

b-2) Recuit thermique

Après dopage, une partie des échantillons doit subir un traitement thermique dans un four de recuit à une température comprise entre 700 °C et 1100 °C. Le but de cette étape est de restaurer la cristallinité de la couche tout en évitant la formation de défauts et activer électriquement le bore implanté. Nous avons utilisé pour cela un recuit classique, soit une température de 950 °C pour une durée de 30 minutes.

b-3) Simulation du profil d'impuretés

Nous avons étudié à l'aide du logiciel Ipro95 (programme de simulation) trois profils d'impuretés correspondants à trois énergies différentes du faisceau d'ions (E = 5, 25 et 100 KeV). Ces profils sont reportés sur la figure (7). A partir de ces courbes, nous avons calculé les densités des distributions de dopants en utilisant la relation suivante:

$$N_{\text{max}} \approx \frac{N_D}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \quad (14)$$

où N_D est la dose implantée, ΔR_p est la déviation standard projetée.

Les résultats obtenus sont les suivants,

$$E = 5 \text{ KeV} \Rightarrow N_{\text{max}} \approx 2.57 \times 10^{19} \text{ ions / cm}^2$$

$$E = 25 \text{ KeV} \Rightarrow N_{\text{max}} \approx 9.36 \times 10^{19} \text{ ions / cm}^2$$

$$E = 100 \text{ KeV} \Rightarrow N_{\text{max}} \approx 5.37 \times 10^{19} \text{ ions / cm}^2$$

Ces résultats permettent d'obtenir des concentrations de bore implanté bien inférieures à la limite de solubilité du bore dans le silicium aux températures utilisées.

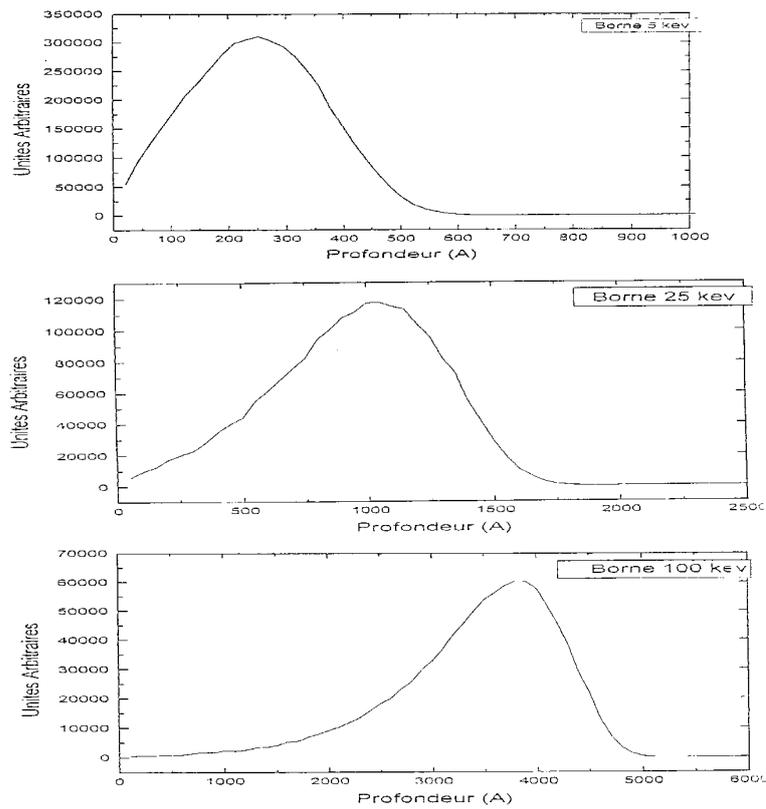


Figure (7): Profils d'impuretés.

b-4) Mesures de la résistance carrée

Principe

La méthode utilisée pour mesurer la résistivité est celle des quatre points en ligne. Cette méthode non destructive consiste en la mesure de la tension V aux bornes de deux contacts lorsqu'un courant I connu parcourt les deux autres contacts (figure-8).

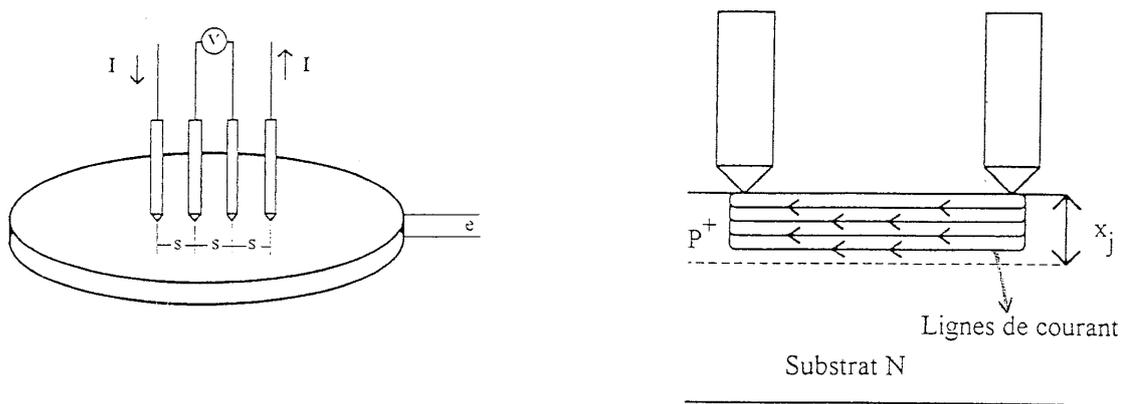


Figure (8): Schéma de principe de la mesure de résistivité par la méthode des quatre points en ligne et représentation des lignes de courant dans une structure P⁺N.

En supposant que l'échantillon est homogène, infini et que la distance entre deux contacts S est très supérieure à l'épaisseur de la couche caractérisée, on montre que la résistivité du matériau est égale à,

$$\rho = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot \frac{V}{I} \cdot e \quad (15)$$

où e est la profondeur de pénétration des lignes de courant.

Nous avons ainsi appliqué cette méthode à notre plaquette de silicium de type N, implantée avec du bore et recuit dans les conditions précédemment définies (T=950°C, t=30 minutes). La jonction P⁺/N ainsi formée permet de confiner les lignes de courant dans la zone P de profondeur X_j. Cette profondeur étant bien inférieure à l'espacement S entre pointes, nous nous retrouvons donc dans les conditions ci-dessus avec X_j = e. La figure (8) donne une illustration de ce propos. Ces mesures sont très faciles à mettre en œuvre, mais ne donnent que des indications moyennes et peut précises sur l'activation des impuretés dans la couche superficielle du type P⁺. Nous les avons cependant effectuées afin d'obtenir rapidement des renseignements sur l'évolution de la résistance carrée R_□:

$$R_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot \frac{V}{I} = \frac{\rho}{x_j} \quad (16)$$

qui permet de remonter l'uniformité de la dose implantée.

b-5) Résultats obtenus

La résistivité carrée en fonction de la distance au centre de la plaquette, pour trois énergies différentes (E = 5, 25, 100 KeV), nous avons calculé les dispersions correspondantes (ρ₅ = 8 %, ρ₂₅ = 7.7 %, ρ₁₀₀ = 2.4 %). Ces valeurs sont tout à fait satisfaisantes compte tenu du type d'implanteur dont nous disposons. Elles sont conformes aux spécifications du constructeur. Notons que la dégradation de ces valeurs pour les faibles énergies est cohérente avec l'évolution de la distribution du courant ionique dans le spot. La figure (9) représente le profil de résistivité pour E = 100 KeV.

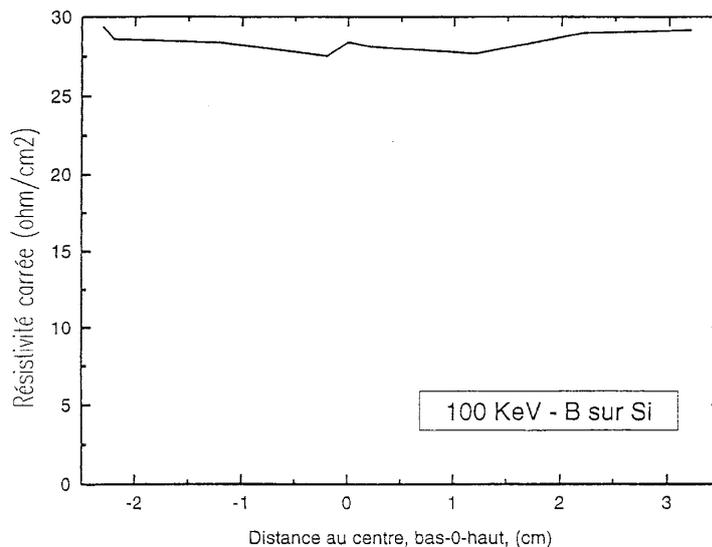


Figure (9): profil de la résistivité carrée pour E=100KeV.

2- Deuxième partie - Elaboration du matériau

a) Intérêt du GaN

Les récents progrès en épitaxie par jet moléculaire ont permis d'élaborer du GaN de grande qualité. La perspective de réaliser des composants émetteurs de lumière dans toute la gamme visible y compris le bleu, a motivé la recherche sur ce matériau. De plus, le GaN permet de produire des composants capables de supporter des hautes températures, des grandes puissances et des hautes fréquences.

b) Synthèse de GaN par implantation d'ions N⁺ dans le GaAs

Plusieurs techniques, telles que la pulvérisation réactive, la déposition par vapeur chimique, l'épitaxie par faisceau moléculaire réactif, et leurs variations, ont été utilisées pour faire croître des films minces de GaN, en variant de substrat, par exemple, le saphir et le GaAs. GaN, normalement, croît dans sa phase hexagonale stable (α -GaN) avec la structure de la Wurtzite, mais une phase cubique métastable (β -GaN) de Zinblende structure peut aussi exister dans certaines conditions de croissance [11].

Nous rapportons dans ce travail, une nouvelle technique pour produire du GaN, à savoir, la synthèse par implantation ionique d'azote dans un substrat de GaAs. Cette approche est basée sur les considérations suivantes:

1) Puisque le GaN est thermodynamiquement plus stable que le GaAs (chaleur de formation = - 109.5 et - 81.5 kJ/mol, respectivement), l'introduction d'ions N⁺ dans le GaAs doit conduire à l'échange N-As et à la formation de GaN pour des bilans thermique raisonnables.

2) Le remplacement de l'arsenic par des atomes d'azote est facilité par le fait qu'As est plus volatil que le gallium et tend à s'évaporer du GaAs pendant le recuit thermique.

3) L'implantation ionique est une technique qui permet l'introduction de quantités substantielles d'atomes N dans le GaAs, très au-delà de la limite de solubilité solide. De basses énergies (50 KeV), et des fortes doses d'ions N⁺ implantés dans le GaAs, combinés avec des traitements thermiques devraient permettre de fabriquer une phase de GaN en surface du matériau GaAs.

Afin de déterminer la dose nécessaire, nous avons simulé par IPROS (figure-10) le profil de concentration de l'azote après implantation à 50 KeV. Il ressort de ce profil que pour une dose de $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ la concentration en azote à une profondeur de 100 nm est de l'ordre de grandeur de celle de l'arsenic, ce qui est nécessaire avant recuit. Confirmation de la stœchiométrie du matériau a été apporté par les mesures de profils SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy) d'azote sur des échantillons avant recuit (figure-11).

Pour cette raison des échantillons de GaAs (001) semi-isolant ont été implantés à des fluences de $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ et $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, le courant du faisceau ionique a été de $10 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$. La recuit classique a été effectuée à 950 °C pendant 30 minutes sous un flux d'argon. Les deux échantillons à recuire sont prélevés à partir des plaquettes implantées; chacun est placé face à face dans un creuset en graphite dont le fond est tapissé de poudre de GaAs. Cette poudre permet de maintenir une suppression d'arsenic pendant le recuit et d'éviter une décomposition du GaAs.

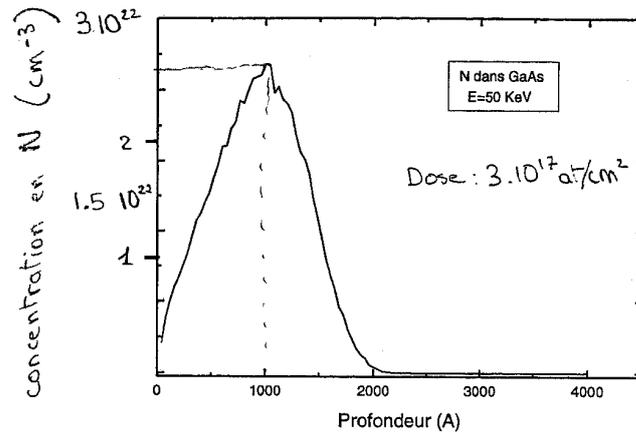


Figure (10): Simulation Mont-Carlo du profil d'azote obtenu après implantation

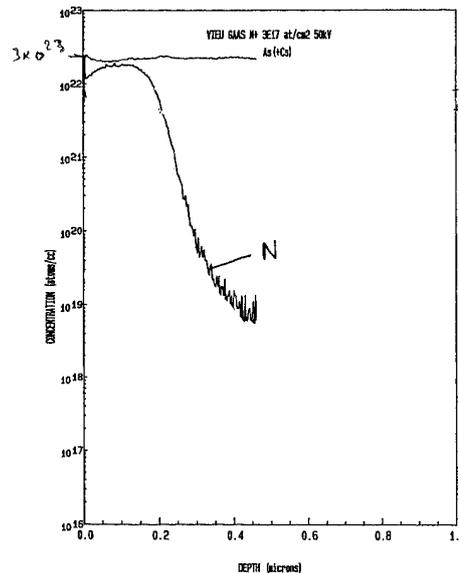


Figure (11): Profil de concentration en arsenic et en azote dans la couche après implantation

c) Caractéristiques structurales (TEM)

Les caractérisations structurales ont été menées par TEM microscopie électronique en transmission en utilisant une section transverse.

Pour une dose de $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. La figure (12) est une image en TEM montrant la couche superficielle observée après recuit à $950 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 30 mn. L'analyse en diffraction électronique montre clairement la présence de taches satellites alignées sur les taches caractéristiques du GaAs. Ces spots, caractéristiques de distances interréticulaires de 0.255 nm, sont identifiés comme provenant de la phase cubique de GaN ($a = 0.452 \text{ nm}$). On remarque la relation d'épitaxie parfaite du GaN sur GaAs. La figure (13-b) montre d'ailleurs la simulation que l'on obtient à partir de ces hypothèses.

Il est à noter que la phase que nous avons formée est la phase métastable différente de la phase hexagonale classique. Diverses solutions, notamment en jouant sur les conditions de recuit laissent penser qu'il doit être possible de fabriquer cette phase stable.

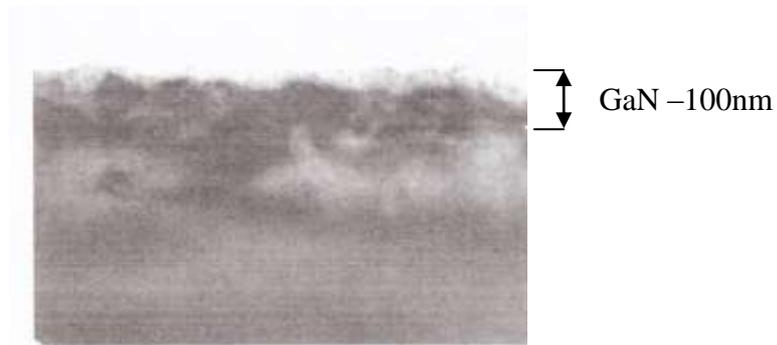


Figure (12): Image en champ clair (TEM) montrant la couche superficielle de GaN obtenue après implantation de $3 \times 10^{17} \text{ N}^+/\text{cm}^2$ à 50 keV puis recuit 950 C, 30 mn

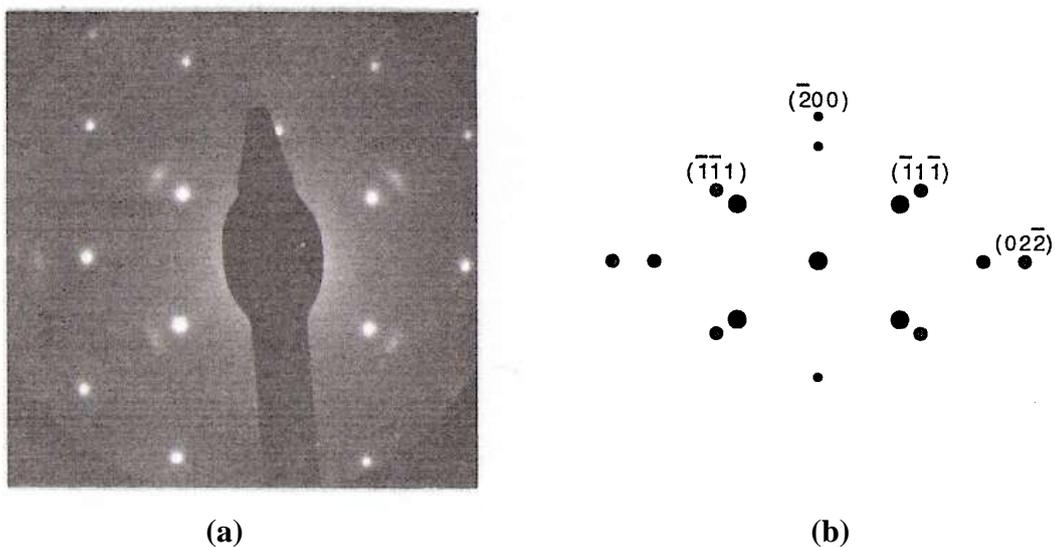


Figure (13): A gauche: Microdiffraction montrant la structure β -GaN (cubique) en épitaxie sur substrat GaAs, A droite: Simulation du diagramme expérimental

Conclusions et perspectives:

Ce travail dont une partie importante est instrumentale, nous a permis de nous initier à l'implantation ionique à travers la mise en fonctionnement, l'étalonnage puis l'utilisation de l'implanteur ionique Varian 200-20 A2F.

Il nous a tout d'abord permis de nous familiariser avec cette machine, d'en comprendre les différents éléments et leur utilité. Ainsi, nous avons pu gagner une certaine autonomie vis à vis d'un instrument complexe et délicat puisqu'il comporte du vide et des hautes tensions.

Cette connaissance étant acquise, nous avons pu nous consacrer à l'étalonnage de l'ensemble du système. L'énergie, la dose ionique et l'uniformité de l'implantation ont pu être évaluées. Les résultats se sont avérés conformes aux spécifications. Ceci nous a permis de valider la machine.

Enfin, à partir de ces premiers résultats, nous avons pu entreprendre une première synthèse de matériau GaN. Compte tenu des doses massives nécessaires à la modification de la stœchiométrie de l'arséniure de gallium, nous avons pu bénéficier de la stabilité et de la fiabilité du faisceau que nous avons précédemment mesurées.

Les caractérisations en microscopie électronique en transmission (TEM), ainsi que l'analyse ionique secondaire (SIMS) nous ont permis de confirmer la présence d'une couche cristalline de GaN épitaxiée sur GaAs.

L'étape suivante de ce travail serait d'effectuer la fabrication des couches ultra-minces en bombardant les substrats par un faisceau d'ions à très basse énergie ($E < 1 \text{ KeV}$). Cette étape requiert une grande modification de l'implanteur, à savoir la création d'un système de décélération du faisceau d'ions.

Références:

- [1] LINDHARD, J.; NIELSEN, V.; SCHARFF, M. *Approximation method in classical scattering by screened Coulomb fields*. Matematisk-fysiske Meddelelser Det K. Danske Videnskabernes Selskab, Denmark, Vol. 36, N° 10, 1968, 1-32.
- [2] LINDHARD, J.; WINTER, A. *Stopping power of electron gas and equipartition rule*. Matematisk-fysiske Meddelelser Det K. Danske Videnskabernes Selskab, Denmark, Vol. 34, N° 4, 1964, 1-22.
- [3] LINDHARD, J.; SCHARFF, M. *Energy dissipation by ions in the keV region*. Physical Review, USA, Vol. 124, issue 1, 1961, 128-130.
- [4] BIERSACK, J. P.; ZIEGLER, J. F. *Ion implantation techniques*. In: H. Ryssel and H. Glawischnig, Editors, Springer Series in Electrophysics 10, Springer-Verlag, Berlin, 1982, 171.
- [5] BRICE, D. K. *Ion implantation ranges and energy deposition distributions*. Vol. 1, High incident ion energies, IFI/Plenum, New York, 1975, 569.
- [6] TOWNSEND, P. D.; KELLY, J. C.; HARTLEY, N. E. W. *Ion Implantation, Sputtering and their Applications*. Academic Press, London, New York, 1976, 333.
- [7] RYSEL, H.; RUGE, I. *Ion Implantation*. John Wiley & Sons, New York, 1986, 350.
- [8] *Documentation de l'implanteur ionique modèle 20-DF4, Instruction manuel*. Los Angeles, California, 1978.
- [9] FAYE, M. M.; BEAUVILLAIN, J.; SALLES P.; LAANAB, L.; YAHIA MESSAOUD, A.; MARTINEZ, A.; CLAVERIE, A. *Two-dimensional damage distribution induced by ion implantation in Si under arbitrarily shaped mask edges : simulations and cross-sectional transmission electron microscopy observations*. Journal of Applied Physics, USA, Vol. 72, N° 11, 1992, 5117-5123.
- [10] FAYE, M. M.; LAANAB, L.; BEAUVILLAIN, J.; VIEU, C.; BENASSAYAG, G.; CLAVERIE, A. *Two-dimensional damage distributions induced by localized ion implantations*. In : Microcrystalline Semiconductors: Materials Science & Devices, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 283, USA, 1993, 783.
- [11] DHARA, S.; MAGUDAPATHY, P.; KESAVAMOORTHY, R.; KALAVATHI, S.; NAIR, K. G. M.; HSU, G. M.; CHEN, L.C.; CHEN, K. H.; SANTHAKUMAR, K.; SOGA, T. *Optical characterization of GaN by N+ implantation into GaAs at elevated temperature*. Applied Physics Letters, USA, Vol. 87, 261915, 2005.
- [12] NASTASI, M. A.; MAYER J. W. *Ion implantation and synthesis of materials*. 1st ed., Springer, Berlin et al., 2006, 263.
- [13] ZIEGLER, J. F. *Ion implantation: science and technology*. Ion Implantation Press, USA, 2008, 618.
- [14] ZIEGLER, J. F.; BIERSACK, J. P. *SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter*. Ion Implantation Technology, USA, 2008, 398.

