

S
2010-507
SD 396
1995
267
N° d'ordre : 1489

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

spécialité : ELECTRONIQUE

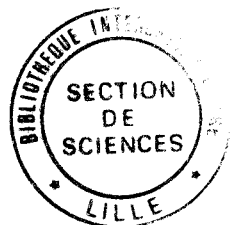
par

Nancy NG CHING HING

**REALISATION DE TRANSISTORS A EFFET DE CHAMP PAR
NEUTRALISATION DE DOPANTS PAR L'HYDROGENE
ATOMIQUE ET PAR DENEUTRALISATION
LOCALISEE DES COMPLEXES Si-H**

Soutenue le 16 février 1995 devant la commission d'examen

Membres du jury :	M. G. SALMER	Président
	M. E. CONSTANT	Directeur de thèse
	M. J. CHEVALLIER	Rapporteur
	M. R. CASTAGNE	Rapporteur
	M. J. ZIMMERMANN	Examinateur
	M. Y. CROSNIER	Examinateur
	M. J. VANBREMEERSCH	Examinateur
	M. M. CHIVE	Examinateur



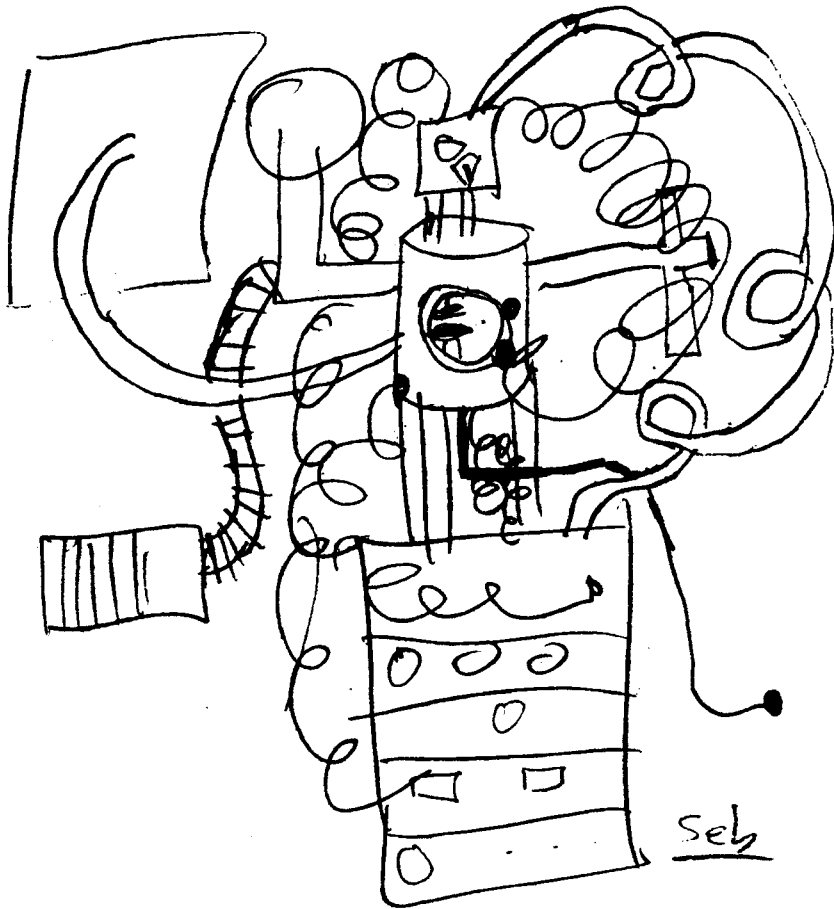


Schéma du bâti de plasma d'hydrogène

et dire qu'il a fallu que je rien serve!!!

Dancey

Remerciements

Ce travail a été effectué au Département Hyperfréquences et Semiconducteurs de l'Institut d'Electronique et de Microélectronique du Nord à l'Université des Sciences et Technologies de Lille dirigé par Monsieur le Professeur E. Constant.

Cette thèse a été réalisé sous la direction de Monsieur le Professeur E. Constant. Je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance pour les conseils et les encouragements qu'il m'a prodigués tout au long de ce travail. La très grande confiance qu'il m'a accordée ainsi que ses nombreuses taquineries m'ont beaucoup touchée.

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur G. Salmer, Directeur du Département Hyperfréquences et Semiconducteurs à l'I.E.M.N. pour m'avoir accueillie dans ce laboratoire et permis d'y effectuer mes recherches dans de bonnes conditions. Il me fait l'honneur de présider ce jury d'examen.

Une partie de ce travail n'aurait pu être réalisé sans la collaboration étroite de Monsieur J. Chevallier, Directeur du Laboratoire de Physique des Solides de Bellevue. Je le remercie vivement pour toutes les discussions fructueuses que nous avons eues ainsi que pour l'honneur qu'il me fait de juger cette thèse.

Je suis très honorée de la participation de Monsieur le Professeur R. Castagné de l'Université de Paris Sud en tant que rapporteur de ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur J. Zimmermann, Directeur de Recherches au Laboratoire de Physique des Composants à Semiconducteurs de Grenoble, sa participation à ce jury me touche beaucoup.

Je remercie également Monsieur le Professeur Y. Crosnier et Monsieur le Professeur M. Chive qui me font l'honneur de participer à la commission d'examen et de juger ce travail.

Merci à Monsieur J. Vanbremeersch, Directeur technique de l'I.E.M.N. pour sa participation à ce jury ainsi que pour l'intérêt qu'il a toujours porté à mes recherches et mes travaux technologiques.

J'adresse également mes plus vifs remerciements à l'équipe Hydrogène du CNRS de Meudon, et plus particulièrement à B. Machayekhi, qui ont contribué à la partie études fondamentales de ce travail.

Les expériences S.I.M.S. ont été réalisées par Madame A. Boutry du CNRS Meudon. Qu'elle trouve ici toute ma reconnaissance.

Je tiens à associer à ce travail le personnel de La Centrale de Technologie. Je leur témoigne toute ma gratitude pour les compétences, la patience ainsi que l'amitié qu'ils m'ont toujours accordées.

Je témoigne à Madame P. Legry toute ma reconnaissance pour m'avoir patiemment transmis une partie de son savoir-faire technologique.

J'exprime mes sincères remerciements à Madame A. Fattorini et Messieurs A. Leroy, B. Grimbert, P. Tilmant pour leur constante disponibilité, pour leurs compétences et pour leurs qualités humaines.

Merci à Messieurs M. François et M. Muller pour leur patience et pour avoir effectué les innombrables essais aux masqueur électronique. Je les remercie de m'avoir supportée durant toutes ces années.

Je remercie vivement Messieurs J. L. Lorriaux et J. L. Codron pour toutes les épitaxies qu'ils ont élaborées pour cette étude. Sans ces couches, il n'y aurait jamais eu de composants. Merci.

Je tiens à remercier Monsieur J. C. Pesant qui a conçu le bâti de plasma d'hydrogène et qui s'est occupé personnellement des analyses S.I.M.S..

J'exprime toute ma reconnaissance à Madame M. N. Bernard et Monsieur D. Vandermoère pour leur habileté et leur bonne humeur lors des découpes et des soudures.

Les composants n'auraient pu être caractérisés sans la compétence du personnel de la Centrale de Caractérisation dirigée par Monsieur E. Playez. Que Mesdames E. Delos et S. Lépilliet qui ont effectué les nombreuses caractérisations de mes transistors trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance et sympathie.

Xié-xié à Mesdames M. Miens et K. Cocardon du service DAO, pour toute l'aide apportée à la réalisation de mes transparents.

Monsieur J. P. Dehorter a assuré la reproduction de ce mémoire. Je l'en remercie.

Que S. Mézière trouve ici mes sincères remerciements pour les travaux effectués et pour nos nombreuses discussions, aussi diversifiées soient-elles.

Je remercie Monsieur P. Armant pour sa grande générosité.

Ces remerciements ne seraient pas complets si je ne remerciais pas tous les membres de l'institut avec lesquels j'ai passé des moments inoubliables.

Introduction Générale

Introduction Générale.....	2
Bibliographie.....	5

Chapitre I L'hydrogène dans le GaAs et le GaAlAs

Introduction	6
I.1. Méthodes d'incorporation d'hydrogène dans les semiconducteurs.....	7
I.1.1. Incorporation non intentionnelle de l'hydrogène	7
I.1.2. Les méthodes les plus couramment utilisées.....	7
I.1.2.1. Par implantation ionique	7
I.1.2.2. Par électrochimie	8
I.1.2.3. Par plasma	8
I.2. La neutralisation par l'hydrogène	9
I.2.1. Le GaAs dopé Si de type n	9
I.2.2. L' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ dopé Si de type n.....	10
I.2.2.1. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ avec $x < 0,22$	11
I.2.2.2. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ avec $x > 0,22$	12
I.2.3. Le mécanisme de diffusion de l'hydrogène.....	12
I.2.3.1. Dans du GaAs et AlGaAs non dopés.....	16
I.2.3.2. Dans du GaAs et AlGaAs dopés	16
I.2.3.3. Diffusion de l'hydrogène dans le GaAs soumis à une pression hydrostatique	17
I.2.3.4. Etude d'exodiffusion dans du GaAs:Si.....	19
I.3. Les défauts de surface créés par le plasma d'hydrogène.....	20
I.3.1. Définition des surfaces de références.....	21
I.3.2. Etudes des effets du plasma d'hydrogène sur du GaAs	21
I.3.2.1. Estimation de la zone perturbée	22
I.3.2.2. Les effets de gravure.....	22
I.3.2.3. Réactivité d'une couche hydrogénée.....	23

I.3.3. Conclusion	24
Conclusion	25
Bibliographie.....	26

Chapitre II

Etudes de l'hydrogénation pour des couches de faibles épaisseurs

Introduction	30
II.1. La neutralisation	31
II.1.1. Le bâti de plasma radiofréquence.....	31
II.1.1.1. Description d'une manipulation type de plasma direct.....	33
II.1.2. Les études préliminaires	34
II.1.2.1. Les dégâts superficiels causés par le plasma d'hydrogène.....	36
II.1.2.2. Caractéristiques électriques des couches hydrogénées.....	38
II.1.2.3. Recherche de la température idéale d'exposition au plasma.....	40
II.1.2.4. Extension de nos études aux couches épitaxiées en GaAlAs.....	42
II.2. La déneutralisation.....	42
II.2.1. La réactivation thermique.....	43
II.2.1.1. Définition de la concentration de complexes et du taux de complexation	44
II.2.1.2. Evolution du taux de complexes en fonction de la température.....	45
II.2.1.3. Calcul de l'énergie de dissociation des complexes et estimation de la "durée de vie" de composants réalisés à partir de couches hydrogénées	48
II.2.2. Réactivation par exposition aux U.V.	49
II.2.3. L'influence du faisceau d'électrons	51
Conclusion	53
Bibliographie.....	54

Chapitre III

Réalisation et caractérisation des transistors à effet de champ hydrogénés

Introduction	56
III.1. Réalisation de MESFET classiques ou hydrogénés ?	57
III.1.1. Le procédé classiquement utilisé pour la réalisation de MESFET.....	57
III.1.2. Les principaux inconvénients présentés par la structure réalisée par les procédés classiques.....	58
III.1.3. Définition d'une structure quasi idéale réalisable en utilisant la neutralisation par hydrogénation	60
III.2. Les procédés généraux utilisés dans la réalisation des HTECS.....	63
III.2.1. Caractéristiques des couches utilisées.....	63
III.2.2. Description succincte des différents procédés utilisés.....	64
III.2.3. Le choix des paramètres d'hydrogénation	66
III.2.3.1. La puissance de plasma.	66
III.2.3.2. La température de l'échantillon.	66
III.2.3.3. Le temps d'exposition.....	67
III.3. Premières réalisations de transistors hydrogénés.....	67
III.3.1. Transistor hydrogéné "planar" non optimisé sur couche semiconductrice unique de 0,2 μm (op608).....	67
III.3.1.1. Elaboration de la couche active.	68
III.3.1.2. Performances des transistors de l'op608.....	68
III.3.2. Transistor hydrogéné non optimisé sur couche semiconductrice unique de 0,2 μm avec recess (op614).....	70
III.4. Réalisation de transistors hydrogénés par déneutralisation localisée.....	71
III.4.1. Transistor hydrogéné à grille submicronique réalisé sur couche de faible épaisseur (op695)	71
III.4.1.1. Réalisation de la couche active	72
III.4.1.2. Description des résultats obtenus avec l'exposition aux U.V.	73
III.4.2. Réalisation du transistor hydrogéné à résistances d'accès dissymétriques par exposition aux U.V. (op759).....	76
III.4.2.1. Détail de la réalisation	77

III.4.2.2. Performances des transistors à résistances d'accès dissymétriques (op759).....	77
III.4.2.3. Etude de bruit généré par le composant	78
III.4.3. Fabrication de transistors hydrogénés avec une grille de largeur 0,1 μm à résistances d'accès dissymétriques (op773).....	79
III.4.3.1. Exposition aux U. V.....	80
III.4.3.2. Réactivation par faisceau d'électrons.....	81
III.5. Premier essai de réalisation de HIGFET par procédé d'hydrogénation	82
III.5.1. Procédé de réalisation du HIGFET hydrogéné.....	83
III.5.2. Performances des HIGFET hydrogénés.....	84
Conclusion	85
Bibliographie.....	86

Conclusion Générale

Conclusion Générale.....	87
--------------------------	----

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Un besoin accru dans le domaine du traitement de l'information, du stockage et de la transmission des données incite un nombre croissant de chercheurs et d'ingénieurs à concevoir et à fabriquer des composants de plus en plus rapides, donc fonctionnant à des fréquences de plus en plus élevées. Le transistor à effet de champ est le composant répondant à ces critères. Il convient tout particulièrement dans le domaine des hyperfréquences, notamment lorsqu'il est réalisé à partir de matériaux de la famille des III-V, par exemple l'Arséniure de Gallium.

Le transistor à effet de champ à barrière Schottky (MESFET) réalisé sur l'Arséniure de Gallium peut être élaboré suivant deux méthodes distinctes : la technologie MESA et la technologie "planar". La première utilise une couche épitaxiée et les composants sont isolés par attaque chimique des couches actives. La seconde technologie est basée sur la technique d'implantation ionique pour réaliser la couche active. Ces deux techniques de fabrication possèdent chacune leurs propres avantages et inconvénients, d'où l'intérêt de mettre au point une nouvelle technologie conciliant les avantages de ces deux méthodes.

Dans cette perspective, nous proposons d'utiliser les effets de la neutralisation par l'hydrogène pour réaliser des transistors. En effet, des études ont montré que l'introduction de l'hydrogène dans du GaAs dopé silicium de type n provoquait des modifications des caractéristiques électriques du matériau [1, 2]. Par exemple, lorsque l'hydrogène diffuse dans du GaAs dopé Si de type n, il y a formation d'un complexe neutre associant l'hydrogène avec l'atome donneur constitué par le silicium, et l'activité électrique de ce dernier est alors neutralisée. Il en résulte une diminution de la concentration en porteurs libres ainsi qu'une augmentation de la mobilité liée à la décroissance des interactions entre électrons et impuretés ionisées. L'objectif de notre travail est d'étudier de façon approfondie dans quelle mesure ces phénomènes peuvent être utilisés dans la fabrication de composants à effet de champ.

Une première étude a déjà été réalisée par Nathalie Caglio dans le cadre de sa thèse [3]. Elle a permis d'obtenir un certain nombre de résultats encourageants et

d'identifier les principaux problèmes rencontrés [4, 5]. Cependant des travaux récents effectués en particulier par le Laboratoire de Physique des Solides de Bellevue [6, 7] ont permis de mieux comprendre les mécanismes de neutralisation et les phénomènes physiques mis en jeu dans du GaAs et dans l'AlGaAs. La connaissance de ces effets, et plus récemment la mise en évidence des possibilités offertes par la réactivation des zones hydrogénées sous l'effet d'une exposition aux ultraviolets [8] ou à un faisceau d'électrons, offrent de nouvelles possibilités de réalisation de composants performants. C'est ce que nous nous proposons d'étudier dans cette thèse.

Au préalable, un certain nombre d'études élémentaires s'avérait cependant nécessaires avant d'aborder la fabrication de composants. En effet, les recherches de base effectuées sur des épitaxies GaAs et AlGaAs hydrogénées sont généralement réalisées sur des couches épitaxiées épaisses ou sur du matériau massif. Par contre, peu d'études ont été réalisées sur des couches de faibles épaisseurs et il était donc indispensable d'entreprendre des études fondamentales sur des épitaxies ayant des structures et des caractéristiques proches ou identiques à celles des transistors à effet de champ. Par ailleurs, l'utilisation des possibilités offertes par la réactivation localisée des complexes Si-H par exposition aux ultraviolets ou à un faisceau d'électrons nécessitait également une étude préalable des phénomènes nouveaux mis en jeu. L'introduction de ces nouveaux procédés ne s'avérait possible que dans la mesure où ils étaient compatibles avec l'ensemble du processus de fabrication de composants. Un ensemble de travaux importants devait donc être réalisé pour étudier tous ces problèmes et pour pouvoir se prononcer, à la lumière de réalisations pratiques de composants, sur la possibilité du procédé "hydrogénation".

Le travail présenté dans ce mémoire a pour but de répondre à ces différentes questions et à ces différents objectifs. Il s'articule de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous nous proposons de dresser l'état des connaissances actuelles sur les phénomènes liés à une introduction douce d'hydrogène dans du GaAs et de l'AlGaAs dopé Si de type n. Ces études ont été effectuées en majeure partie par les laboratoires CNRS de Bellevue dans le cadre d'une collaboration avec notre institut soutenue par la DRET. Elles ont permis de déterminer le niveau d'énergie de l'hydrogène dans le GaAs et l'AlGaAs faiblement dopés silicium [9].

Dans le deuxième chapitre, nous développerons les études préliminaires que nous avons effectuées sur des matériaux GaAs et AlGaAs ayant de faibles épaisseurs

de couche active afin d'adapter ce procédé dans les étapes d'élaboration des transistors. Ces études ont permis de définir les conditions optimales d'hydrogénation par plasma pour les couches destinées à la réalisation de transistors et de mettre au point les différentes techniques de déneutralisation par recuit thermique et par exposition aux rayonnements U.V. ou au faisceau d'électrons.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les différents procédés d'élaboration de MESFETs utilisant l'hydrogénation et mettant en oeuvre les techniques d'ajustement de caractéristiques de la couche active par déneutralisation. Nous donnerons pour chaque procédé utilisé les caractéristiques statiques et hyperfréquences obtenues pour les transistors. Nous présenterons également dans ce chapitre les performances de HIGFET hydrogénés réalisés en utilisant la technologie de neutralisation et de déneutralisation développée pour les MESFETs hydrogénés.

Enfin, nous concluons en présentant les différentes perspectives de l'hydrogénation pour la réalisation de composants et aussi les limites d'application de ces différents procédés.

BIBLIOGRAPHIE

1. J. Chevallier, W. C. Dautremont-Smith, C. W. Tu et S. J. Pearton, 'Donor neutralisation in GaAs(Si) by atomic hydrogen', *Appl. Phys. Lett.*, **47**, (4), pp. 108-110, 1985
2. S. J. Pearton, W. C. Dautremont-Smith, J. Chevallier, C. W. Tu et K. D. Cummings, 'Hydrogenation of shallow-donor levels in GaAs', *J. Appl. Phys.*, **59**, (8), pp. 2821-2827, 1986
3. N. Caglio, 'Réalisation de transistors à effet de champ en GaAs par la neutralisation des donneurs légers par hydrogène atomique'. Thèse de docteur, Lille, 1989
4. E. Constant, N. Caglio, J. Chevallier et J. C. Pesant, 'Fabrication of a new type of field effect transistor using neutralisation of shallow donors by atomic hydrogen in *n*-GaAs (Si)', *Electron. Lett.*, **23**, pp. 841-843, 1987
5. N. Caglio, E. Constant, J. C. Pesant et J. Chevallier, 'Hydrogen solubility in *n*-type silicon doped GaAs and its effects on the material electronic quality', *J. Appl. Phys.*, **69**, (3), pp. 1345-1349, 1991
6. J. Chevallier, B. Machayekhi, C. Grattepain, R. Rahbi et B. Theys, 'Diffusion and electronic states of hydrogen in *n*-GaAs and *n*-AlGaAs', *Phys. Rev. B*, **45**, (15), pp. 8803-8806, 1992
7. J. Chevallier, B. Machayekhi, C. Grattepain, R. Rahbi et B. Theys, 'Diffusion of hydrogen and hydrogen-dopant interactions in Si doped GaAs and AlGaAs alloys', *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **262**, p. 461, 1992
8. A. W. R. Leitch, Th. Prescha et J. Weber, 'Light-enhanced reactivation of donors in hydrogenated *n*-type GaAs', *Phys. Rev. B*, **44**, (11), pp. 14400-14403, 1991
9. B. Machayekhi, R. Rahbi, B. Theys, M. Miloche et J. Chevallier, 'Position of the hydrogen acceptor level in *n*-GaAs and *n*-AlGaAs:Si deduced from hydrogen diffusion modelling', *Mat. Science Forum*, Vols. 143-147, p. 951, 1994

CHAPITRE I

L'Hydrogène dans le GaAs et le AlGaAs

INTRODUCTION

Les effets de l'hydrogène dans les semiconducteurs sont nombreux. Citons notamment la passivation des défauts, des impuretés, des centres profonds et des centres peu profonds. Ces effets sont d'autant plus intéressants qu'ils s'accompagnent généralement d'une modification des caractéristiques électriques du matériau. Prenons le cas de l'arséniure de gallium de type n dopé silicium ; après exposition à un plasma d'hydrogène, la concentration en porteurs libres diminue et la mobilité et la résistance augmentent. C'est en 1984 que Chevallier et al [1] ont observé ce phénomène pour la première fois dans du GaAs:Si de type n épitaxié. Pour expliquer ceci, ils ont émis l'hypothèse de la formation d'un complexe neutre hydrogène-donneur. Depuis, des études en spectroscopie en infrarouge ont mis en évidence la formation de ce complexe [2] et les études se sont étendues vers d'autres matériaux III-V, tel que l'AlGaAs.

Nous présenterons donc dans ce premier chapitre l'état actuel des connaissances sur les propriétés de l'hydrogène essentiellement dans le GaAs et l'AlGaAs de type n. Pour cela, nous développerons les travaux entrepris au Laboratoire de Physique des Solides de Bellevue en collaboration avec le D.H.S.. Nous situerons ces études par rapport aux travaux entrepris par d'autres laboratoires travaillant sur l'hydrogénation des matériaux III-V.

I.1. METHODES D'INCORPORATION D'HYDROGENE DANS LES SEMICONDUCTEURS.

I.1.1. Incorporation non intentionnelle de l'hydrogène

S'il existe plusieurs techniques pour introduire de l'hydrogène dans un matériau semiconducteur, il n'est pas rare que le semiconducteur soit contaminé par l'hydrogène lors de son passage de la matière brute au composant. Les divers procédés utilisés pour réaliser un substrat semiconducteur peuvent contaminer le matériau en hydrogène. Par exemple, certaines techniques de croissance de matériau massif introduisent de façon non intentionnelle de l'hydrogène dans le substrat, telle que la croissance de silicium par la technique de la zone flottante sous atmosphère d'hydrogène ou la croissance de l'arséniure de gallium par la méthode de Czochralski. Il arrive aussi que l'hydrogène s'introduise involontairement pendant la croissance des épitaxies [3], comme lors de la croissance des couches InP de type p par MOVPE (Metal Organic Vapour Phase Epitaxy). De la même façon, pendant la fabrication des composants, le matériau semiconducteur est soumis à diverses atmosphères, certaines d'entre elles contenant de l'hydrogène sous sa forme atomique ou ionique pouvant alors contaminer le matériau. L'incorporation involontaire de l'hydrogène peut ainsi se faire lors d'un nettoyage de la plaquette par un plasma méthane/hydrogène [4] ou lors du recuit des contacts ohmiques sous atmosphère azote/hydrogène ou bien encore lors d'un dépôt de nitrure de silicium. Ces contaminations par hydrogène peuvent parfois influencer sur les performances des composants [5, 6].

I.1.2. Les méthodes les plus couramment utilisées

I.1.2.1. *Par implantation ionique*

Cette technique introduit les impuretés dans le matériau semiconducteur par bombardement ionique du matériau avec un faisceau de particules ionisées à des énergies allant de 20 keV à 1 MeV et les doses typiquement utilisées sont de 10^{12} à 10^{14} at.cm⁻². Pour introduire des protons [7] on peut utiliser soit, de l'hydrogène soit du deutérium et les ions présents sont alors : H⁺ et D⁺. Généralement l'implantation de ces ions se fait à température ambiante. Ce procédé permet une implantation très localisée et de plus, par cette méthode, on connaît bien le profil de diffusion correspondant à la dose d'ions que l'on a implantée. Il faut noter qu'à cause de l'énergie

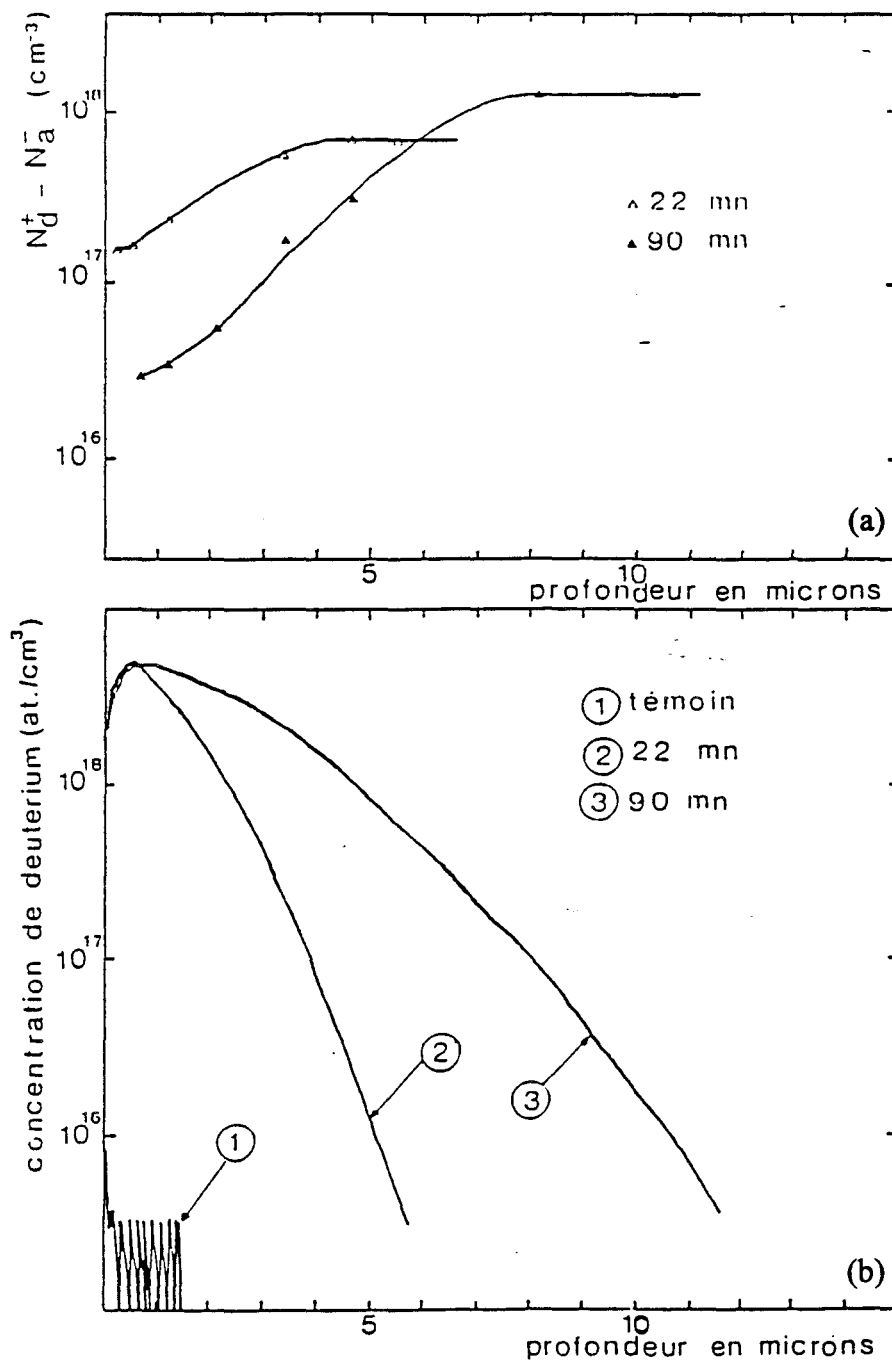


Figure I.1 : Evolution des profils de concentration (a) en impuretés ionisées déterminés par C(V) et (b) en deutérium obtenus par SIMS dans deux échantillons de GaAs:Si (n) deutéré [11].
 Echantillon massif dopé à 10^{18} at./cm^3 .
 Plasma : 30 W, 225°C, 22 et 90 mn.

élevée utilisée pour implanter les ions, on provoque une dégradation du matériau très importante en surface et un recuit thermique (300°C à 900°C) est alors nécessaire pour réorganiser la maille cristalline, et donc ainsi "guérir" le matériau de ses défauts. Malheureusement, celui-ci a pour effet de faire diffuser l'hydrogène et donc de modifier le profil d'implantation. L'implantation protonique est généralement utilisée pour isoler les composants entre eux.

1.1.2.2. Par électrochimie

La technique électrochimique est une méthode très douce pour incorporer de l'hydrogène dans le matériau. Cette méthode a déjà été utilisée pour introduire de l'hydrogène dans du GaAs:Si. Ce dernier est polarisé cathodiquement dans une solution d'acide phosphorique et l'anode utilisée est une électrode en carbone [1]. Ce procédé d'hydrogénation ne convient pas à tous les types de matériaux puisqu'en fonction de la réactivité chimique de l'hydrogène avec le matériau la dégradation de surface sera plus ou moins importante. Par exemple, l'InP est un matériau instable dans un milieu aqueux riche en hydrogène et lors de l'hydrogénation, sa surface se décompose et des gouttes d'indium y apparaissent. Cette méthode ne peut donc pas être utilisée pour tous les matériaux semiconducteurs.

1.1.2.3. Par plasma

Le plasma est la méthode la plus couramment utilisée pour incorporer de l'hydrogène dans les matériaux semiconducteurs. Il existe plusieurs types de plasmas [8] qui peuvent être utilisés : courant continu, basse fréquence, radiofréquence, microonde et multipolaire. De plus, deux techniques d'exposition au plasma sont possibles. La première façon de faire est de placer le matériau directement dans le plasma alors que dans la seconde méthode, le matériau est placé en dehors de la décharge. Ces positions sont respectivement appelées exposition directe et exposition en post-décharge. Par ce procédé, le volume et la profondeur d'hydrogène diffusant dans le semiconducteur sont régis par les paramètres suivants : la densité de puissance du plasma, la température de l'échantillon, la pression du gaz, la durée de l'exposition et le type d'exposition au plasma (directe ou post-décharge). L'inconvénient de cette technique d'hydrogénation est qu'elle cause des dégâts en surface du matériau [9, 10] et

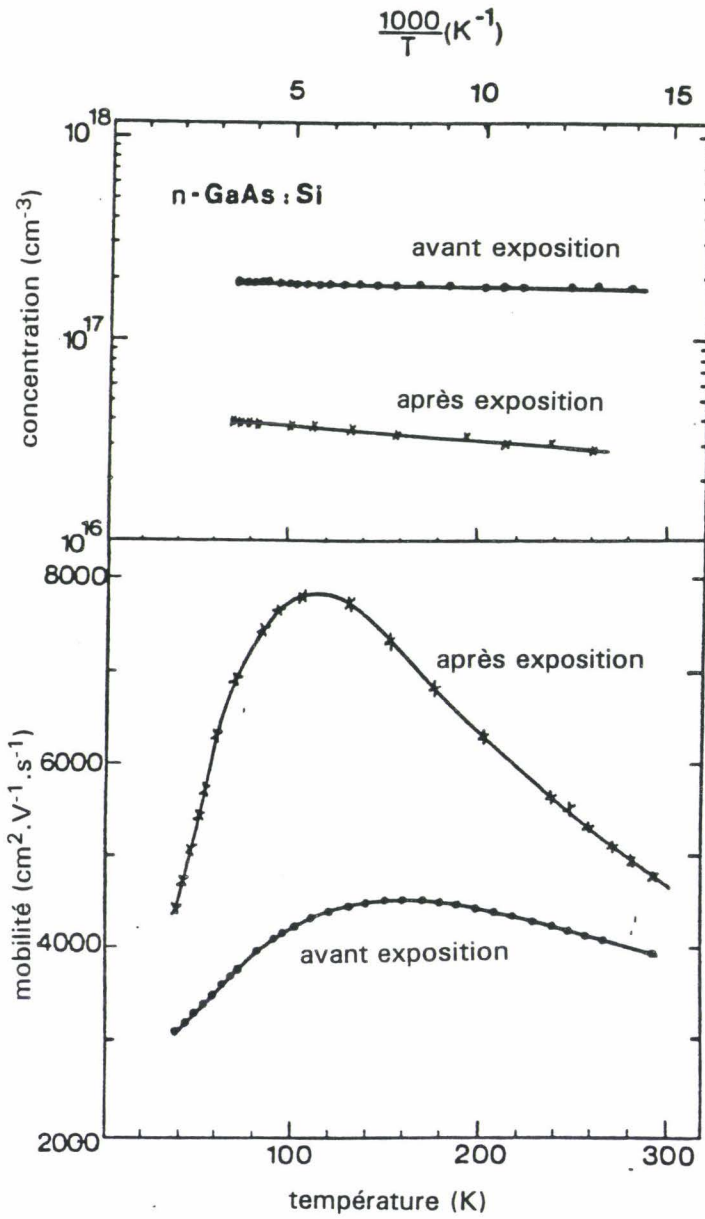


Figure I.2 : Evolution de la concentration en impuretés ionisées et de la mobilité en fonction de la température pour un échantillon de GaAs:Si (n) avant et après hydrogénation [17].
 Echantillon dopé à $2 \cdot 10^{17}$ at.cm⁻³
 Plasma : 40 W, 250°C, 90 mn.

que la concentration et les types de défauts créés sont dépendants des conditions d'exposition au plasma utilisées.

I.2. LA NEUTRALISATION PAR L'HYDROGENE

I.2.1. Le GaAs dopé Si de type n

Beaucoup de travaux ont été consacrés aux phénomènes observés dans le semiconducteur le plus "usuel" : un cristal de silicium. Cependant, compte tenu des objectifs de ce travail, nous ne décrivons que les résultats obtenus et les phénomènes observés et identifiés en nous limitant au cas des semiconducteur III-V. Parmi les matériaux III-V, le GaAs est le matériau semiconducteur dans lequel les phénomènes dus à une introduction volontaire ou involontaire d'hydrogène ont été les plus étudiés. Il a été démontré que l'exposition d'un échantillon de GaAs dopé Si de type n à un plasma d'hydrogène ou de deutérium avait pour effet de modifier les caractéristiques électriques du matériau. Des analyses de SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy) ont permis de mettre en évidence les mécanismes de diffusion dans le GaAs:Si (n). Dans ce type d'expérience, on utilise un plasma de deutérium (figure I.1) de façon à augmenter la sensibilité de détection lors des analyses. En effet, il y a toujours présence d'hydrogène résiduel dans le bâti d'analyse, ce qui a pour effet de provoquer un signal de fond important et donc de fausser les résultats si on travaille avec de l'hydrogène. La diffusion de l'hydrogène ou du deutérium dans le GaAs:Si (n) s'accompagne d'une diminution de la concentration en porteurs libres. Ceci a été observé par des mesures de $C(V)$ (figure I.1). On constate pour un matériau hydrogéné une diminution de la concentration en porteurs libres sur une profondeur correspondant à la profondeur de diffusion de l'hydrogène. Ces observations ont été confirmées par des mesures d'effet Hall qui mettent en évidence la diminution de la concentration en porteurs libres et l'augmentation de la mobilité (figure I.2). Cette augmentation de la mobilité du GaAs:Si hydrogéné permet de supposer qu'il ne s'agit pas d'un phénomène de compensation et Chevallier et al [1] ont alors émis l'hypothèse que ces modifications seraient dues à la formation d'un complexe neutre associant le donneur et l'hydrogène.

Afin de vérifier cette hypothèse, des études de spectroscopie d'absorption infrarouge ont été effectuées [2, 11, 12, 13]. L'analyse des échantillons de GaAs:Si (n) hydrogénés révèlent deux raies situées à 896 cm^{-1} et à 1717 cm^{-1} (figure I.3.a) et pour

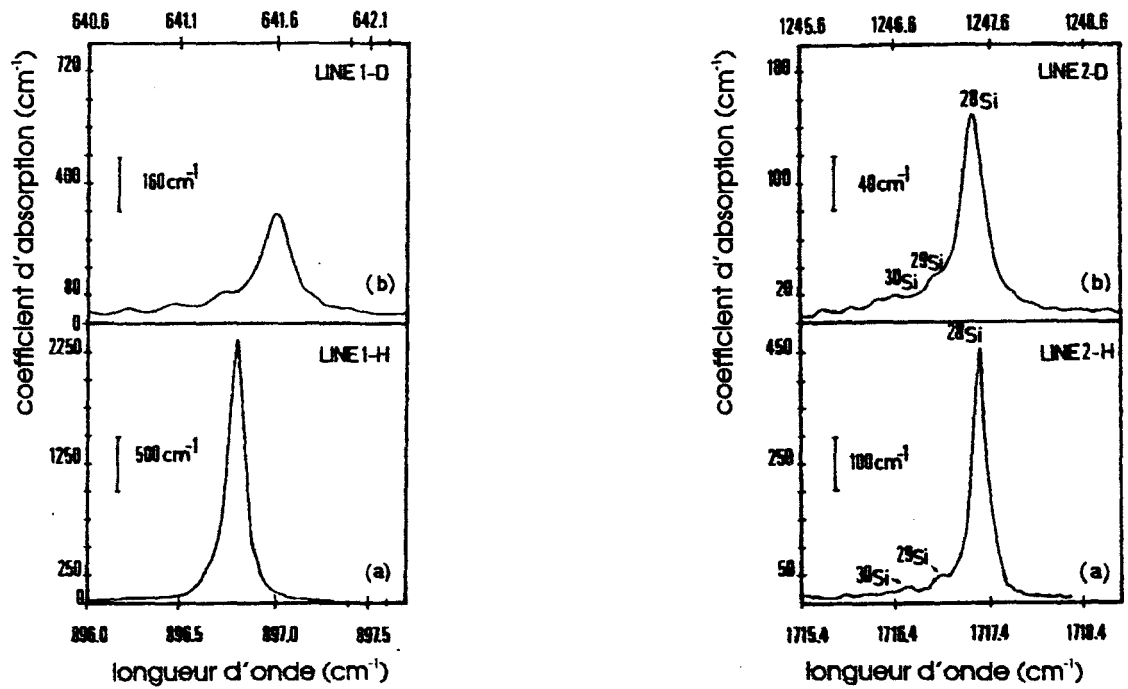


Figure I.3 : Spectres d'absorption obtenus pour une couche de GaAs dopée silicium de type n (a) hydrogénée et (b) deutérée [13]. GaAs dopé Si à $4 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³.

des échantillons exposés à un plasma de deutérium, les raies se trouvent à 641 cm^{-1} et à 1247 cm^{-1} (figure I.3.b). Ces deux raies sont attribuées respectivement au mode de vibration transversal et longitudinal de l'hydrogène et du deutérium. Remarquons que les raies présentes dans un matériau deutéré se trouvent déplacées par rapport à celles du matériau hydrogéné. Par ailleurs, on constate que le rapport (v_H/v_D) entre chaque mode est proche de $\sqrt{2}$, ce qui correspond à la racine carrée du rapport des masses deutérium/hydrogène. Par contre, lors de l'analyse d'échantillons de GaAs non dopés mais hydrogénés, on constate que ces raies ne sont pas présentes. On peut donc en déduire que ces raies associées à la présence de l'hydrogène ou à son isotope dans le GaAs n'existent qu'en présence d'atomes donneurs (Si) dans la matrice. Une analyse plus approfondie des spectres d'échantillons de GaAs:Si dopés hydrogénés permet de constater la quasi-disparition de la raie associée au silicium présent comme donneur dans la matrice et qui se situe à 384 cm^{-1} . L'étude de ces divers spectres effectuée sur des échantillons de GaAs hydrogénés dopés et non dopés permet de conclure que la disparition de la raie liée aux atomes donneurs et l'apparition de nouvelles raies liées à la présence de l'hydrogène ou du deutérium dans la matrice, sont la conséquence d'un seul et même phénomène : la présence d'un complexe neutre Si-H.

La neutralisation des donneurs légers dans le GaAs:Si n'est pas le seul phénomène provoqué par l'hydrogénation, car d'autres états tels que les centres profonds sont aussi neutralisés et ceci de façon assez conséquente, et qu'ils ne sont réactivés qu'à partir de 600°C . Ceci a été observé en spectroscopie de centres profonds par la technique DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) [14, 15].

I.2.2. L' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ dopé Si de type n

Dans ce matériau, les propriétés de transport électronique sont gouvernées par les états donneurs profonds et peu profonds du silicium. L'activité de ces états est liée au pourcentage d'aluminium présent dans le matériau. Pour un taux d'aluminium inférieur à 22 % la conduction dans l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ résulte de l'ionisation des niveaux donneurs peu profonds alors que pour des valeurs de x supérieures à 22 % les donneurs prédominants sont constitués par les défauts profonds nommés centres DX. Les effets de l'hydrogène dans l'AlGaAs vont donc dépendre de sa teneur en aluminium.

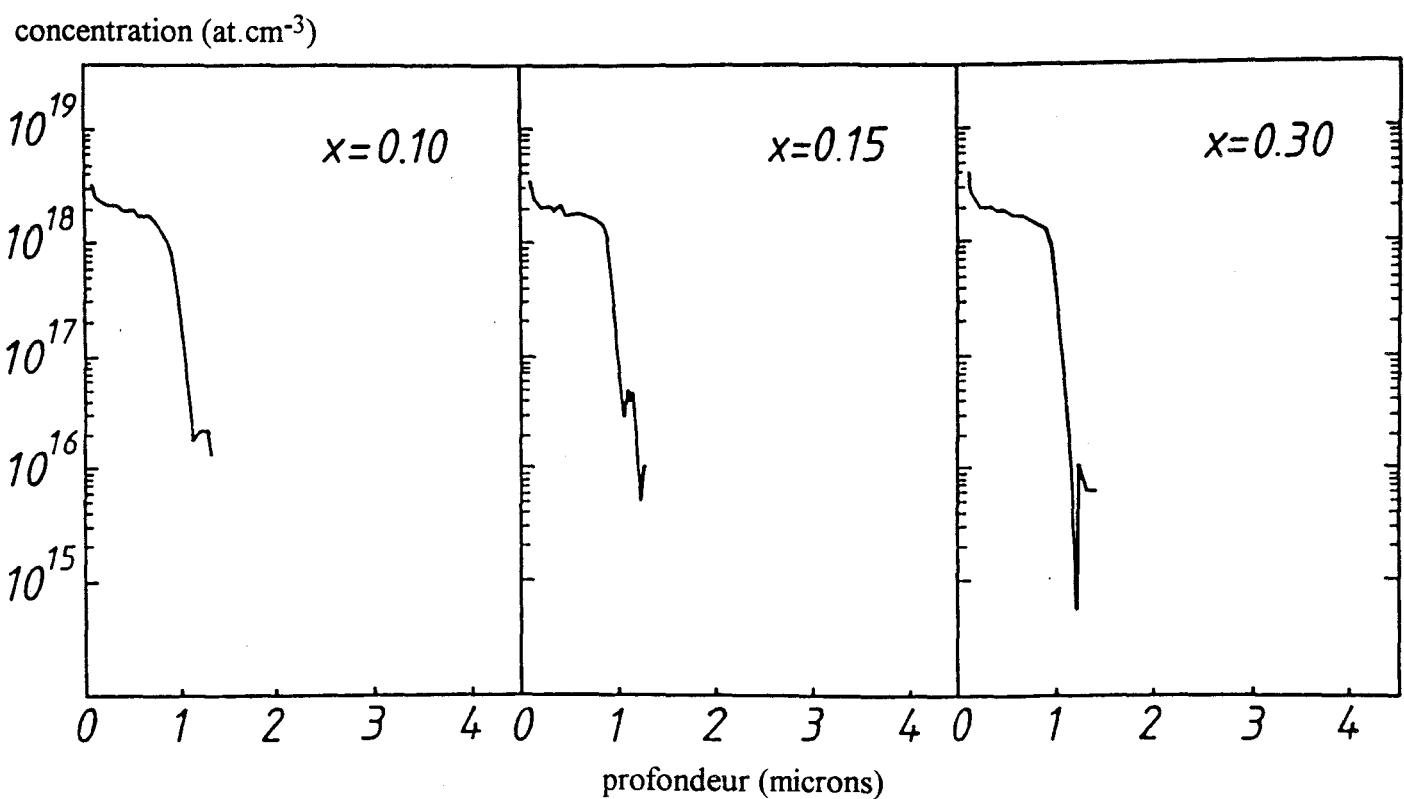
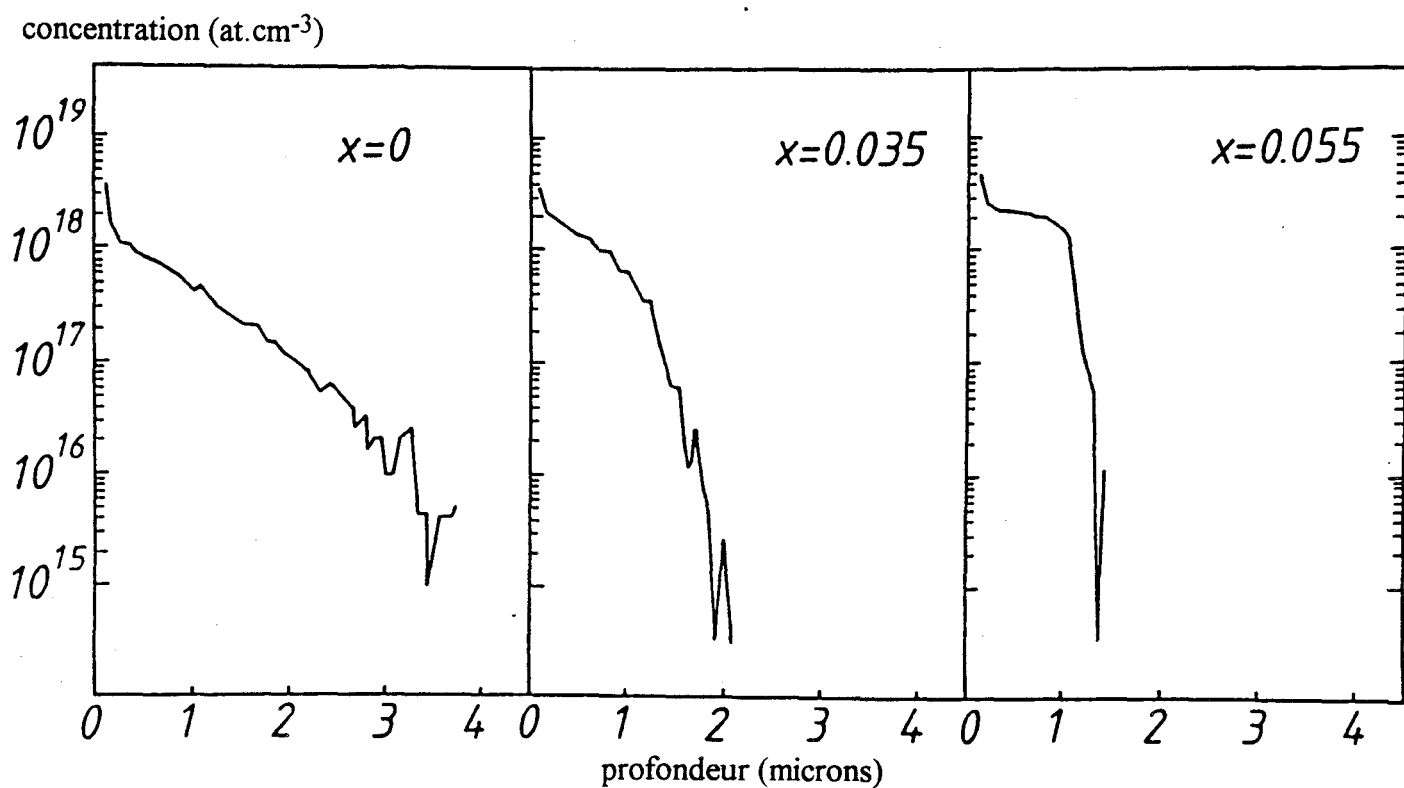


Figure I.4 : Profils de diffusion de deutérium obtenus par analyse SIMS dans du GaAs et pour des échantillons de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ayant différentes concentrations en aluminium [28].

Dopage : $1,5 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³.

Plasma : 10 W, 240°C, 30 mn.

I.2.2.1. $Al_xGa_{1-x}As$ avec $x < 0,22$

Dans de l' $Al_xGa_{1-x}As$ dopé Si de type n ayant des taux d'aluminium inférieurs à 22 %, le transport électronique est régi, comme dans le cas du GaAs:Si (n), par les donneurs peu profonds. On peut donc supposer que si l'on expose un échantillon de AlGaAs:Si (n) à faible teneur en aluminium à un plasma d'hydrogène, on doit observer les mêmes phénomènes que dans du GaAs:Si (n) hydrogéné. Des analyses de SIMS effectuées sur des échantillons deutérés [16] avec des taux d'aluminium différents ($x = 0,035$; 0,055 et 0,10) montrent que le deutérium diffuse dans le matériau (figure I.4). On note que les profils de diffusion évoluent progressivement en fonction de la teneur en aluminium. Le profil n'est plus une fonction d'erreur complémentaire (erfc) comme celle observée dans du GaAs:Si (n) mais présente un plateau suivi d'une décroissance rapide de la concentration d'hydrogène au-delà d'une composition en aluminium supérieure à 0,055. Pour toutes les compositions de AlGaAs étudiées se trouvant au-dessus de cette valeur critique, les profils sont similaires. Pour la composition de $x = 0,035$ on note que la situation est intermédiaire (figure I.4). Le tableau I résume les valeurs de mobilités et de concentrations en impuretés obtenues par des mesures d'effet Hall effectuées sur des trèfles d'AlGaAs avant et après une exposition à un plasma d'hydrogène. Ces résultats mettent en évidence la diminution de la concentration en porteurs libres ainsi qu'une augmentation de la mobilité due à l'hydrogénation du matériau. Ces phénomènes ont été mis en évidence en 1988 par Mostefaoui et al qui ont conclu qu'ils étaient liés à la formation d'un complexe neutre donneur-hydrogène [17] comme dans le cas du GaAs:Si hydrogéné.

		Pourcentage en Aluminium		
		3,6 %	5,5 %	9,8 %
avant plasma	N_{Hall}	$1,7 \times 10^{18}$	$2,5 \times 10^{18}$	$2,4 \times 10^{18}$
	μ_{Hall}	1869	1542	1460
après plasma	N_{Hall}	$1,2 \times 10^{17}$	$1,1 \times 10^{17}$	$9,3 \times 10^{17}$
	μ_{Hall}	2987	2873	2725

Tableau I : Caractéristiques électriques des épitaxies de AlGaAs (Si) avant et après hydrogénation.
Plasma : 20 W, 220°C, 6 heures.

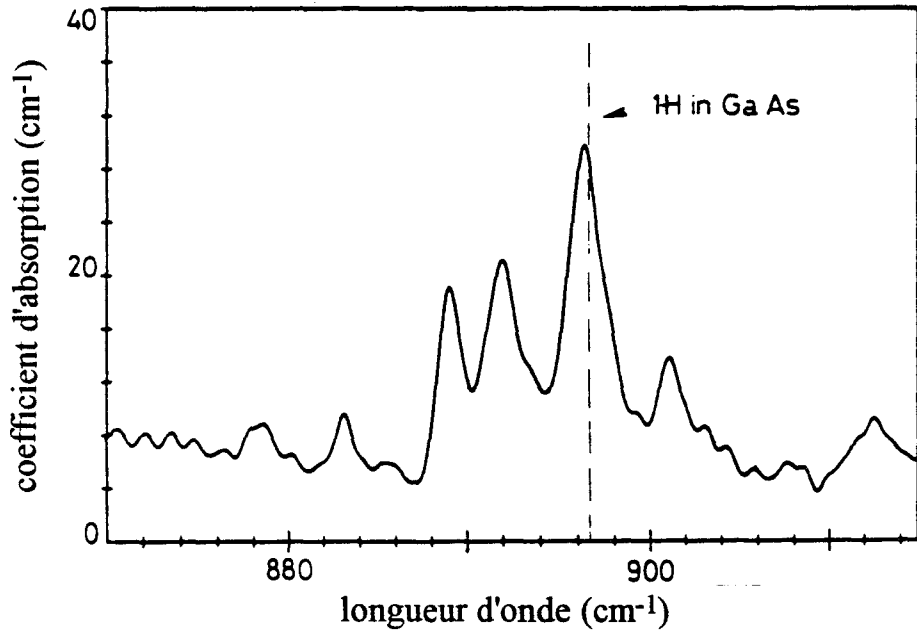


Figure I.5 : Spectre d'absorption obtenu pour un échantillon de $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ dopé silicium et hydrogéné [12].

signal DLTS (unités arbitraires)

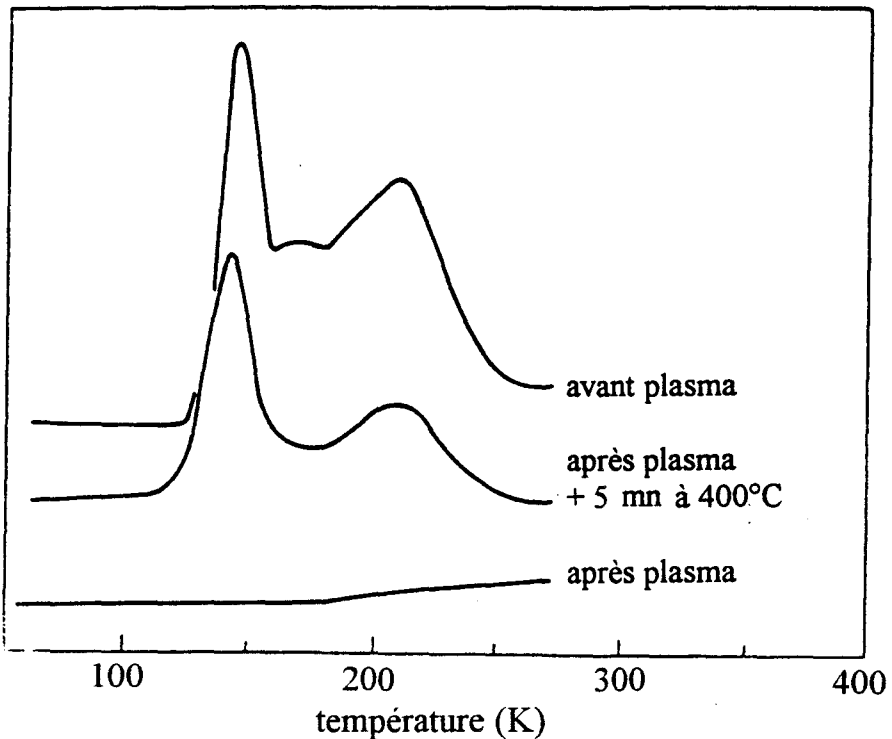


Figure I.6 : Mise en évidence par mesure de DLTS de la passivation des centres DX [18] dans un échantillon de $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}:\text{Si}$ hydrogéné.

Plasma : $0,08 \text{ W.cm}^{-2}$, 250°C , 30 mn.

Comme pour le GaAs:Si, la formation du complexe Si-H dans l'AlGaAs:Si a été mise en évidence par spectroscopie d'absorption infrarouge. Le spectre d'absorption d'un échantillon $Al_{0,2}Ga_{0,8}As:Si$ (n) hydrogéné est représenté dans la figure I.5. On remarque que le spectre se compose d'une raie majeure située à 896 cm^{-1} entourée de cinq raies satellites [12]. En comparant ce spectre avec celui d'un échantillon de GaAs:Si (n) hydrogéné, on constate que l'une des deux raies associées à la présence de l'hydrogène dans le GaAs hydrogéné se trouve dans l'AlGaAs hydrogéné à la même fréquence. Mais dans le cas de l'AlGaAs, la raie associée à la présence de l'hydrogène dans sa matrice est plus étalée et il y a en plus apparition de cinq raies satellites. Ces dernières sont attribuées aux différentes configurations des atomes d'aluminium qui sont les premiers atomes voisins du complexe Si-H.

1.2.2.2. $Al_xGa_{1-x}As$ avec $x > 0,22$

Lors de l'exposition à un plasma d'hydrogène de AlGaAs riche en aluminium, on assiste à la neutralisation des donneurs peu profonds et aussi à la neutralisation des centres DX [17]. La neutralisation des centres profonds a été observée en spectroscopie des centres profonds par la méthode DLTS sur un alliage contenant 30 % d'aluminium. Les analyses ont été effectuées sur un échantillon avant hydrogénation et après hydrogénation, et aussi sur un échantillon hydrogéné suivi ou non d'un recuit. Les spectres de DLTS obtenus sont représentés dans la figure I.6. On observe que la raie associée aux centres DX disparaît complètement après l'exposition au plasma d'hydrogène et qu'elle réapparaît quand l'échantillon est recuit à 400°C pendant 5 minutes. Les centres DX sont donc aussi neutralisés par l'hydrogène et peuvent être réactivés par recuit thermique [18].

1.2.3. Le mécanisme de diffusion de l'hydrogène

Pour approfondir les connaissances sur les mécanismes de diffusion et de neutralisation de l'hydrogène dans le GaAs et l'AlGaAs dopé Si de type n, plusieurs auteurs ont cherché à déterminer l'énergie de liaison des complexes Si-H [19-25]. La loi régissant la diffusion de l'hydrogène dans le GaAs serait en effet un outil très précieux pour optimiser la réalisation des composants utilisant les phénomènes d'hydrogénation.

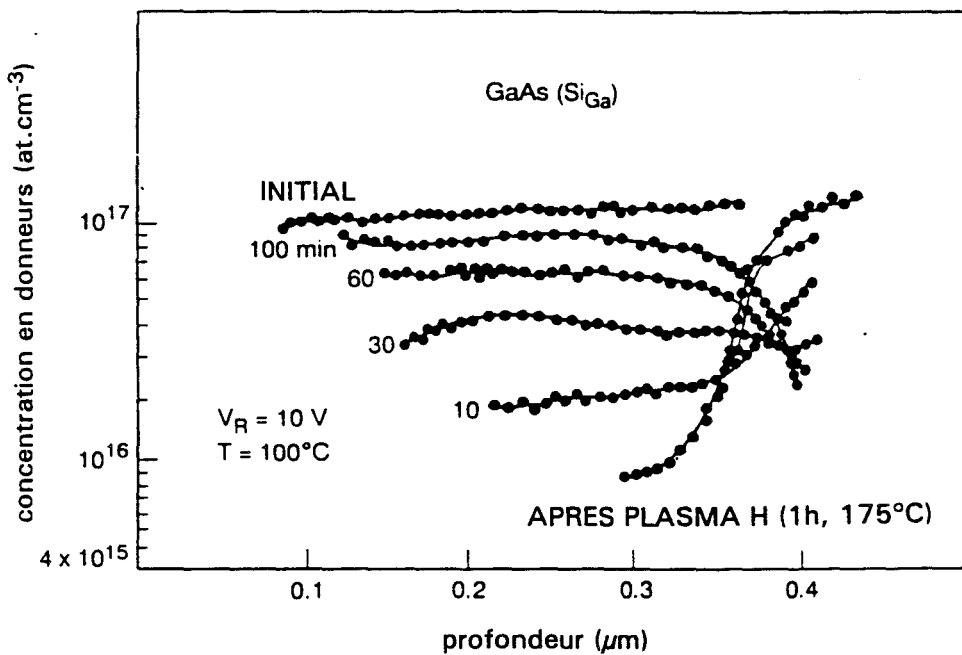


Figure I.7 : Profils de concentration de silicium dans un échantillon de GaAs:Si hydrogéné et recuit sous champ à 100°C [23].
 Dopage initial : 10^{17} at.cm⁻³.
 Plasma : 0,08 W.cm⁻², 175°C, 60 mn, 30 Torr.
 Tension de polarisation : 10 V.

Les premiers travaux effectués par Chevallier et al [1] ont montré que la dissociation des complexes hydrogène-dopant dans le GaAs:Si est de premier ordre et qu'elle est régie par :

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\nu t \frac{-E_D}{kT}\right)$$

où

- $\frac{N}{N_0}$: taux de complexes restant après recuit ;
- E_D : énergie d'activation des complexes Si-H ;
- t : temps de recuit ;
- T : température de recuit ;
- ν : fréquence de dissociation.

La détermination de l'énergie de dissociation des complexes par la méthode des recuits isothermes et des recuits isochrones d'échantillons GaAs:Si hydrogénés a donné pour E_D et ν des valeurs de 2,1 eV et 10^{14} s^{-1} respectivement [19]. Depuis ces travaux, d'autres auteurs [20-23] ont entrepris de déterminer E_D en utilisant la méthode des recuits thermiques sous champ électrique d'une diode Schottky polarisée en inverse. On trouve donc dans la littérature des valeurs de E_D allant de 1,2 à 2,1 eV [23, 24]. Ces études de recuit sous champ ont permis de mettre en évidence la dérive des atomes d'hydrogène hors de la région à champ élevé sous son état H^- (figure I.7).

L'énergie de dissociation du complexe Si-H est la somme de l'énergie de liaison (c.-à-d. celle requise pour séparer les ions hydrogène des dopants) et de l'énergie de migration des espèces H ainsi libérées. Il n'est donc pas facile de déterminer exactement la valeur de l'énergie de liaison Si-H.

Des travaux similaires ont été menés sur l'AlGaAs pour déterminer l'énergie de réactivation des complexes Si-H et pour comprendre le mécanisme de complexation des centres DX avec l'hydrogène. Il est très difficile de déterminer l'énergie d'activation de Si-H dans le cas du GaAs ; pour l'AlGaAs, une difficulté supplémentaire est liée à la présence des centres DX qui se complexent avec l'hydrogène. Des études entreprises sur des échantillons de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0,23$ et $x = 0,26$) ont permis de déterminer par

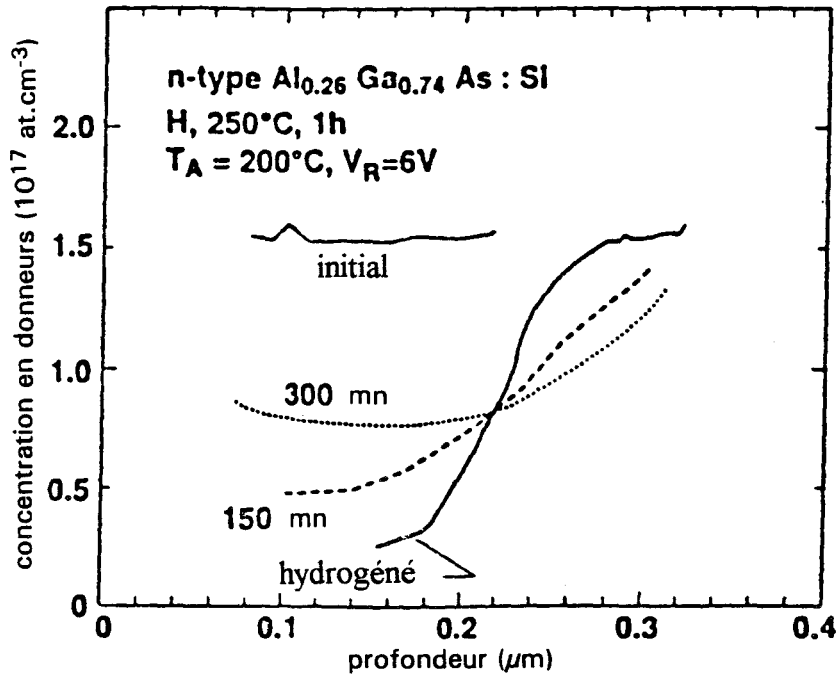


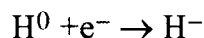
Figure I.8 : Profils de concentration de silicium pour un échantillon $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{As}$ hydrogéné et recuit sous champ à 200°C [27].
 Dopage : $1,5 \cdot 10^{18}$ at. cm^{-3} .
 Plasma micro-onde et position post-décharge : 250°C , 60 mn.
 Tension de polarisation : 6 V.

la technique de recuit sous champ (reverse biased Schottky diode) une énergie de dissociation du complexe Si-H de 1,18 eV et pour DX_{Si}-H une valeur de 1,15 eV. Chang et al [26] ont réalisé un modèle de simulation pour la neutralisation des donneurs Si et des centres DX dans l'AlGaAs. Ils ont conclu que le taux d'aluminium dans le matériau avait peu d'influence sur l'énergie de dissociation des complexes (Si-H et DX_{Si}-H) et que ceux-ci se comportent de façon similaire et ont une énergie de dissociation quasi identique. Ces hypothèses ont été confirmées par des études expérimentales effectuées par Roos et al [27] qui aboutissent à la même conclusion. Ils ont constaté que dans l'AlGaAs:Si (n) hydrogéné soumis à un recuit sous champ électrique, l'hydrogène diffuse essentiellement sous son état H⁻ (figure I.8).

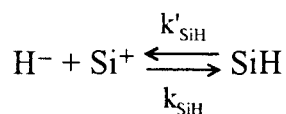
Dans le cadre de notre collaboration avec le Laboratoire de Physique des Solides de Bellevue, une étude comparative entre simulation et expérience a été entreprise, pour déterminer l'état énergétique de l'hydrogène dans le GaAs et l'AlGaAs dopés silicium de type n. L'équipe de Bellevue s'est donc consacrée à la recherche du niveau donneur de l'hydrogène [28], en modélisant la diffusion de l'hydrogène dans le GaAs et l'AlGaAs dopés Si (n) en se basant sur des profils de diffusion obtenus expérimentalement. Le modèle utilisé est celui développé par D. Mathiot [29]. Ce modèle est actuellement considéré comme étant le plus complet compte tenu de l'état actuel des connaissances sur l'hydrogène dans les matériaux semiconducteurs. Ce modèle a déjà été utilisé pour modéliser les profils de diffusion dans le GaAs de type p et dans le Si de type n et p.

Cette modélisation est possible compte tenu de l'état des connaissances sur la diffusion de l'hydrogène dans le GaAs et l'AlGaAs dopés Si (n). Il est maintenant admis que l'hydrogène diffuse sous son état H⁻ dans le GaAs et l'AlGaAs dopés Si (n) et l'existence de complexes permet d'établir le mécanisme de formation des complexes Si-H. Ce mécanisme de neutralisation par hydrogène se fait en deux étapes :

La compensation des donneurs silicium par les accepteurs hydrogène :



La formation du complexe :



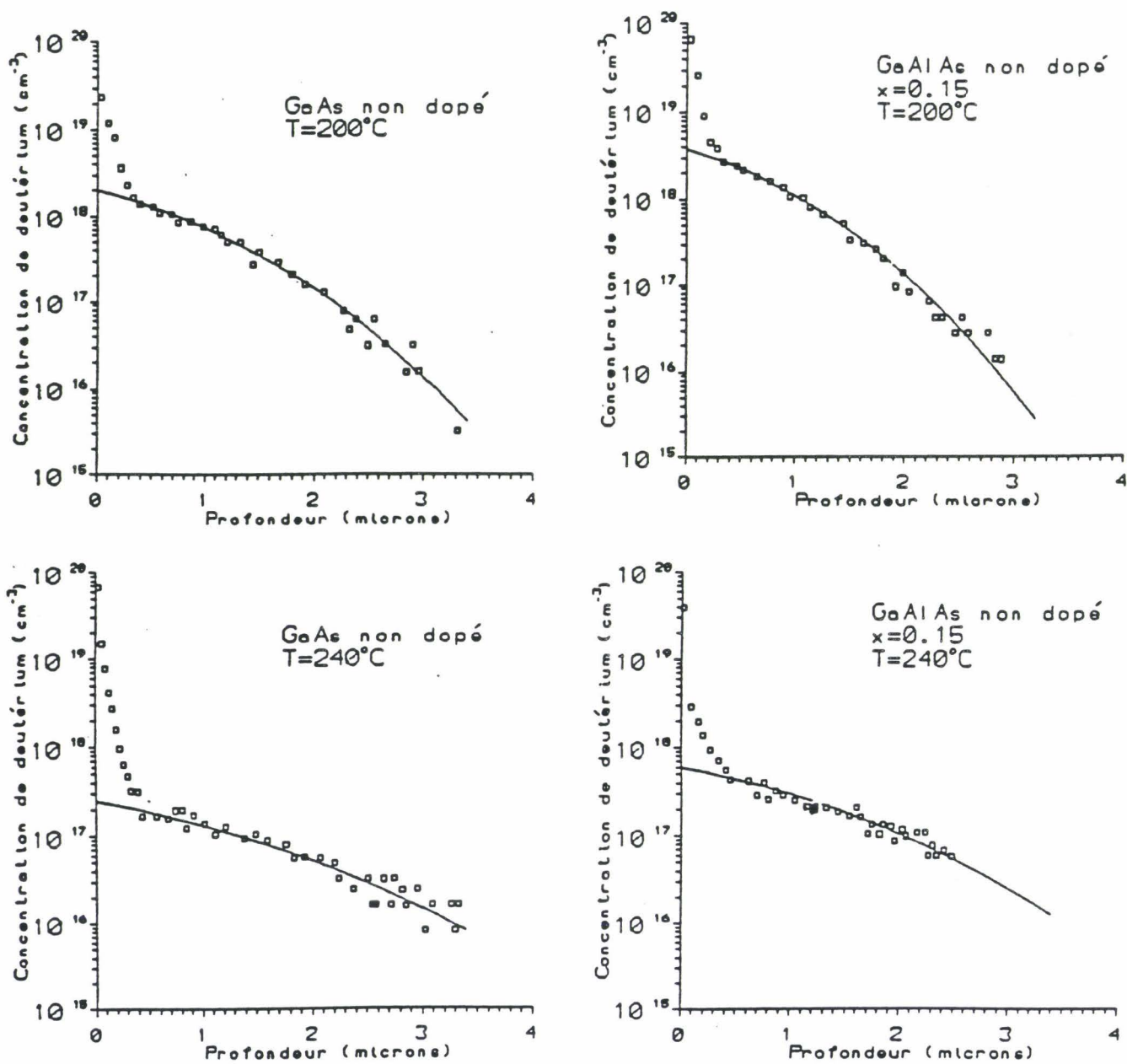


Figure I.9 : Comparaison théorie-expérience des profils de diffusion de deutérium dans des échantillons de GaAs et $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ non dopés pour deux températures différentes (200°C et 240°C) [28].
 — courbe calculée à partir d'une fonction d'ercf.
 □ points expérimentaux.

Le modèle utilisé prend en compte :

- l'existence d'un niveau accepteur (E_a) associé à la présence de l'hydrogène dans la bande interdite du GaAs et de l'AlGaAs ;
- le fait que l'hydrogène puisse diffuser sous deux états de charge différents : l'état neutre H^0 et l'état chargé négativement H^- [30]. La proportion des deux espèces est donnée par l'expression :

$$\frac{[H^-]}{[H^0]} = \exp\left(\frac{(E_f - E_a)}{kT}\right)$$

où

- E_a : niveau accepteur de l'hydrogène ;
 - E_f : niveau de Fermi ;
 - k : constante de Boltzmann ;
 - T : température absolue.
- la possibilité de piégeage de l'hydrogène par un donneur par interaction coulombienne ;
 - la possibilité de formation de molécules d'hydrogène H_2 pendant la diffusion ;
 - la possibilité de piégeage de l'hydrogène par les défauts de surface créés par le plasma.

Les équations de diffusion prennent en compte la diffusion des différentes espèces H^0 et H^- par la loi de Fick. Pour les espèces chargées, le modèle tient compte de leur entraînement par le champ électrique interne dû au gradient des porteurs libres. Ce modèle a été développé pour l'étude de matériaux non dégénérés à la température de diffusion, et les équations de Poisson et de diffusion sont résolues par la méthode itérative de Newton.

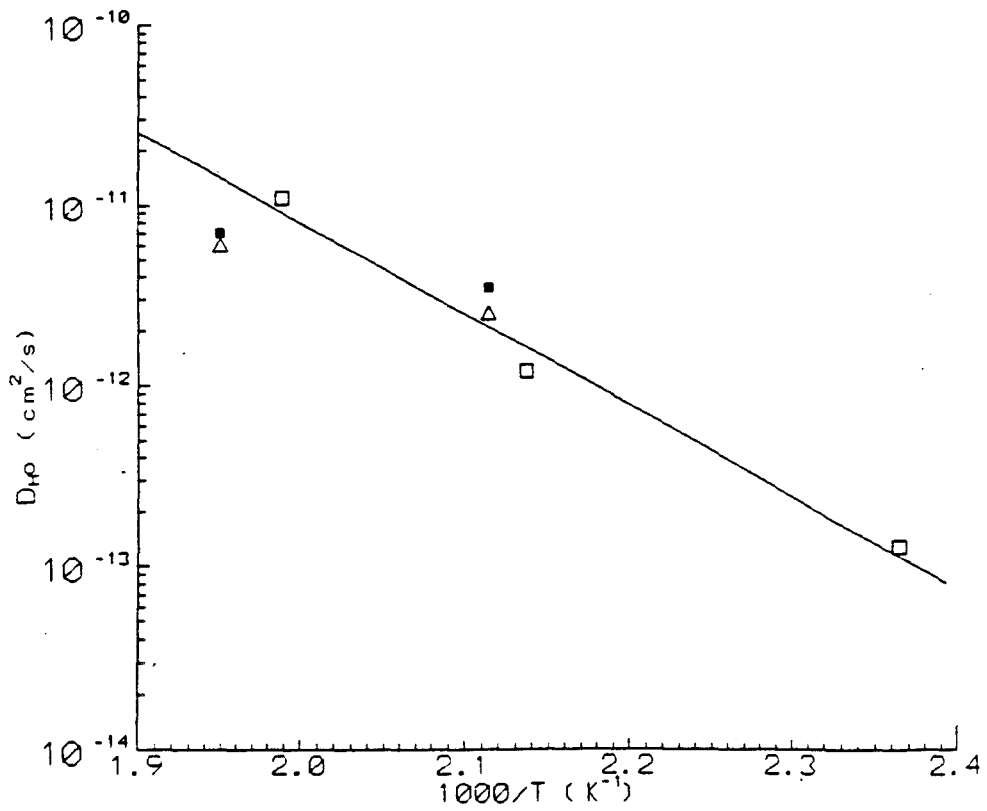


Figure I.10 : Variation du coefficient de diffusion (DH^0) de l'espèce H^0 dans du GaAs et $Al_{0,15}Ga_{0,85}As$ non dopé en fonction de l'inverse de la température.

- GaAs non dopé [31]
- GaAs non dopé [28]
- △ AlGaAs non dopé [28]

1.2.3.1. Dans du GaAs et AlGaAs non dopés

Dans les matériaux GaAs et AlGaAs non dopés, on admet que l'hydrogène diffuse principalement sous sa forme neutre H^0 . Un bon accord entre simulation et expérience des profils de diffusion d'hydrogène a été obtenu par une fonction erreur complémentaire (figure I.9) et ceci en négligeant la formation de molécules d'hydrogène au cours de la diffusion. En effet, quand on introduit ce terme, on tend à aplanir les profils de diffusion et ceux-ci ne correspondent plus aux profils expérimentaux.

A partir de ces simulations, des valeurs du coefficient de diffusion (DH^0) de H^0 dans le GaAs et l'AlGaAs ont été obtenues pour deux températures différentes (figure I.10). On constate que la valeur du coefficient de diffusion de H^0 pour l'AlGaAs non dopé est proche de celui trouvé dans le GaAs. Il faut aussi noter que ces valeurs sont proches de celles obtenues par la simulation de la diffusion dans le GaAs type p [31].

Le modèle a été aussi utilisé pour simuler la présence, observée sur les profils de diffusion, d'une accumulation de deutérium à la surface du matériau semiconducteur hydrogéné. Par l'observation des divers profils de diffusion obtenus par analyse SIMS, on sait que les conditions d'hydrogénation influent sur cette exaltation. La modélisation de cette perturbation a été ajustée de façon satisfaisante en admettant que l'hydrogène interagit avec les défauts en surface provoqués par le plasma [9, 10]. Grâce au modèle de simulation développé pour du GaAs type p, on sait que pour les conditions de plasma utilisées la diffusion du deutérium en volume est peu affectée par les zones perturbées en surface.

1.2.3.2. Dans du GaAs et AlGaAs dopés

Pour la simulation des matériaux semiconducteurs dopés, les valeurs de $DH^0(T)$ utilisées sont celles déterminées lors de la simulation des matériaux semiconducteurs non dopés. Les valeurs de la constante de dissociation $k'_{SiH}(T)$ ont été déterminées à partir des données obtenues lors d'une étude de détermination de E_D par Pearton et al [23]. Dans ces recherches, ils ont évalué la cinétique de réactivation des dopants silicium par la méthode de recuit sous champ électrique et ont ainsi obtenu

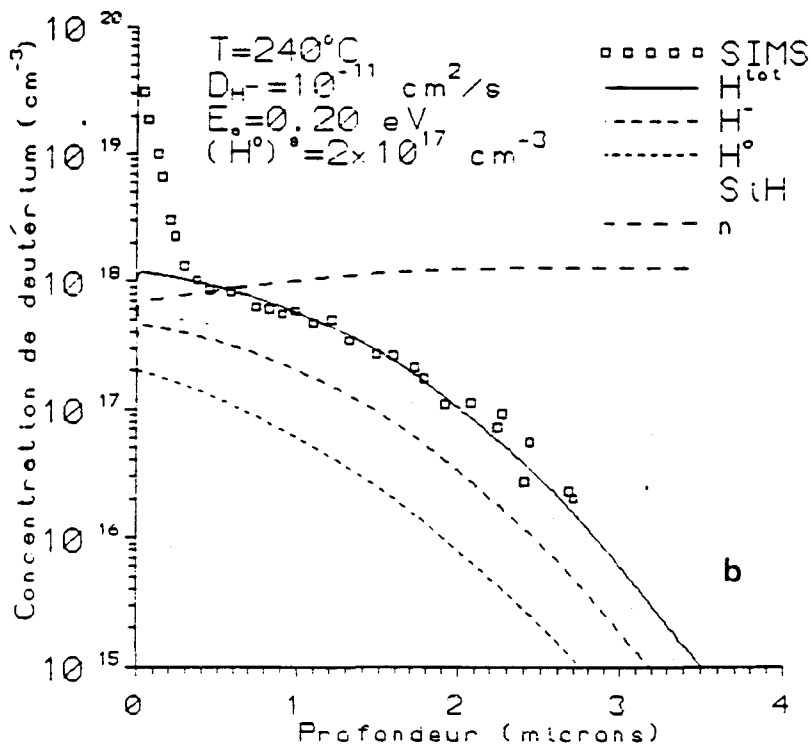
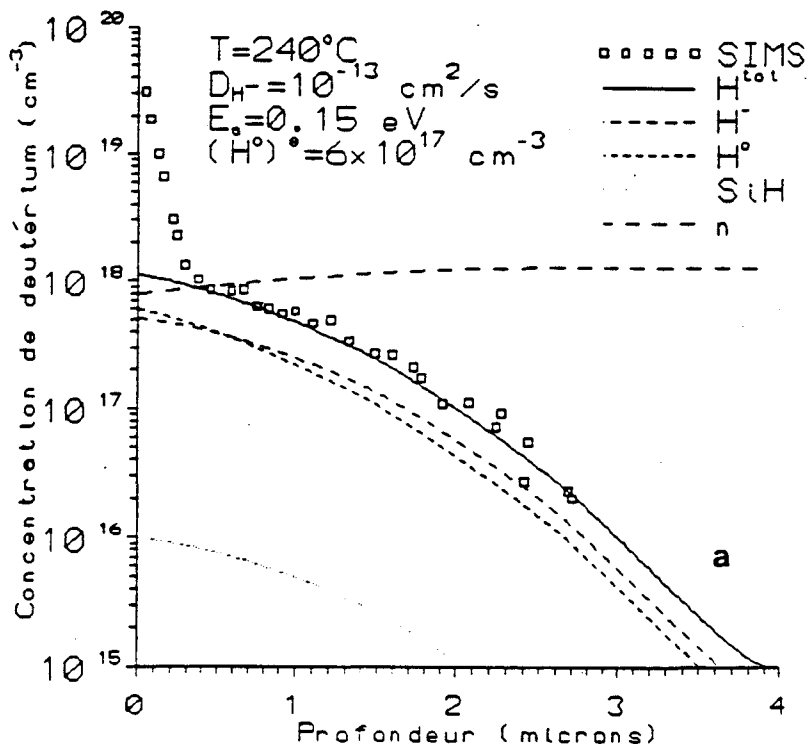


Figure I.11 : Simulation des profils de diffusion de deutérium dans du GaAs:Si (n) deutéré pour deux couples de valeurs de E_a et DH^- [28].

GaAs dopé Si à $1,3 \cdot 10^{18} \text{ at. cm}^{-3}$.

Plasma : 10 W, 240°C, 30 mn.

— courbe théorique.

□ points expérimentaux.

$DH^0 = 2,2 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

$k_{SiH} = 20,5 \text{ s}^{-1}$.

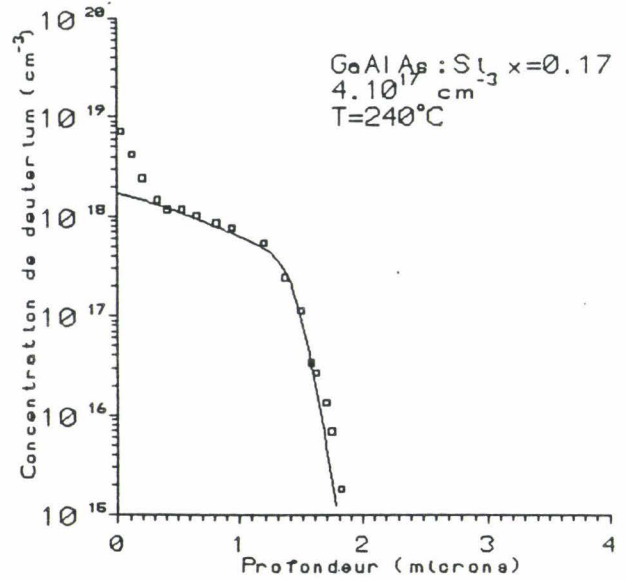
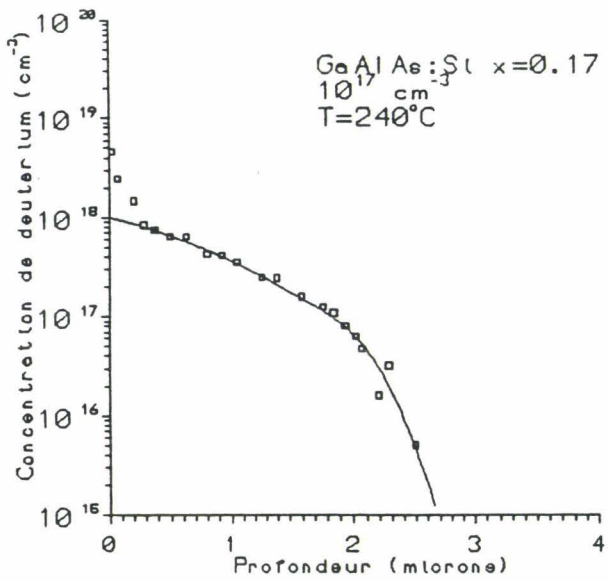


Figure I.12.a : Simulation des profils de diffusion de deutérium [28] dans deux échantillons $\text{Al}_{0,17}\text{Ga}_{0,83}\text{As}$ dopé Si à 10^{17} et 4.10^{17} at.cm^{-3} .

— courbe théorique.
 □ points expérimentaux.
 Plasma : 10 W, 240°C , 30 mn.

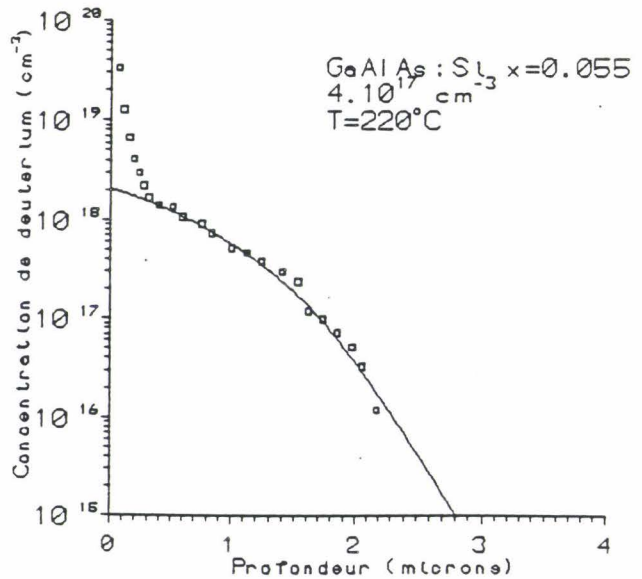
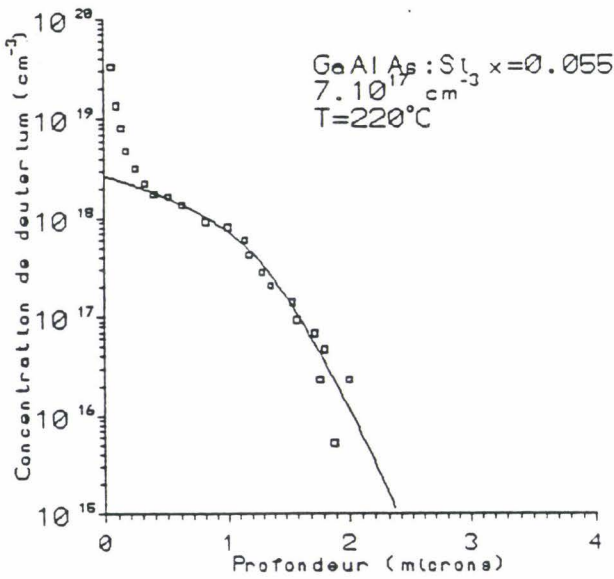


Figure I.12.b : Simulation des profils de diffusion de deutérium dans deux échantillons AlGaAs ($x = 0,055$) dopé Si à 4.10^{17} et 7.10^{17} at.cm^{-3} [28].

— courbe théorique.
 □ points expérimentaux.
 Plasma : 10 W, 220°C , 30 mn.

une valeur de E_D de 1,25 eV et pour ν une valeur de 2.10^{13} s^{-1} pour les complexes Si-H dans du GaAs:Si (n).

Ces travaux de modélisation des profils de diffusion de deutérium dans le GaAs:Si (n) montrent que la forme des profils est indépendante de la température de diffusion et du taux de dopage en silicium présent dans le matériau. Il s'avère donc très difficile de déterminer les valeurs exactes de E_a et D_{H^-} . Les figures I.11 représentent les meilleures comparaisons théorie-expérience des profils obtenus pour deux couples de E_a et D_{H^-} différents.

Le programme a été utilisé pour modéliser les profils de diffusion dans de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ pour différentes compositions en aluminium ($x = 0,055 ; 0,17 ; 0,29$). Les comparaisons théorie-expérience des profils de diffusion sont données dans les figures I.12.a et I.12.b. L'ensemble des profils de diffusion simulés permet de déterminer la position du niveau accepteur associé à l'hydrogène dans la bande interdite de l'AlGaAs pour $x = 0,055$ et $x = 0,17$. Ces travaux conduisent à un niveau accepteur se situant à $E_a = E_c - 0,18 \pm 0,05 \text{ eV}$ pour $x = 0,055$ et $E_a = E_c - 0,32 \pm 0,05 \text{ eV}$ pour $x = 0,17$ [32].

De ces travaux de modélisation, on a pu déterminer l'évolution du niveau accepteur (E_a) de l'hydrogène dans les alliages AlGaAs:Si. L'extrapolation de ces valeurs de E_a à $x = 0$ conduit à une valeur de $E_c - E_a$ de $0,12 \pm 0,05 \text{ eV}$ dans du GaAs:Si (n).

L'étude de la diffusion du deutérium dans le GaAs:Si et l'AlGaAs:Si en fonction de la composition en aluminium et du taux de dopage permet de préciser les processus de diffusion de cette impureté. Par la modélisation, nous avons pu déterminer la position du niveau accepteur associé à l'hydrogène dans le GaAs.

I.2.3.3. Diffusion de l'hydrogène dans le GaAs soumis à une pression hydrostatique

Une autre étude a été menée pour étudier le processus de diffusion de l'hydrogène dans le GaAs soumis à une pression hydrostatique de façon à faire varier l'écart énergétique entre la bande de conduction et la bande de valence sans changer de matériau (c.-à-d. sans utiliser de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) [33]. La pression hydrostatique entraîne les modifications de la structure de bande qui sont similaires à celles obtenues par un

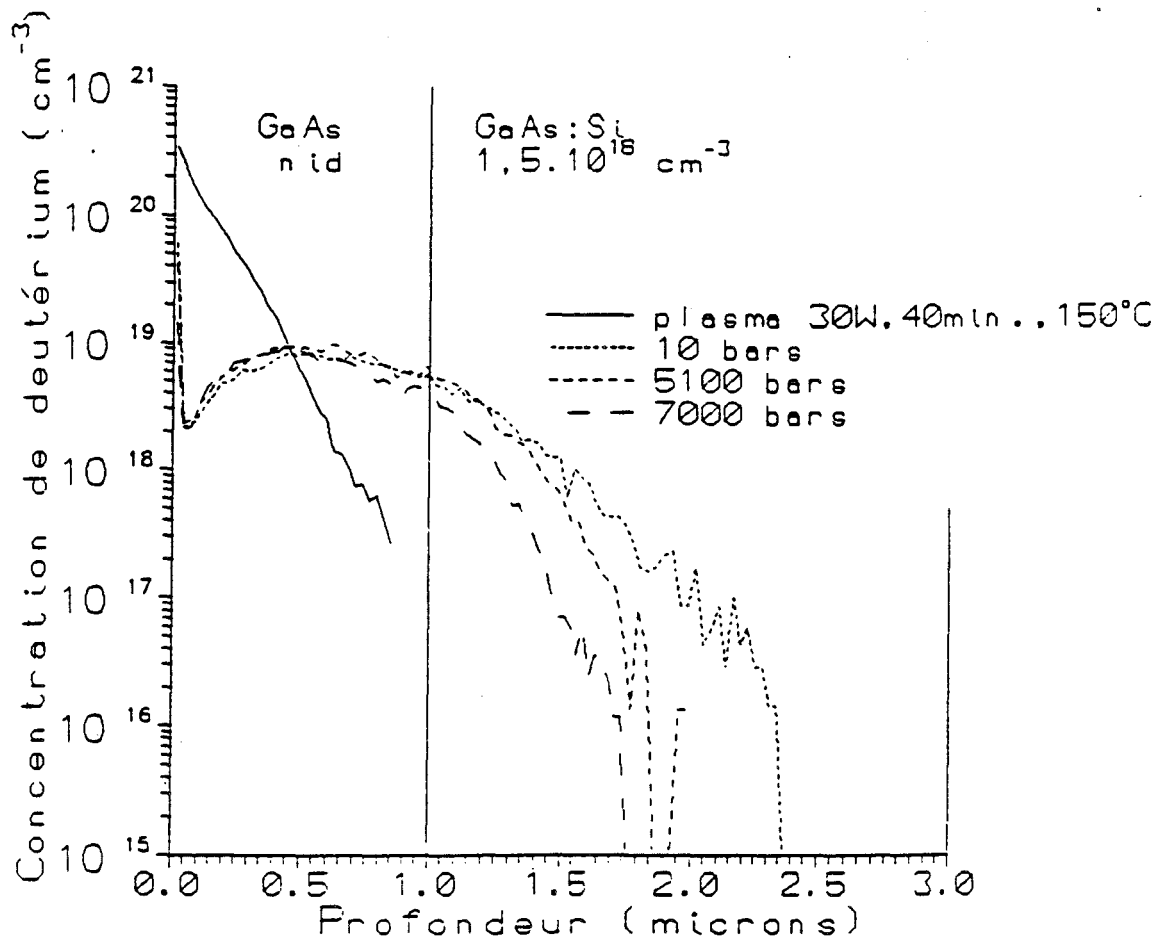


Figure I.14 : Profils de diffusion de deutérium obtenus dans des échantillons de GaAs deutérés et puis recuit sous pression à 160°C pendant 3 heures [28].

Plasma : 30 W, 150°C , 40 mn.

Pression : 10, 5100, 7000 bars.

changement de la composition en aluminium dans l'AlGaAs [34]. Les expériences ont été menées au Département des Hautes Pressions de l'Université Pierre et Marie Curie avec J. M Besson et G. Weill en collaboration avec l'équipe de Bellevue.

Les échantillons utilisés dans cette étude sont constitués d'une couche supérieure de GaAs non dopée sur une couche de GaAs dopée silicium de type n. Les caractéristiques des couches sont données figure I.13. Les échantillons sont préchargés en hydrogène dans la couche supérieure non dopée sur une profondeur de 0,5 micron en hydrogénant à une puissance de 30 watts pendant 10 minutes à 150°C. Ce préchargement servira de réservoir d'hydrogène. Ils sont ensuite recuits sous pression hydrostatique (10, 5200 et 7100 bars) ce qui a pour effet de faire diffuser une grande partie de l'hydrogène dans la couche inférieure dopée. Pour simuler les profils de diffusion obtenus par ce procédé, l'équipe de Bellevue a réalisé deux séries d'essais sous pression: lors de la première, les échantillons ont été recuits à 145°C pendant 8 heures et lors de la seconde à 160°C pendant 3 heures (figure I.14). Il faut noter que lors de ces recuits sous pression une partie de l'hydrogène diffuse hors du matériau. Par ailleurs, on constate une bonne diffusion de l'hydrogène au sein du matériau puisque la concentration de l'hydrogène diffusé dans la couche dopée est égale à la concentration en dopants silicium. On observe aussi que la profondeur de diffusion augmente avec la pression hydrostatique. Des mesures d'effet Hall effectuées sur ces échantillons montrent que l'hydrogène neutralise les donneurs dans la couche dopée.

GaAs NID 0,5 μm
GaAs dopé Si 2 μm 1,5 10^{18} at.cm ⁻³
GaAs NID
substrat

Figure I.13 : Caractéristiques des couches de GaAs utilisées dans la détermination de l'énergie de l'état de l'hydrogène par des études en pression.

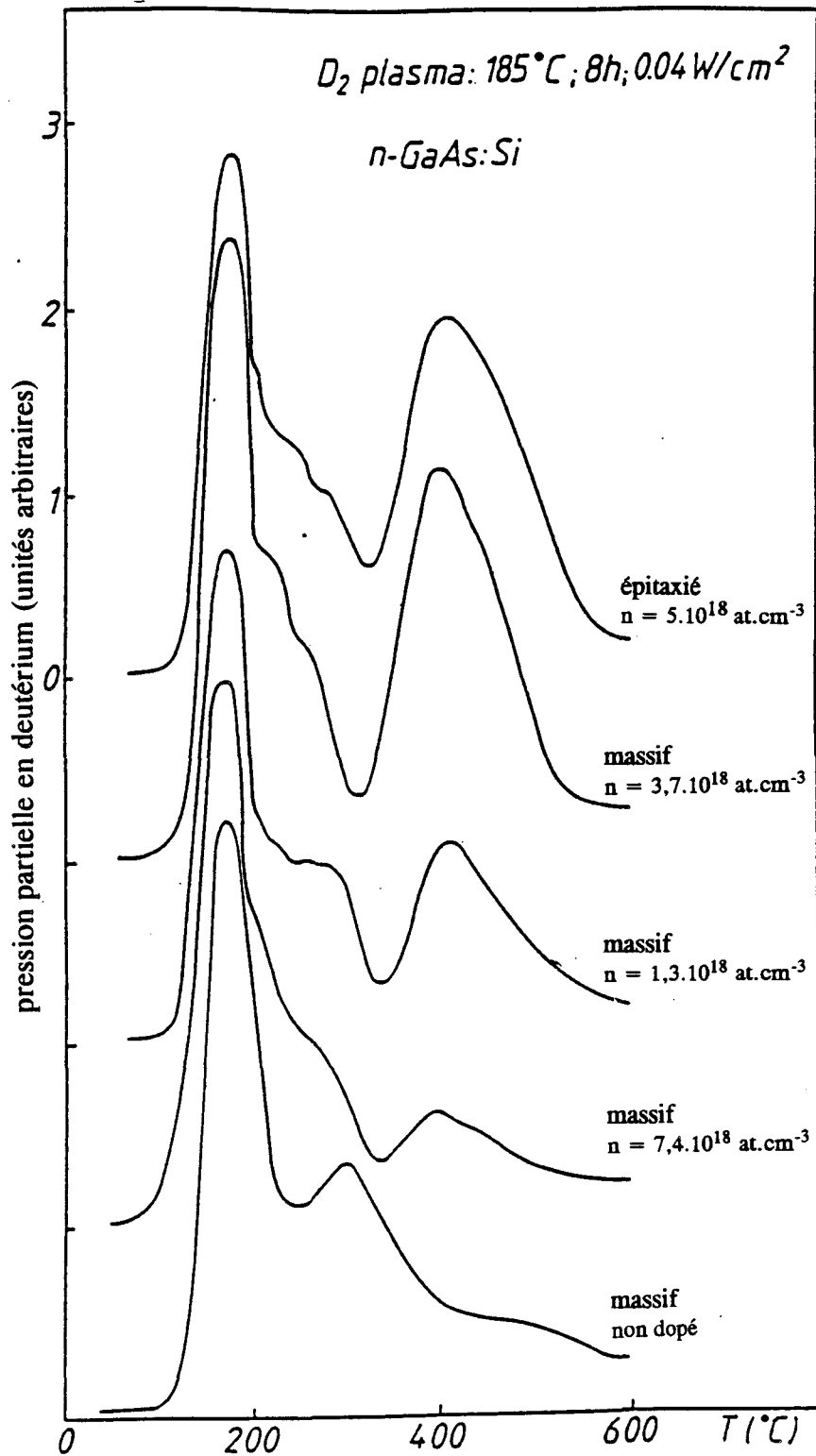


Figure I.15 : Spectres d'effusion du deutérium obtenus pour des échantillons de GaAs (n) ayant différentes concentrations en dopants silicium. Pour des raisons de clarté, les spectres sont décalés verticalement [24].

Plasma : $0,04 W.cm^{-2}$, $185^\circ C$, 8 heures.

Le modèle utilisé pour simuler ces profils de diffusion est celui de D. Mathiot. Compte tenu des connaissances sur les mécanismes de diffusion de l'hydrogène dans du GaAs:Si (n) et de la faible dépendance des coefficients de diffusion des espèces H sous l'effet de la pression, on peut penser que l'évolution des profils de diffusion provient principalement de l'influence de la pression sur les concentrations relatives des espèces H^0 , H^- et Si-H et donc de l'influence de la pression sur de l'écart $E_f - E_a$ (la pression influe sur la largeur de bande). Les modifications des profils de diffusion indiquent que l'augmentation de la pression hydrostatique favorise la création de H^- et donc accroît l'écart $E_f - E_a$. La détermination de l'état d'hydrogène a été faite en tenant compte de la variation de la bande interdite du GaAs en fonction de la pression [35]. Dans cette étude, les paramètres influant sur la diffusion sont la température de diffusion, le temps de diffusion et la pression. La modélisation de ces profils permet de déterminer une valeur de $E_c - E_a$ de 0,23 eV à la pression de 7000 bars.

1.2.3.4. Etude d'exodiffusion dans du GaAs:Si

Une étude d'exodiffusion a été entreprise dans le cadre de notre collaboration avec Bellevue : elle consiste à obtenir le spectre du flux de deutérium diffusant hors d'un échantillon de GaAs:Si deutéré en fonction de la température de recuit. L'analyse des échantillons de GaAs:Si hydrogénés a apporté des indications sur l'origine de l'hydrogène désorbé et sur la stabilité des différentes configurations de l'hydrogène dans le matériau, ainsi que sur les mécanismes régissant l'exodiffusion de l'hydrogène (dissociation des complexes Si-H et diffusion de l'hydrogène). Les spectres d'exodiffusion de deutérium obtenus pour du GaAs:Si montrent l'existence de 2 pics (figure I.15), le premier à 180°C (T_l) et l'autre à 400°C (T_h) [24]. Une étude très complète montre que l'intensité du pic T_h :

- est dépendante de la température et du temps d'exposition au plasma, ces deux paramètres régissant la diffusion de l'hydrogène ;
- varie en fonction du taux de dopage du matériau hydrogéné : plus le matériau est dopé plus le pic T_h est grand ;
- diminue quand l'échantillon hydrogéné est recuit à 400°C.

Par contre, le pic à 180°C (T_1) est indépendant des paramètres régissant la diffusion lors de l'hydrogénation et du taux de dopage du matériau. Cependant, un recuit à 100°C seulement peut modifier l'allure du pic T_1 .

L'étude d'exodiffusion permet de conclure que le pic à 180°C est associé à l'accumulation de l'hydrogène en surface et le pic à 400°C aux espèces en volume. En modifiant la vitesse de montée en température de recuit, on arrive à accéder à l'énergie d'exodiffusion des deux espèces diffusantes. On trouve ainsi une énergie d'activation de 0,5 eV pour le premier pic (T_1) et de 2 eV pour le pic (T_h) à 400°C. La faible énergie obtenue pour le pic T_1 reflète la faible énergie de liaison de l'hydrogène présent à la surface et plus précisément des liaisons entre l'hydrogène et les défauts créés suite à l'exposition au plasma. La valeur de l'énergie d'activation obtenue pour le pic T_h est en accord avec celle déterminée par la méthode de recuits thermiques d'échantillons de GaAs:Si (n) hydrogénés [19]. Cette valeur est particulièrement élevée puisqu'elle tient compte de la dissociation des complexes Si-H et du repiégeage de l'hydrogène au cours de sa diffusion [23].

I.3. LES DEFAUTS DE SURFACE CREEES PAR LE PLASMA D'HYDROGENE

C'est un fait établi que la plupart des plasmas d'hydrogène produisent des modifications de surface sur les matériaux semiconducteurs. La nature de ces perturbations de surface sont liées au type de plasma utilisé. Par exemple, certains plasmas d'hydrogène ont un effet de gravure sur du GaAs alors que d'autres provoquent des phénomènes de désoxydation, les deux cas pouvant être parfois accompagnés de pertes de stoechiométrie. Le niveau de dégradation dépend à la fois de la nature du matériau, du gaz vecteur et des conditions d'exposition au plasma. Dans ce contexte, il est important pour nos travaux de réalisation de transistors à effet de champ hydrogénés d'évaluer les perturbations propres au plasma R.F. d'hydrogène utilisé.

Dans ce but, une série d'études a été entreprise par le Laboratoire d'Electrochimie Interfaciale par A. Etcheberry et C. Debiemme en collaboration avec une équipe du Laboratoire de Physique des Solides dirigé par D. Ballutaud. Des analyses XPS combinées avec des analyses SIMS et une étude d'exodiffusion ont été

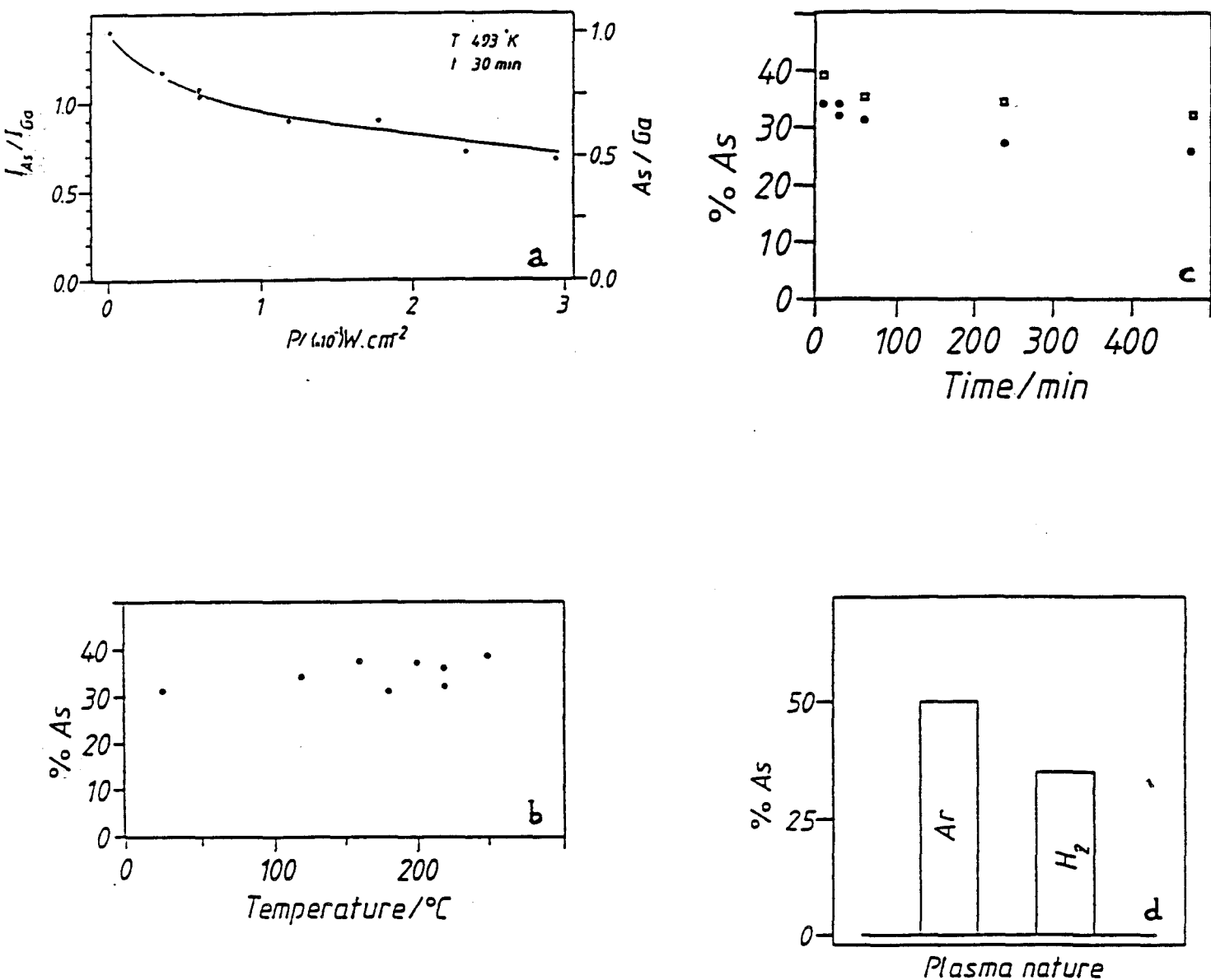


Figure I.16 : Observations de perte de stoechiométrie sur du GaAs hydrogéné.

(a) Variation de la puissance de plasma à 220°C.

(b) Influence de la température

Plasma : 0,09 W.cm⁻², 30 mn

(c) Influence du temps d'exposition

Plasma : □-0,04 W.cm⁻², O- 0, 08 W.cm⁻²

(d) Rôle de l'hydrogène dans la perte de stoechiométrie

Plasma : 0,08 W.cm⁻², 220°C

réalisées. Grâce à elles, nous pouvons expliquer les origines de la modification de la réactivité de la surface du GaAs après une exposition au plasma d'hydrogène.

I.3.1. Définition des surfaces de référence

Pour exploiter quantitativement les analyses XPS, il est nécessaire de disposer de surfaces de GaAs de référence. La mesure de l'aire des pics Ga_{3d} et As_{3d} permet de déterminer les rapports d'intensité propres à un échantillon stoechiométrique en surface (qui est typique de la fonction de transfert de l'appareil). Le rapport As_{3d}/Ga_{3d} est égal à 1,4 dans le cas d'une surface fraîchement décapée (pour notre machine). Cette valeur est en parfait accord avec la littérature [9, 10]. Dans le cas d'un échantillon oxydé natif, les allures des pics diffèrent d'un échantillon à un autre. Cependant, quand on réalise l'intégration sur l'ensemble des contributions As d'une part, et Ga d'autre part, le rapport entre les aires est proche de 1,4. Les échantillons de GaAs utilisés dans cette étude ont été préparés de la façon suivante : décapage au brome-méthanol puis oxydation à l'air. Les surfaces de ces échantillons sont très proches de la composition 50 % Ga et 50 % As.

I.3.2. Etudes des effets du plasma d'hydrogène sur du GaAs

Les effets du plasma ont été analysés en prenant en compte les paramètres suivants : la puissance, le temps d'exposition, la température, la nature du plasma et la nature de la surface de départ. La première remarque que l'on puisse faire est que quelque soit les conditions de plasma utilisées, un enrichissement significatif en gallium, et donc par conséquent une perte en arsenic, sont observés (figures I.16 et I.17). Dans le cas où seul le paramètre puissance varie, on note une certaine tendance à la saturation du phénomène d'enrichissement en Ga pour les fortes puissances (figure I.16.a). Nous avons aussi observé que l'état initial de la surface du GaAs (fraîchement décapée ou non) n'influe pas sur le degré de perturbation généré suite à une exposition au plasma d'hydrogène. Cependant, lors des études en temps (figure I.16.b), on constate que la cinétique de ce nouvel état est extrêmement rapide puisque la stabilité est atteinte au bout de quelques minutes. Par ailleurs, nous avons remarqué que la température du plasma n'influe pas sur cette cinétique de réaction (figure I.16.c).

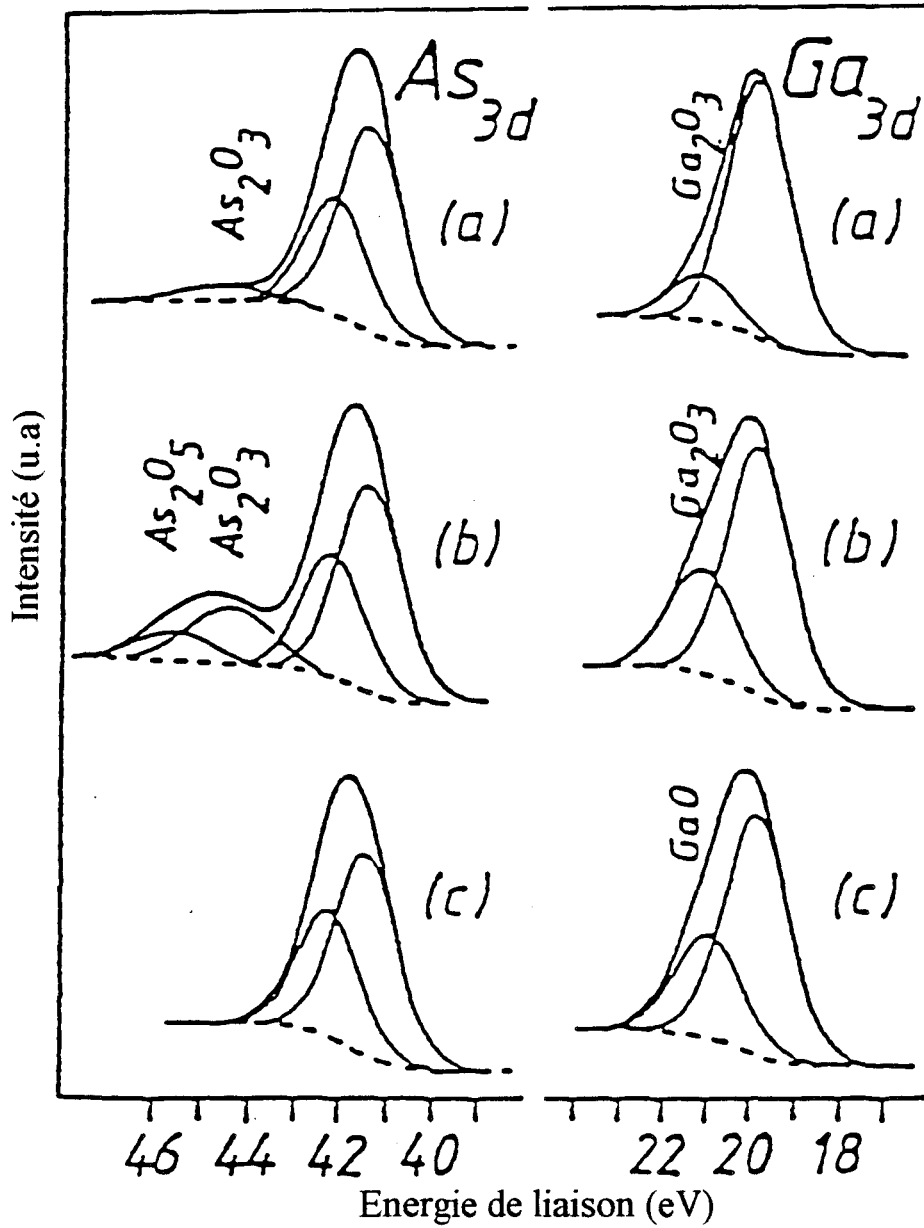


Figure I.17 : Spectres XPS des niveaux As_{3d} et Ga_{3d} pour le GaAs
 (a) Echantillon fraîchement décapé
 (b) Echantillon avec un oxyde natif (ou décapé vieilli)
 (c) Echantillon hydrogéné, puis exposé à l'air
 Plasma : $0,08 \text{ W.cm}^{-2}$, 220°C

1.3.2.1. Estimation de la zone perturbée

L'étape suivante de cette étude a été de quantifier la perturbation de surface provoquée par l'hydrogénation. Nous avons estimé l'étendue de cette dégradation par deux méthodes différentes :

- abrasion par argon ionisé ;
- dissolution chimique sélective.

On peut ainsi obtenir une surface présentant un rapport As/Ga proche des échantillons avant hydrogénation. La vitesse d'abrasion du GaAs par l'argon ionisé est de $5 \text{ \AA} \cdot \text{mn}^{-1}$ et nos expériences montrent que la couche perturbée a une épaisseur de 30 à 50 \AA .

Les données de la littérature et nos expériences électrochimiques montrent que les phases oxydées de GaAs (oxydes et hydroxydes de gallium) sont très solubles dans des solutions de pH extrêmes (< 2 ou > 13). Nous avons observé qu'un trempage de 1 à 2 mn dans du KOH 1 M était suffisant pour retrouver une surface initiale de 50 % As et 50 % Ga. On peut donc supposer que la surface d'arrêt est située à l'interface de la zone perturbée et de la zone non perturbée.

Ces expériences ont permis d'évaluer l'épaisseur de la couche perturbée qui est dans les cas extrêmes d'une cinquantaine d'Angströms. On a de plus trouvé deux techniques non destructives permettant d'éliminer cette couche perturbée lors des procédés d'élaboration de nos composants.

1.3.2.2. Les effets de gravure

Ces résultats nous soumettent une autre question : quel est le degré d'abrasion de la surface au cours du plasma ? L'étude de la perte de stoechiométrie avec le temps d'exposition (figure I.17.b) montre clairement l'existence d'un régime stationnaire qui est rapidement atteint. Des expériences menées sur des longues durées d'exposition permettent de déduire la vitesse de décapage du plasma d'hydrogène. Elle s'estime au environ de $500 \text{ \AA} \cdot \text{h}^{-1}$. Cependant, dans le cas où l'hydrogénation est utilisée comme procédé technologique, ce processus est négligeable puisque les temps d'exposition utilisés sont très court, de l'ordre d'une dizaine de minutes.

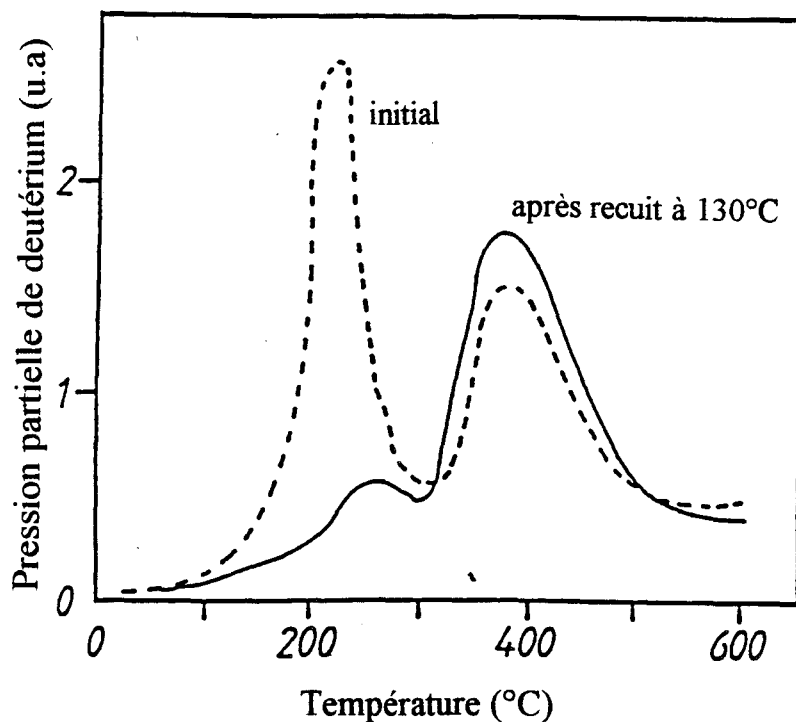


Figure I.18 : Courbes d'exodiffusion de l'hydrogène pour des échantillons de GaAs deutérés.
 Conditions de plasma : $0,08 \text{ W.cm}^{-2}$, 220°C , 8 heures.

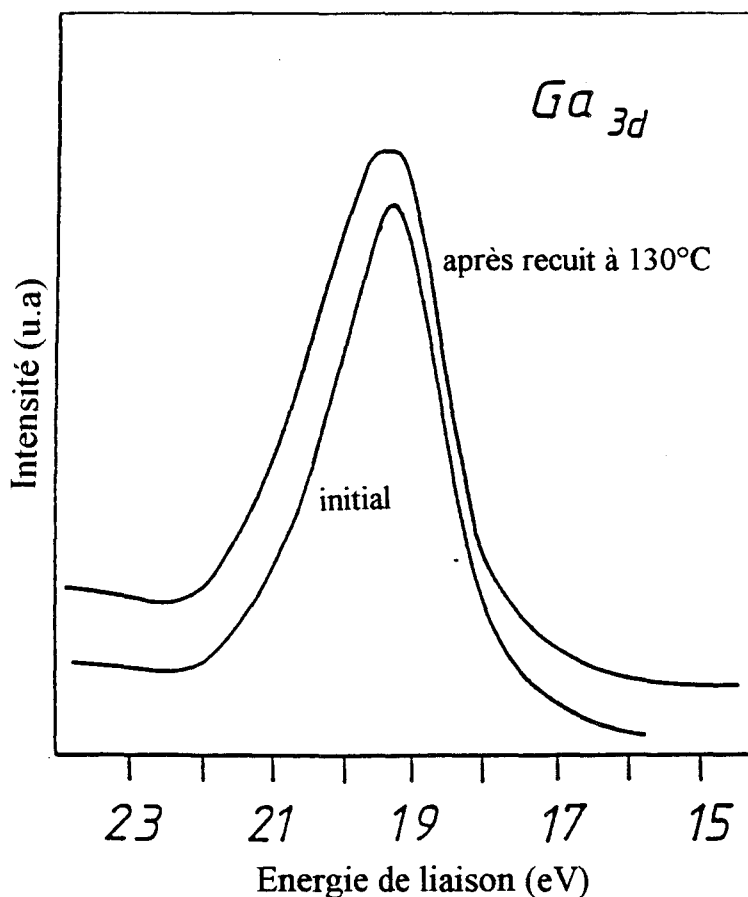


Figure I.19 : Spectres XPS du Ga_{3d} d'échantillons de GaAs hydrogénés exposés à l'air.

I.3.2.3. Réactivité d'une couche hydrogénée

Lors de ces études, il a été observé que la surface des couches hydrogénées n'évolue pas au cours du temps. Une étude très complète couplant SIMS, XPS et exodiffusion nous a permis de mieux comprendre pourquoi une surface hydrogénée était plus stable au cours du vieillissement qu'une couche hydrogénée et décapée.

Les spectres des pics de photoélectrons As_{3d} et Ga_{3d} obtenus pour différents échantillons de GaAs au cours des différentes étapes de traitement sont donnés dans la figure I.17. Les contributions principales situées à ~ 41 eV et à $\sim 19,8$ eV correspondent respectivement aux photoélectrons émis par les atomes du réseau superficiel de Ga et de As. D'autres pics dus à la présence d'oxydes (Ga_2O_3 et As_2O_3) sont aussi observés (figure I.17.a). Sur les échantillons vieillis à l'air, on détecte plus fortement les oxydes tels que Ga_2O_3 , As_2O_3 et également As_2O_5 (figure I.17.b).

Par contre, dans le cas des échantillons hydrogénés (figure I.17.c), on observe des distributions tout à fait différentes des photoélectrons issus des niveaux Ga_{3d} et As_{3d} (en plus de l'enrichissement en gallium) puis qu'il n'y a plus d'oxyde d'arsenic et que seul le GaO est présent. De plus on constate que ce spectre ne s'altère pas lors d'un vieillissement à l'air. Cette différence de comportement par rapport à une couche de GaAs décapé a été attribuée à la présence de GaO. Le gallium présent est donc en phase d'oxydation $+2$.

Des expériences plus approfondies couplées avec des analyses SIMS et en exodiffusion ont montré que l'accumulation d'hydrogène en surface était responsable de cette non réactivité de la surface à l'air. Des études en exodiffusion ont montré qu'un recuit à $130^\circ C$ était suffisant pour que l'accumulation en surface disparaisse (figure I.18). Il a été observé sur des échantillons de GaAs recuit à $130^\circ C$ un déplacement de Ga_{3d} de 1,3 eV (figure I.19) lié à la présence d'un oxyde de Ga du type Ga_2O_3 . La réactivité anormale à l'air de la phase enrichie en gallium se trouve supprimée. A l'opposé, le signal associé à l'arsenic présente une absence presque totale d'évolution au contact de l'air. Les déplacements chimiques à 3,2 et 4,2 eV sont peu ou pas observés.

Cette différence de comportement liée au gallium et à l'arsenic est probablement due au fait que les atomes d'arsenic présents en surface sont enterrés, et que l'absence de phénomène d'oxydation avant et après recuit, est liée à un effet de protection

essentiellement stérique. Ces expériences montrent que l'anomalie de la réactivité à l'air est liée à la phase riche en gallium. On peut supposer que la différence des cinétiques d'oxydation qui se traduit par un degré d'oxydation +2 avant recuit, puis +3 après recuit est directement attribuable à l'enrichissement superficiel en hydrogène. Nous pensons que cette accumulation d'hydrogène confère à la surface des propriétés réductrices qui modifient le processus d'oxydation de la phase gallium tout en le ralentissant et l'élimination de cet enrichissement supprime ce comportement.

I.3.3. Conclusion

L'ensemble de ces observations permet d'affirmer que l'hydrogénation en volume se fait à travers une surface d'entrée perturbée. Les lois de la diffusion d'hydrogène en volume étant parfaitement établies, on peut conclure que l'état de la surface ne limite pas le processus de neutralisation. La présence d'espèces H excitées dans le plasma provoque ce mécanisme de décomposition superficielle avec perte sensible d'arsenic. Cependant, cette zone a des conséquences potentielles sur le comportement électrique de ces surfaces, du fait de l'enrichissement marqué en gallium, puisqu'elle ne s'altère pas au cours du temps à l'air. De plus, nous sommes maintenant en possession de moyens simples permettant la suppression de ces phases dégradées extrêmement minces (30 à 50 Å), et facilement intégrables dans une technologie de fabrication de composants.

CONCLUSION

Dans ce premier chapitre, nous avons résumé succinctement les principaux résultats obtenus lorsque l'on introduit de l'hydrogène dans un matériau semiconducteur, en nous focalisant tout particulièrement sur les semiconducteurs III-V qui seront tout particulièrement étudiés dans ce travail. Le panorama présenté montre que depuis une dizaine d'années, les recherches effectuées ont permis de faire progresser considérablement la connaissance des phénomènes multiples et complexes qui se produisent dans un matériau hydrogéné et des modèles permettant une étude quantitative commencent à apparaître même si un certain nombre de paramètres nécessaires sont à l'heure actuelle encore mal connus.

Nous disposons ainsi d'une base de données qui devrait se révéler précieuse pour étudier les possibilités de l'hydrogénation dans la fabrication de transistors à effet de champ. Néanmoins, compte tenu de la spécificité de nos objectifs et du caractère résolument appliqué de notre étude, il apparaît clairement qu'il nous manque encore beaucoup d'informations. L'objectif de nos premiers travaux sera de combler un certain nombre de lacunes. C'est ainsi que nous décrirons dans le prochain chapitre les résultats obtenus en étudiant plus particulièrement les phénomènes d'hydrogénation observés non plus en volume mais au voisinage de la surface dans les couches épitaxiées très fines qui sont utilisées dans la fabrication des composants.

BIBLIOGRAPHIE

1. J. Chevallier, W. C. Dautremont-Smith, C. W. Tu et S. J. Pearton : 'Donor neutralisation in GaAs(Si) by atomic hydrogen', *Appl. Phys. Lett.*, **47**, (2), pp. 108-110, 1985
2. A. Jalil, J. Chevallier, J. C. Pesant, R. Mostefaoui, B. Pajot, P. Murawala et R. Azoulay, 'Infrared spectroscopic evidence of silicon related hydrogen complexes in hydrogenated *n*-type GaAs doped with silicon', *Appl. Phys. Lett.*, **50**, (8), pp. 439-441, 1987
3. G. R. Antell, A. T. R. Briggs, B. R. Butler, S. A. Kitching, J. P. Stagg, A. Chew et D. E. Sykes, 'Passivation of zinc acceptors in InP by atomic hydrogen coming from arsine during metalorganic vapour phase epitaxy', *Appl. Phys. Lett.*, **53**, (9), pp. 758-760, 1988
4. R. Cheung, S. Thoms, I. McIntyre, C. D. W. Wilkinson et S. P. Beaumont, 'Passivation of donors in electron beam lithographically defined nanostructures after methane/hydrogen reactive ion etching', *J. Vac. Sci. Technol. B*, (6), pp. 1911-1915, 1988
5. R. L. Van Meirhaeghe, W. H. Laflere et F. Cardon, 'Influence of defect passivation by hydrogen on the Schottky barrier height of GaAs and InP contacts', *J. Appl. Phys.*, **76**, (1), pp. 403-406, 1994
6. P. C. Chao, 'Gate formation technologies - A tutorial', International School on Material Science and Technology, 'Pseudomorphic HEMT Technology and Applications', Erice, Italy, July 1994
7. J. Tatarikiewicz, 'Hydrogen implantation in semiconductors', *Physica B*, **170**, pp. 188-196, 1991
8. J. Chevallier et M. Aucouturier, 'Hydrogen in crystalline semiconductors', *Ann. Rev. Mater. Sci.*, **18**, pp. 219-256, 1988
9. C. Debiemme-Chouvy, D. Ballutaud, J. C. Pesant et A. Etcheberry, 'X-ray photoelectron spectroscopy study of GaAs surface exposed to a RF hydrogen plasma', *Appl. Phys. Lett.*, **62**, (18), pp. 2254-2255, 1993
10. C. Debiemme-Chouvy, D. Ballutaud, J. C. Pesant, C. Sevenac et A. Etcheberry, 'Modification of GaAs surface stoichiometry and reactivity induced by a hydrogen plasma', *Appl. Surf. Sciences*, **65/66**, pp. 643-646, 1993

11. A. Jalil, 'Etude des interactions hydrogène-dopant dans l'arseniure de gallium', Thèse de doctorat d'état, Paris VI, 1987
12. B. Pajot, 'Hydrogen passivation of shallow donors and acceptors in GaAs', International Conference on Shallow Impurities in Semiconductors, Linköping, Suede, Inst. Phys. Conf. Ser., **85**, chapitre 7, pp. 437-446, 1988
13. B. Pajot, R. C. Newman, R. Murray, A. Jalil, J. Chevallier et R. Azoulay, 'High-resolution infrared study of the neutralisation of silicon donors in gallium arsenide', Phys. Rev. B, **37**, (8), pp. 4188-4195, 1988
14. W. C. Dautremont-Smith, J. C. Nability, V. Swaminathan, M. Stavola, J. Chevallier, C. W. Tu et S. J. Pearton, 'Passivation of deep level defects in molecular beam epitaxial GaAs by hydrogen plasma exposure', Appl. Phys. Lett., **49**, (17), pp. 1098-1100, 1986
15. A. Jalil, A. Heurtel, Y. Marfaing et J. Chevallier, 'Passivation and generation of deep level defects in hydrogenated *n*-GaAs (Si)', J. Appl. Phys., **66**, (22), pp. 5854-5861, 1989
16. J. Chevallier, B. Machayekhi, C. Grattepain, R. Rahbi et B. Theys, 'Diffusion of hydrogen and hydrogen-dopant interactions in Si doped GaAs and AlGaAs alloys', Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **262**, pp. 461, 1992
17. R. Mostefaoui, J. Chevallier, A. Jalil, J. C. Pesant, C. W. Tu et R. F. Kopf, 'Shallow donors and *DX* centres neutralisation by hydrogen in GaAlAs doped with silicon', J. Appl. Phys., **64**, (1), pp. 207-210, 1988
18. J. C. Nability, M. Stavola, J. Lopata, W. C. Dautremont-Smith, C. W. Tu et S. J. Pearton, 'Passivation of Si donors and *DX* centres in AlGaAs by hydrogen plasma exposure', Appl. Phys. Lett., **50**, (14), pp. 921-923, 1987
19. S. J. Pearton, W. C. Dautremont-Smith, J. Chevallier, C. W. Tu et K. D. Cummings, 'Hydrogenation of shallow-donor levels in GaAs', J. Appl. Phys., **59**, (8), pp. 2821-2827, 1986
20. H. Y. Cho, E. K. Min, S. Min, K. J. Chang et C. Lee, 'Electric-field-enhanced dissociation of the hydrogen-Si complex in GaAs', J. Appl. Phys., **68**, (10), pp. 5077-5080, 1990
21. H. Y. Cho, S. Min, K. J. Chang et C. Lee, 'Negatively charged state of atomic hydrogen in *n*-type GaAs', Phys. Rev. B, **44**, (24), pp. 13779-13782, 1991

22. G. Roos, N. M. Johnson, C. Herring et J. S. Harris, 'Thermal dissociation energy of the Si-H complex in *n*-type GaAs', Appl. Phys. Lett., **59**, (4), pp. 461-463, 1991
23. S. J. Pearton, C. R. Abernathy et J. Lopata, 'Thermal stability of dopant-hydrogen pairs in GaAs', Appl. Phys. Lett., **59**, (27), pp. 3571-3573, 1991
24. R. Rizk, B. Theys, J. C. Pesant, J. Chevallier, M. Aucouturier et B. Pajot, 'Deuterium effusion from crystalline *n*-type GaAs (Si)', Phys. Rev. B, **47**, (23), pp. 15523-15532, 1993
25. L. Pavesi et P. Giannozzi, 'H passivation of Si impurities in GaAs', Phys. Rev. B, **43**, (3), pp. 2446-2449, 1991
26. K. J. Chang, B. H. Cheong et C. H. Park, 'Atomic model for hydrogen passivation of *DX* centres in GaAs and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alloys', Solid State Communications, **84**, (11), pp. 1005-1009, 1992
27. G. Roos, N. M. Johnson, C. Herring et J. S. Harris, 'Hydrogen passivation and reactivation of *DX* centres in Se-doped and Si-doped AlGaAs - A comparison', Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **262**, pp. 419-424, 1992
28. B. Machayekhi, 'Diffusion et états électroniques de l'hydrogène dans *n*-GaAs et *n*-AlGaAs', Thèse de docteur, Paris VI, 1994
29. D. Mathiot, 'Modelling of hydrogen diffusion in *n* and *p* type silicon', Phys. Rev. B, **40**, (8), pp. 5867-5870, 1989
30. J. Chevallier, B. Machayekhi, C. Grattapain, R. Rahbi et B. Theys, 'Diffusion and electronic states of hydrogen in *n*-GaAs and *n*-AlGaAs', Phys. Rev. B, **45**, (15), pp. 8803-8806, 1992
31. R. Rahbi, 'Etude de la diffusion de l'hydrogène et des interactions hydrogène-accepteur dans GaAs de type *p*', Thèse de docteur, Paris VI, 1991
32. B. Machayekhi, R. Rahbi, B. Theys, M. Miloche et J. Chevallier, 'Position of the hydrogen acceptor level in *n*-GaAs:Si and *n*-AlGaAs:Si deduced from hydrogen diffusion modelling', Mat. Science Forum, vols. 143-147, p. 951, 1994
33. E. Calleja, A. Gomez et E. Muñoz, 'Direct evidence of the *DX* centre link to the *L*-conduction band minimum in GaAlAs', Appl. Phys. Lett., **52**, (5), pp. 383-385, 1988

34. P. M. Mooney, 'Deep donor levels (*DX* centres) in III-V semiconductors', *J. Appl. Phys.*, **67**, (3), pp. R1-R26, 1990
35. S. Adachi, 'GaAs, AlAs and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$: Material parameters for use in research and device applications', *J. Appl. Phys.*, **58**, (3), pp. R1-R29, 1985

Chapitre II

CHAPITRE II

Etudes de l'hydrogénation pour des couches de faibles épaisseurs

INTRODUCTION

L'élaboration technologique de transistors à effet de champ utilisant la neutralisation par plasma d'hydrogène nécessite un certain nombre d'études préliminaires pour la mise au point du procédé de fabrication. Pour mener à bien ces études et les réalisations de transistors, il s'est avéré indispensable de disposer d'un bâti de plasma à l'IEMN. C'est pourquoi en collaboration avec le Laboratoire de Physique des Solides de Bellevue, nous avons conçu deux bâtis "radiofréquences" identiques que nous avons installés l'un dans nos salles blanches et l'autre à Bellevue. Le laboratoire de Bellevue s'est chargé d'étudier les phénomènes physiques se produisant lors de l'hydrogénation des couches semiconductrices dopées N relativement épaisses (matériau massif ou épitaxié). Dans notre cas, en vue de l'utilisation de l'hydrogénation dans le procédé de fabrication des transistors, nous avons particulièrement étudié les phénomènes dans des couches épitaxiées minces ($< 2000 \text{ \AA}$) et très dopées ($> 2.10^{18} \text{ at.cm}^{-3}$) de structures proches de celles utilisées pour la réalisation des transistors hydrogénés [1, 2].

Les premières études effectuées ont permis d'étalonner le bâti de plasma afin de mieux connaître l'influence des divers paramètres régissant le plasma (puissance, temps d'exposition et température d'échantillon) sur la diffusion de l'hydrogène dans le matériau semiconducteur. Nous avons ensuite vérifié les phénomènes de neutralisation en mesurant les caractéristiques électriques des couches ainsi obtenues. Cet étalonnage

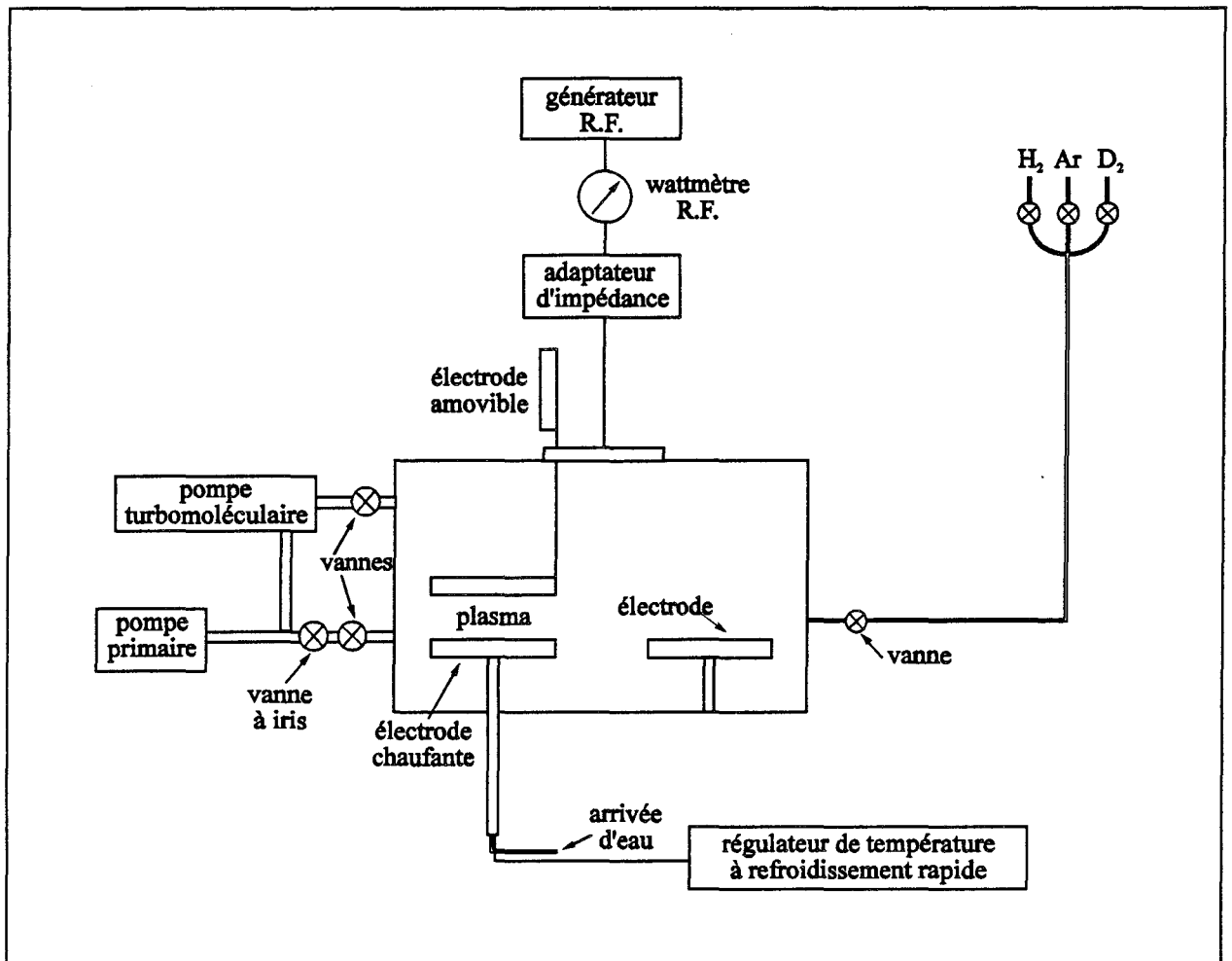


Figure II.1 : Schéma du bâti de plasma d'hydrogène radiofréquence.

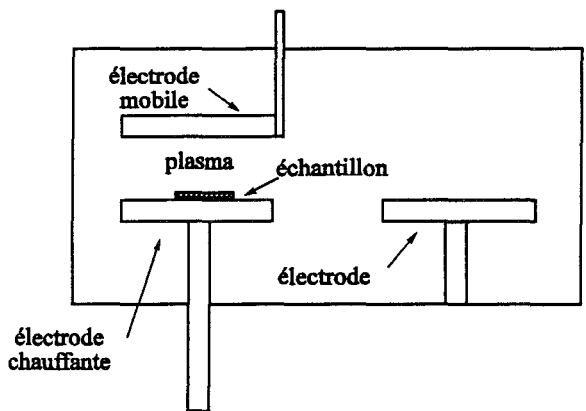
étant fait, nous avons alors recherché les conditions d'obtention d'un plasma aussi doux que possible, c'est-à-dire qui n'engendre pas de défauts dans une couche semiconductrice de faible épaisseur. Il est en effet nécessaire pour atteindre des performances élevées de créer une zone active de très bonne qualité électrique et donc sans défauts. Utilisant ces conditions d'obtention de "plasma doux", il nous a fallu enfin rechercher les températures permettant de réaliser une neutralisation maximale.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous aborderons l'étude de l'influence de différents phénomènes physiques sur la déneutralisation des impuretés. En premier lieu, nous étudierons la stabilité thermique des complexes Si-H déterminante pour les caractéristiques du transistor afin de définir sa température d'utilisation pratique. A partir d'études expérimentales, nous déterminerons les énergies de dissociation des complexes et nous pourrons estimer la durée de vie d'une couche hydrogénée. Ensuite, il nous a paru intéressant d'étudier deux nouvelles méthodes de décomplexation et donc de déneutralisation mises en évidence au cours de nos études : la déneutralisation par faisceau d'électrons et par exposition aux ultraviolets. Ces deux nouveaux procédés sont attrayants pour l'élaboration technologique du transistor hydrogéné puisqu'ils permettent de dissocier les complexes de façon localisée. Il restait cependant à les étudier quantitativement afin d'évaluer leurs limites d'utilisation. Au cours de ce chapitre, il nous sera aussi possible d'obtenir l'essentiel des informations qui nous permettra de définir différents procédés technologiques de réalisation de transistors en utilisant pleinement les phénomènes de neutralisation et de déneutralisation liés à la présence de l'hydrogène dans la couche semiconductrice.

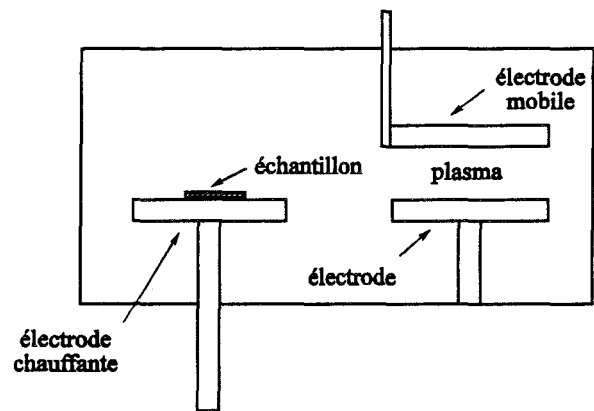
II.1. LA NEUTRALISATION

II.1.1. Le bâti de plasma radiofréquence

Pour mettre au point les procédés de réalisation de transistors hydrogénés nous avons utilisé un bâti de plasma radiofréquence ($f = 13,56$ MHz) élaboré par J. C. Pesant. Le bâti est décrit sur le schéma de la figure II.1. L'enceinte du réacteur est en acier inoxydable et est reliée à un groupe de pompage. Dans le réacteur diode radiofréquence de ce bâti, le couplage de la puissance radiofréquence à la décharge est obtenu au moyen de deux électrodes internes. L'une des électrodes est connectée au générateur radiofréquence par l'intermédiaire d'un adaptateur d'impédance et l'autre est reliée à la masse.



(a)



(b)

Figure II.2 : Les deux types d'exposition au plasma possibles :
 (a) plasma direct et (b) plasma dit en post décharge.

Les caractéristiques de cet appareillage peuvent être résumées de la façon suivante :

- Le groupe de pompage est constitué d'une pompe à palettes et d'une pompe turbomoléculaire. Cet ensemble de pompes permet d'atteindre des pressions de l'ordre de 10^{-8} mbar. Le vide s'établit rapidement : par exemple, une pression de 10^{-6} mbar est atteinte en moins de trois minutes.

- Le générateur radiofréquence peut délivrer une puissance de 0 à 200 watts sur 50 ohms. Les puissances incidente et réfléchie sont mesurées par un wattmètre. La puissance incidente obtenue est de l'ordre de 1 à 50 watts, ce qui correspond à une densité de puissance de plasma de $0,05 \text{ W.cm}^{-2}$ à $2,5 \text{ W.cm}^{-2}$.

- Le système est composé d'une électrode mobile et de deux électrodes fixes reliées à la masse. Ces électrodes circulaires ont un diamètre de 5 cm. L'une des électrodes fixes est dotée d'un dispositif de chauffage et d'un système de refroidissement ultra-rapide. Elle sert de porte-échantillon.

- L'électrode supérieure a la particularité d'être mobile. Elle est réglable en hauteur et la distance entre les électrodes peut varier de 1 à 50 mm. Elle peut également effectuer une rotation de 180 degrés lui permettant de passer d'une électrode fixe à l'autre. Grâce à ce degré de liberté, deux types de plasma sont réalisables : une exposition directe et une exposition dite en post-décharge, où l'échantillon n'est plus directement exposé au plasma mais où il est éloigné de la décharge. Ces deux méthodes d'exposition sont représentées sur les figures II.2.a et II.2.b. L'électrode supérieure est, de plus, munie d'une coupelle reliée à la masse destinée à confiner le plasma.

- Le régulateur de température permet de chauffer le porte-échantillon jusqu'à une température de 300°C et permet de stabiliser la température de l'échantillon pendant l'exposition au plasma.

- Le porte-échantillon peut être refroidi de 300°C à la température ambiante en une minute par le système de refroidissement ultra-rapide à pulsion d'air et d'eau. Il est possible ainsi d'éviter une éventuelle exodiffusion de l'hydrogène au cours du refroidissement. De ce fait, la diffusion de ce type d'atomes au sein de l'échantillon n'a

lieu de façon notable que durant le temps où il est exposé au plasma (bien entendu dans la mesure où l'on refroidit l'échantillon dès l'arrêt du plasma et suffisamment rapidement).

Les principaux paramètres régissant la diffusion de l'hydrogène et modifiables pour ce bâti sont : la puissance délivrée au plasma, la température du matériau, la pression du gaz dans l'enceinte, le temps d'exposition, le type d'exposition au plasma et la distance séparant les électrodes.

Dans la plupart de nos expériences sur la diffusion de l'hydrogène, nous avons travaillé à une pression de gaz fixe de 1 mbar et avec une distance inter-électrodes de 18 mm. Ce sont en effet les conditions qui, après une série d'expériences préliminaires, nous ont semblé donner les résultats les plus reproductibles.

II.1.1.1. Description d'une manipulation type de plasma direct

L'échantillon semiconducteur devant être hydrogéné est posé au centre de l'électrode fixe chauffante. Le hublot est ensuite fermé et l'enceinte du réacteur mise sous vide. La température d'essai désirée est affichée sur le régulateur. Lorsque le porte-substrat a atteint la température voulue et lorsque la pression dans l'enceinte est de l'ordre de 10^{-6} mbar, on ouvre la vanne du gaz choisi (l'hydrogène ou le deutérium), et on règle le débit du gaz pour avoir une pression constante de 1 mbar dans l'enceinte du réacteur. Le plasma est ensuite déclenché en position post-décharge (figure II.2.b) pour éviter de soumettre l'échantillon à une trop grande puissance au moment du démarrage du plasma. Puis on ajuste la puissance à la valeur souhaitée avant d'amener l'électrode supérieure sur le porte-substrat pour exposer l'échantillon au plasma. Quand le temps d'exposition désiré est écoulé, on éteint le plasma et aussitôt on enclenche le système de refroidissement. Pendant le refroidissement, on continue à maintenir une pression de 1 mbar à l'intérieur de l'enceinte, ce qui permet un refroidissement plus rapide que si l'on travaillait sous vide. Enfin, lorsque l'on atteint la température ambiante, on ferme la vanne du gaz et les échantillons sont retirés quand l'enceinte est à nouveau à la pression atmosphérique.

Ceci est la façon dont nous avons procédé dans la très grande majorité des cas lors des expositions au plasma de deutérium ou d'hydrogène pour tous nos échantillons.

II.1.2. Les études préliminaires

Quand un matériau semiconducteur de type N est exposé à un plasma d'hydrogène, l'hydrogène diffuse dans le matériau et forme un complexe avec le donneur [3-7]. La formation de ce complexe a pour conséquence de diminuer la concentration des porteurs libres puisque les impuretés ionisées se neutralisent en se complexant avec l'hydrogène. Cette diminution de porteurs libres entraîne une augmentation de la mobilité. Nous allons, lors de l'étalonnage du bâti, regarder l'influence des conditions de plasma (puissance, temps d'exposition et température) sur les phénomènes de neutralisation. Notre premier souci a été de connaître les effets du flux incident d'hydrogène sur la profondeur de diffusion dans le semiconducteur. Le nouveau bâti que nous possédons nous permet en effet de varier le flux incident d'hydrogène arrivant sur le semiconducteur en variant la puissance du plasma.

Afin d'obtenir des informations pour des profondeurs importantes de diffusion de l'hydrogène, nous avons utilisé pour ce type d'expérience du GaAs massif dopé Si à $3,3 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³ (généralement nous préférons travailler sur des couches épitaxiées de faibles épaisseurs ayant des caractéristiques très proches ou similaires à celles utilisées pour la fabrication des transistors hydrogénés). Afin d'obtenir différents flux incidents d'hydrogène arrivant sur l'échantillon, nous avons fait varier la puissance de plasma et gardé constants tous les autres paramètres (temps d'exposition et température de l'échantillon) influant sur le plasma. Ce nouveau bâti n'ayant jamais servi, le choix des valeurs de la température et du temps d'exposition a été fait en s'appuyant sur les études précédentes effectuées sur l'ancien bâti qui se trouve à Bellevue.

La profondeur de pénétration du deutérium dans les échantillons exposés au plasma a été analysée par SIMS à Bellevue. Notons que pour ces essais nous utilisons du deutérium et non de l'hydrogène car ce dernier est un polluant naturel du bâti d'analyse. Les profils de diffusion obtenus par sonde ionique sont représentés sur la figure II.3. Cet ensemble de courbes permet de confirmer que le flux de deutérium incident croît avec la puissance de plasma. On note que pour ce couple de température et de temps d'exposition (220°C, 20 minutes), les puissances supérieures ou égales à 3 watts produisent un flux de deutérium suffisamment important pour introduire une quantité de deutérium supérieure au taux de dopage du matériau sur une profondeur d'un micron. Par contre, à basse puissance (1 watt) le flux de deutérium est assez faible. On constate alors que la concentration en hydrogène diffusé est insuffisante pour la réalisation des transistors puisqu'elle est très inférieure à la concentration en

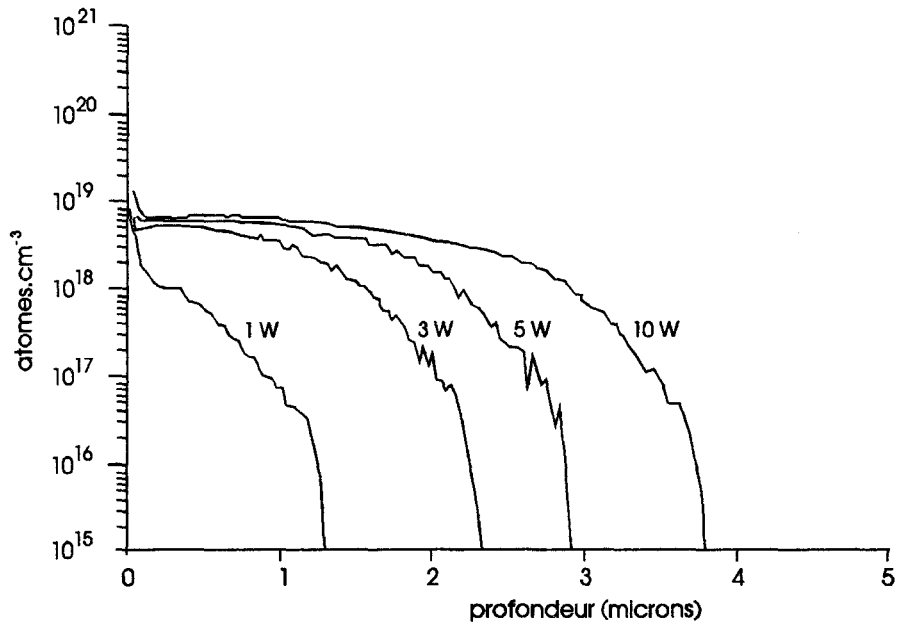


Figure II.3 : Profils de diffusion de deutérium obtenues à différentes puissances de plasma sur du GaAs massif.
 GaAs dopé Si à $3,3 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³.
 Puissance de plasma : 1, 3, 5, 10 watts.
 Temps d'exposition : 20 mn.
 Température d'échantillon : 220°C.

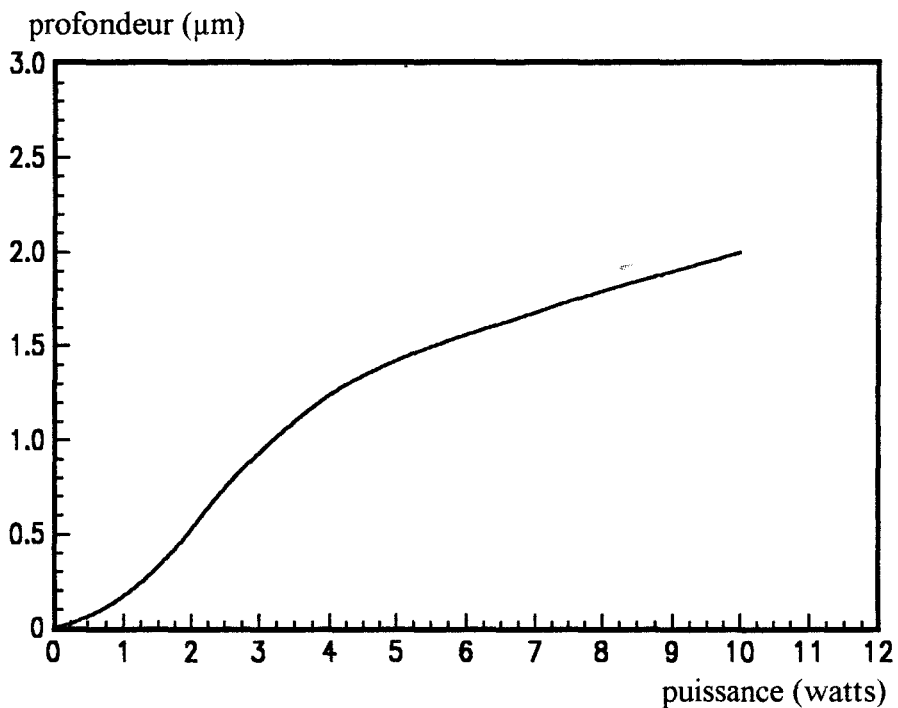


Figure II.4 : Evolution de la profondeur à laquelle la concentration de deutérium diffusé est égale à la concentration en silicium du matériau, en fonction de la puissance R.F. de plasma.
 Température d'échantillon : 220°C.
 Temps d'exposition : 20 mn.
 GaAs:Si massif dopé à $3,3 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³.

impuretés. De ce fait, toutes les impuretés risquent de ne pas être complètement neutralisées même sur une épaisseur inférieure ou égale à 2000 Å (une épaisseur habituellement utilisée dans la réalisation du transistor). Il vaut donc mieux utiliser des puissances plus élevées, ce qui nous donnera une profondeur de diffusion et un taux de neutralisation plus importants.

Pour compléter cette analyse, nous avons représenté sur la figure II.4 l'évolution en fonction de la puissance de plasma de la profondeur pour laquelle la concentration en hydrogène est égale à la concentration en silicium donc pour laquelle la neutralisation complète des impuretés peut être effectuée. On remarque qu'en agissant sur la puissance du plasma, il est possible de régler à volonté cette profondeur. Cet ajustement peut se faire également comme on peut le noter sur la figure II.5 en faisant varier la température de l'échantillon, donc la valeur du coefficient de diffusion de l'hydrogène ou du deutérium dans le semiconducteur.

Parallèlement à ces études de diffusion, nous avons effectué des mesures électriques pour observer les variations de la mobilité et de la concentration en porteurs libres du matériau. Nous avons utilisé dans cette étude des couches de GaAs épitaxiées ayant des caractéristiques proches de celles utilisées pour des transistors (GaAs:Si d'épaisseur de 2000 Å et dopé à $2 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³). Ces mesures de mobilité ont été faites sur des trèfles de Van der Pauw par la méthode d'effet Hall.

		Puissance de plasma				
		1 W	3 W	5 W	10 W	15 W
avant plasma	N_{Hall} (at.cm ⁻³)	$3,49 \times 10^{18}$	$3,49 \times 10^{18}$	$3,47 \times 10^{18}$	$3,5 \times 10^{18}$	$3,28 \times 10^{18}$
	μ_{Hall} (cm ² /V.s)	1642	1653	1656	1651	1715
après plasma	N_{Hall} (at.cm ⁻³)	$2,6 \times 10^{17}$	$1,1 \times 10^{17}$	6×10^{16}	1×10^{16}	$1,2 \times 10^{15}$
	μ_{Hall} (cm ² /V.s)	2830	3670	3740	3300	2400

Tableau I : Caractéristiques électriques d'échantillons de GaAs de type n hydrogénés à des puissances différentes.
 GaAs:Si dopé à $2 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³ et de 0,2 µm d'épaisseur.
 Température d'échantillon : 220°C.
 Temps d'exposition : 20 mn.

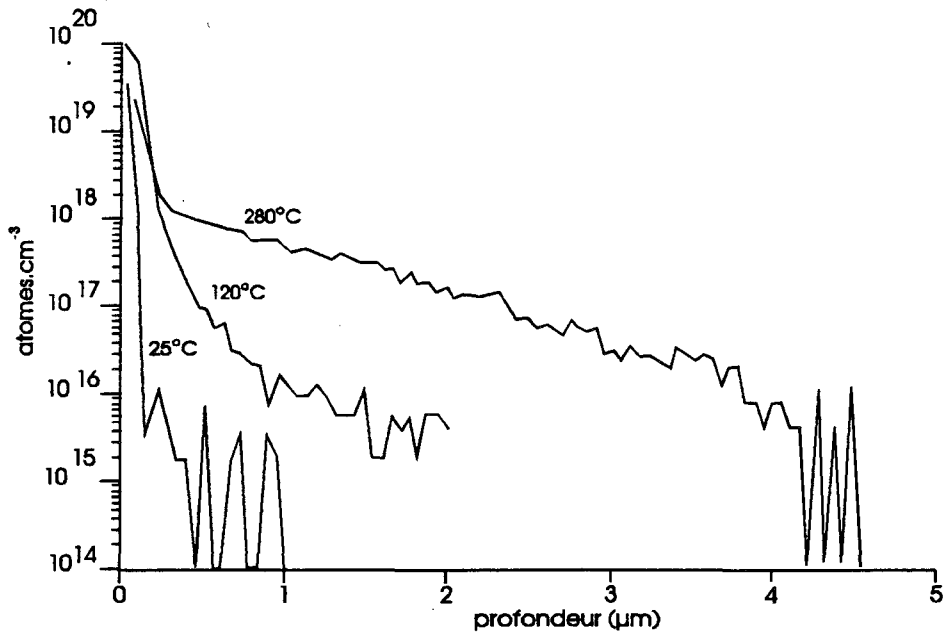


Figure II.5 : Evolution des profils de diffusion du deutérium en fonction de la température de l'échantillon pendant l'exposition au plasma.
 GaAs:Si massif dopé à $3,3 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³.
 Puissance de plasma : 20 watts.
 Temps d'exposition : 30 mn.

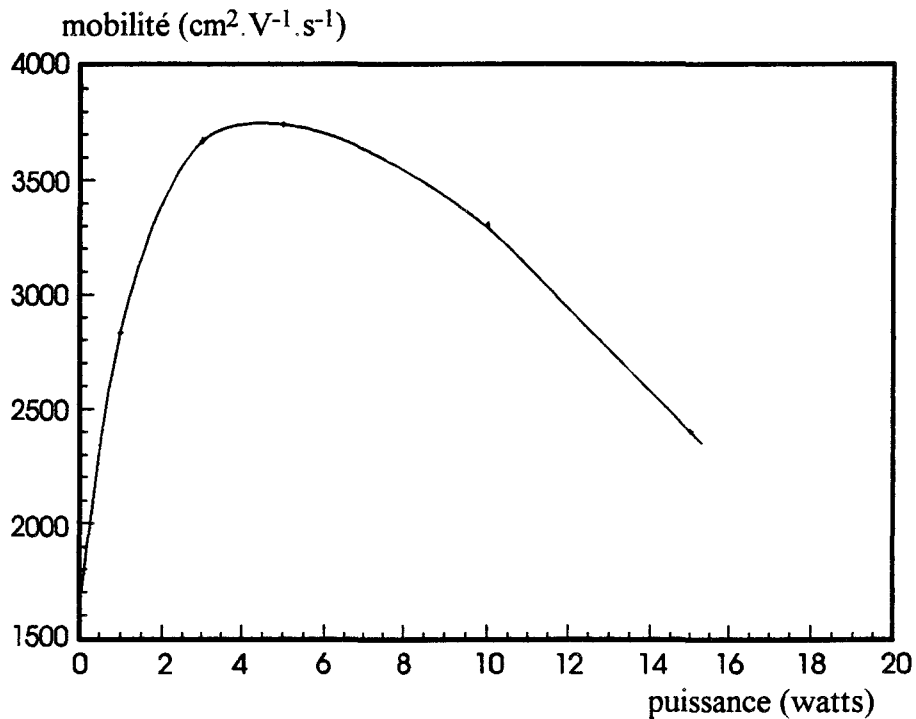


Figure II.6 : Variation de la mobilité d'échantillons de GaAs de type n après exposition à des plasmas de différentes puissances.
 GaAs dopé Si à $2 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³, $0,2 \mu\text{m}$
 mobilité initiale : $1650 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
 plasma : 1, 3, 5, 10, 15 W, 220°C , 20 mn.

Les résultats des mesures par effet Hall avant et après exposition au plasma sont reportés dans le tableau I. Ces mesures montrent que la concentration en porteurs libres du GaAs:Si a diminué après exposition au plasma d'hydrogène, et que leur mobilité a augmenté. Sur la courbe de la figure II.6 représentant la mobilité des porteurs libres en fonction de la puissance du plasma, on remarque que la mobilité passe par un maximum vers 3 watts puis décroît à partir de 5 watts. Cette décroissance de la mobilité peut s'expliquer par une dégradation du matériau pendant l'exposition à forte puissance de plasma. Une toute première conclusion de ces deux études permet d'énoncer que pour avoir une hydrogénation suffisante il faut utiliser une puissance supérieure à 1 watt mais inférieure à 5 watts afin d'obtenir une neutralisation efficace sans dégradation du matériau. Celle-ci doit être en effet minimale lorsque l'on réalise un transistor, et c'est pourquoi nous allons maintenant particulièrement étudier ce phénomène.

II.1.2.1. Les dégâts superficiels causés par le plasma d'hydrogène

Il est important d'étudier plus quantitativement l'ensemble de ces phénomènes, en particulier les dégâts causés dans la couche superficielle d'un matériau semiconducteur suite à une exposition au plasma d'hydrogène. En effet, si on veut réaliser des transistors complètement "planars" en utilisant la neutralisation par plasma d'hydrogène pour réaliser la zone active sur laquelle la grille sera déposée, cette zone hydrogénée doit comporter le moins de défauts possible. La dégradation de surface provoquée par l'exposition au plasma est donc un des aspects importants à prendre en compte lors de ces études préliminaires. L'étude précédente a montré que pour des puissances supérieures à 5 watts, la mobilité du GaAs:Si hydrogéné était plus basse que prévue : au lieu d'augmenter ou de rester constante, elle diminue et nous avons attribué cette diminution de la mobilité à une dégradation du matériau causée par le plasma. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons entrepris d'évaluer quantitativement cette dégradation de surface provoquée par le plasma. Dans ce but, nous avons exposé les échantillons pendant un temps suffisamment long pour que les effets de dégradation de surface soient suffisamment importants pour être observables par des mesures électriques. Un temps d'exposition d'une heure a donc été choisi. Après plasma, nous recuisons les échantillons à 300°C suffisamment longtemps pour dissocier les complexes silicium ou impuretés et éliminer complètement l'hydrogène de la couche (la réactivation thermique des complexes sera discutée dans la deuxième

partie de ce chapitre). Le recuit de ces échantillons hydrogénés a été fait en présence d'un échantillon témoin non-hydrogéné pour être sûr que le recuit thermique n'a pas dégradé les contacts ohmiques, et donc que les différences de résistances mesurées sont effectivement dues à la dégradation causée par le plasma.

Nous avons alors appliqué le raisonnement suivant : si, après le recuit, les échantillons hydrogénés retrouvent leur résistance initiale, nous pouvons supposer qu'il n'y a pas eu de dégradation de la surface du matériau. Si, au contraire, la résistance de l'échantillon hydrogéné mesurée après recuit est différente, nous pouvons dire qu'une partie, la plus superficielle de l'épithaxie semiconductrice, a été dégradée suite à l'exposition au plasma. Cette dégradation peut être calculée facilement en supposant que la zone dégradée est devenue parfaitement isolante.

On a en effet les relations suivantes :

$$R_i = \frac{l}{q\mu n e w} \quad (1)$$

et

$$R_{pr} = \frac{l}{q\mu n w (e - a)} \quad (2)$$

avec

- R_i : résistance initiale ;
- R_{pr} : résistance mesurée après exposition au plasma et recuit ;
- μ : mobilité ;
- n : concentration en impuretés ionisées;
- e : épaisseur de la couche active ;
- a : épaisseur de la couche superficielle dégradée ;
- l : distance entre les deux contacts ohmiques;
- w : largeur des contacts ohmiques.

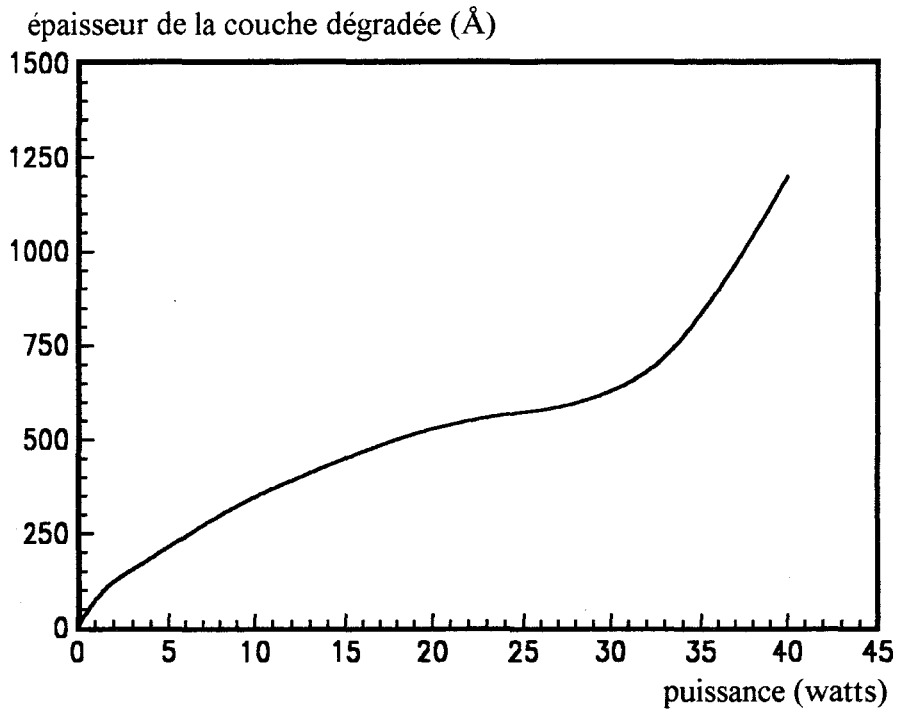


Figure II.7 : Evolution de l'épaisseur de la couche épitaxiale dégradée d'un échantillon GaAs:Si en fonction de la puissance du plasma.
Température d'échantillon : 200°C.
Temps d'exposition : 1 heure.
GaAs:Si (n) dopé à $2 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³ et de 0,2 μm d'épaisseur.

Il suffit donc de mesurer la résistance des échantillons avant et après exposition au plasma puis recuit pour obtenir le pourcentage en épaisseur de la couche dégradée, soit :

$$\left(1 - \frac{R_i}{R_{pr}}\right) = \frac{a}{e} \quad (3)$$

A l'aide de la relation (3) nous pouvons tracer la courbe donnant l'évolution de la dégradation en fonction de la puissance de plasma (figure II.7). Cette courbe montre que plus la puissance est élevée, plus la dégradation du matériau est importante. Ceci nous permet de confirmer notre hypothèse selon laquelle les puissances supérieures à 5 watts provoquent un taux de dégradation relativement important. Par contre, on note qu'au-delà d'une certaine puissance le taux de dégradation augmente considérablement et atteint 60 %. Cette étude nous permet de conclure que le plasma d'hydrogène cause, lorsque la puissance est trop élevée, des dégradations superficielles importantes et que plus la puissance est élevée, plus la dégradation du matériau est importante. Or, pour la réalisation de nos transistors, un taux de dégradation inférieur à 10 % nous paraît être une marge tolérable, ceci correspondant à des temps d'exposition d'une heure à des puissances de plasma inférieures à 5 watts. En réalité, lorsque l'on réalise des transistors, le temps d'exposition au plasma est souvent bien plus court que celui que nous avons utilisé dans cette étude et les dégâts superficiels sont encore moins importants.

II.1.2.2. Caractéristiques électriques des couches hydrogénées

Les dégâts superficiels dus à la puissance du plasma sur une couche épitaxiée étant connus, il est maintenant important de regarder plus en détail l'influence de la neutralisation sur la mobilité des porteurs libres du matériau. En pratique la couche épitaxiée initiale n'est pas parfaite : il y a des défauts ou d'autres impuretés (par exemple des accepteurs ionisés) constituant autant de centres diffusants, ce qui se traduit par une mobilité observée plus faible que celle prévue par la courbe théorique. C'est pourquoi il est préférable d'utiliser comme courbe de référence de mobilité celle

	Résistance (ohms)	Mobilité (cm ² /V.s)	Concentration de porteurs libres (at.cm ⁻³)
avant plasma	4,2	2000	2×10^{18}
après plasma	73,9	5700	$4,1 \times 10^{16}$
recuit 61 h	21,9	4800	$1,7 \times 10^{17}$
recuit 143 h	18,6	4500	$2,1 \times 10^{17}$
recuit 332 h	15,2	4200	$2,6 \times 10^{17}$

Tableau II : Mesures par magnétorésistance des caractéristiques électriques de l'échantillon initial, après exposition au plasma et ensuite après avoir subi des recuits à 225°C.

Plasma : 2 W, 20 mn, 220°C.

GaAs:Si dopée à $2 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³ et 0,2 μm d'épaisseur.

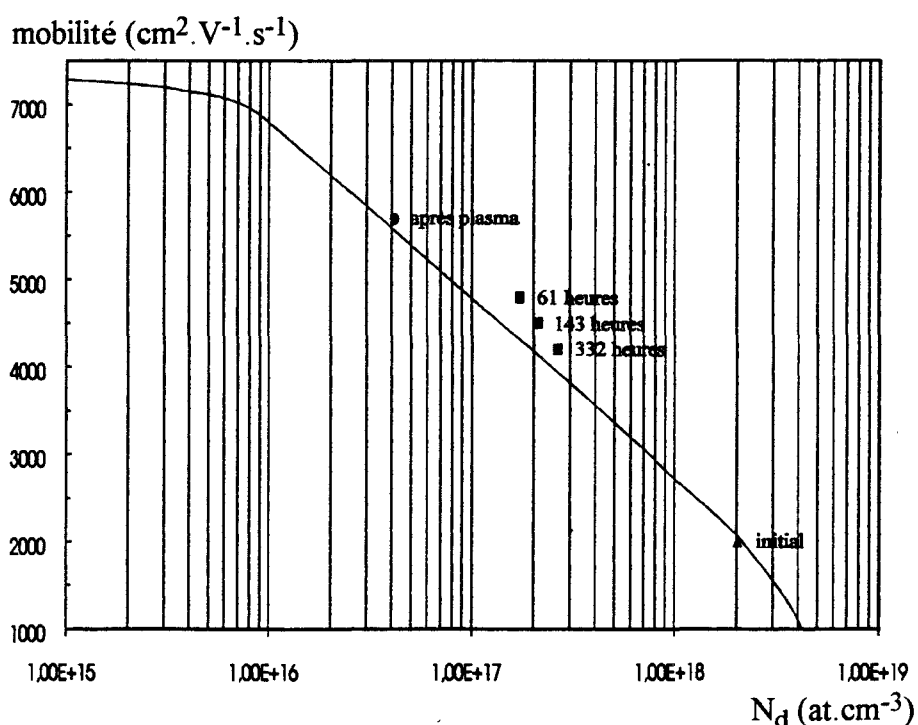


Figure II.8 : Evolution de la mobilité en fonction de la concentration en impuretés ionisées dans des échantillons de GaAs:Si.

— courbe expérimentale (échantillons du bâti MBE du D.H.S.)

▲ caractéristiques de l'échantillon initial : GaAs dopé Si à $2 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³ et de 2000 Å d'épaisseur.

● échantillon hydrogéné à 2 watts pendant 20 minutes et chauffé à 220°C.

■ points expérimentaux mesurés après des recuits à 225°C pour des durées de : 61, 143 et 332 heures.

obtenue à partir des résultats typiques mesurés pour des épitaxies réalisées dans le bâti d'épitanie par jets moléculaires du laboratoire.

En utilisant cette courbe de mobilité ($\mu(N_d^+)$) comme référence, les valeurs de μ et N d'une couche épitanie mesurées après hydrogénation devraient coïncider avec celles déduites de la courbe de référence.

Le but de cette étude est de montrer qu'une couche hydrogénée et recuite, a toujours des mobilités comparables à celles d'une couche épitanie ayant la même concentration de porteurs libres. Les conditions d'hydrogénation ont été choisies de façon à être très douces afin de ne pas abîmer la couche épitanie utilisée. Les mesures ont été effectuées en magnétorésistance à cause de la souplesse d'utilisation de cette méthode et de façon à s'affranchir au moins dans une certaine mesure de l'influence de la zone désertée due au potentiel de surface. Le champ magnétique appliqué dans ces mesures est de 1 Tesla. Par cette méthode, on mesure la résistance R et la mobilité μ de l'échantillon hydrogéné. Connaissant les caractéristiques R_i , μ_i et n_i , de notre semiconducteur avant hydrogénation ainsi que les valeurs de R et μ après hydrogénation, et en supposant que la couche n'a pas été dégradée, nous utilisons la relation suivante pour obtenir la concentration de porteurs libres après hydrogénation :

$$n = \frac{R_i \mu_i n_i}{R \mu} \quad (4)$$

où

- n : concentration en porteurs libres calculée ;
- n_i : concentration en porteurs libres initiale ;
- R_i : résistance initiale ;
- R : résistance mesurée en magnétorésistance après traitement ;
- μ_i : mobilité initiale ;
- μ : mobilité après traitement.

Les valeurs obtenues à partir de la relation (4) sont reportées dans le tableau II et les mobilités obtenues peuvent être comparées à la courbe de référence (figure II.8). On constate que les mobilités obtenues sur l'échantillon hydrogéné initial, et après recuit, sont un peu plus élevées que celles des couches épitanies ayant les mêmes

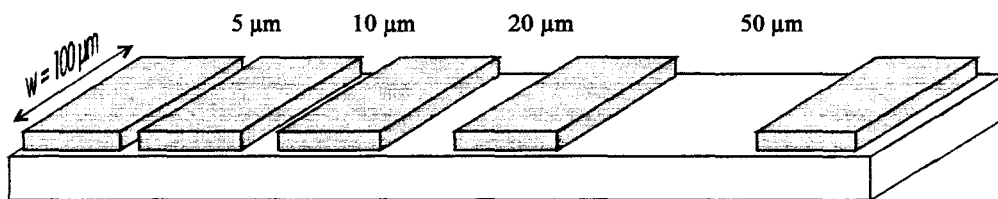


Figure II.9 : Caractéristiques des échelles de résistances utilisées.
 $W = 100 \mu\text{m}$.

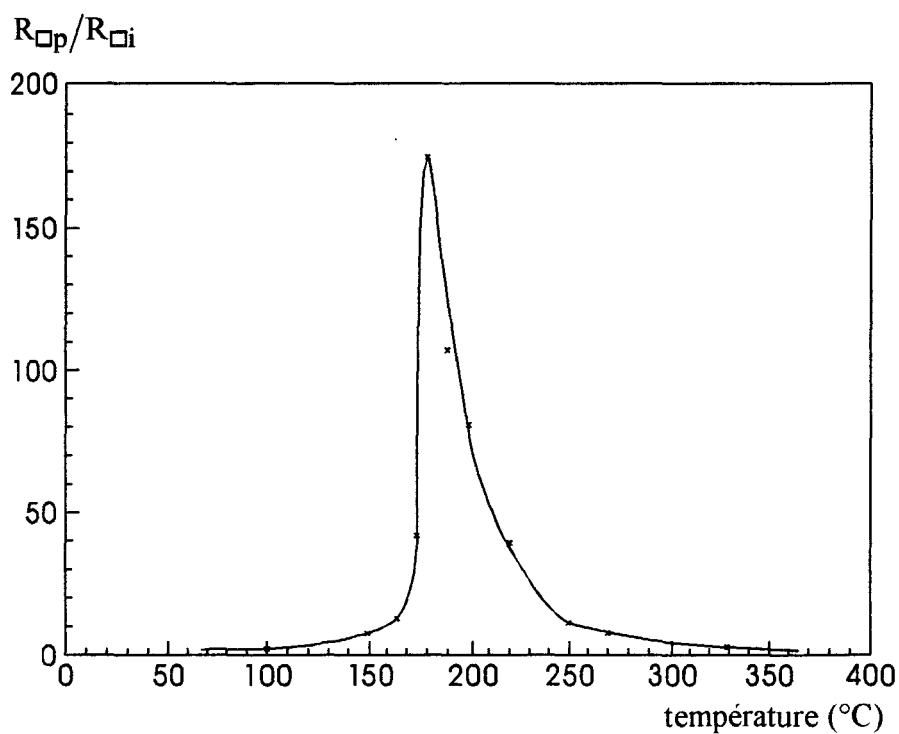


Figure II.10 : Influence de la température de l'échantillon pendant l'exposition au plasma d'hydrogène sur le taux de neutralisation des donneurs.

Plasma : 3 W, 40 mn.

GaAs:Si dopé à $2 \cdot 10^{18} \text{ at. cm}^{-3}$ et de $0,2 \mu\text{m}$ d'épaisseur.

dopages. Ceci peut s'expliquer par le fait que le plasma neutralise non seulement les donneurs mais aussi les impuretés présentes dans la couche. Ces résultats montrent également que les dégâts superficiels effectués sur la couche épitaxiée ne peuvent être que très faibles.

II.1.2.3. Recherche de la température idéale d'exposition au plasma

Les résultats que nous venons d'obtenir semblent très encourageants en ce qui concerne la réalisation de la couche active des transistors pourvu qu'on utilise des plasmas relativement peu puissants, c'est à dire des puissances d'excitation inférieures à 5 watts afin de conserver une couche neutralisée de très bonne qualité. Il nous reste cependant à optimiser la température de l'échantillon pendant l'exposition au plasma avant d'entreprendre la réalisation de transistors. Ce paramètre est très important puisqu'il régit le coefficient de diffusion de l'hydrogène et donc sa profondeur de pénétration.

Pour étudier l'influence de la température sur la neutralisation et la diffusion, il suffit d'exposer au plasma d'hydrogène des échantillons maintenus à différentes températures et de déterminer leurs caractéristiques électriques afin d'étudier leurs évolutions. La mesure de résistances carrées R_{\square} est le moyen le plus simple et le plus rapide pour observer le taux de donneurs neutralisés. La méthode classique pour déterminer la résistance carrée est basée sur la méthode de la ligne de transmission (TLM) [8]. Le dispositif test utilisé est composé de contacts ohmiques espacés de distances l différentes (figure II.9). Ce dispositif est familièrement appelé échelle de résistances. En traçant l'évolution des résistances en fonction de la distance l , on obtient une droite. La pente de cette droite donne $\frac{R_{\square}}{W}$ et connaissant W , la largeur des contacts, nous pouvons accéder à la valeur de la résistance carrée de la couche semiconductrice. L'extrapolation à l'origine de cette droite donne la valeur de $2R_c$, où R_c est la résistance de contact. Les échelles de résistances utilisées possèdent des contacts ohmiques distants de 5, 10, 20 et 50 μm .

Les résultats d'une telle étude sont reportés sur la courbe de la figure II.10. Les rapports des résistances carrées avant et après plasma nous permettent de connaître le degré de la neutralisation. Plus ce rapport est élevé, plus le matériau est neutralisé. La courbe présente un pic à 180°C : à cette température les effets liés à la diffusion et à la

formation des complexes sont compensés par le phénomène de dissociation des complexes qui commence à se manifester. A basse température (inférieure à 100°C) et à très haute température (supérieure à 300°C), on constate en effet que le rapport des résistances est faible et donc que la neutralisation est peu importante. La neutralisation est faible à basse température parce que les atomes d'hydrogène n'ont pas assez d'énergie thermique pour pénétrer dans le matériau et pour former les complexes. Par contre, à très haute température l'agitation thermique est telle que les complexes formés se dissocient. Par ailleurs, la majorité des atomes d'hydrogène délivrés par le plasma diffuse dans le substrat semiconducteur au-delà de l'épitaxie. A partir de 150°C, la neutralisation des atomes donneurs augmente, et à 180°C, on observe un maximum : ceci nous permet de supposer une neutralisation des donneurs très importante. Après 180°C, la neutralisation décroît assez rapidement et on peut attribuer ceci au fait que les atomes étant plus énergétiques à haute température, ils diffusent plus profondément dans le matériau et ont également une plus grande probabilité de diffuser hors du matériau. Une telle étude nous permet de choisir la température de plasma et l'on peut noter qu'un rapport $R_{\square p}/R_{\square i}$ de 20 (largement suffisant pour la réalisation des couches actives des transistors) peut être atteint pour des températures de plasma comprises entre 170°C et 220°C.

	R (5 μm) ohms	R (10 μm) ohms	R (20 μm) ohms	R (50 μm) ohms	R_{\square} ohms	R mesa* ohms
Avant plasma	14	19	28	48	53	120
Après plasma	400 K	400 K	400 K	700 K	1 M	500 K

Tableau III : Résultats des essais d'isolation par hydrogénation sur des échelles de résistances (TLM). L'attaque mesa est remplacée par la neutralisation par hydrogène.

Plasma : 3 W, 180°C, 20 mn.

GaAs:Si (n) dopé à $4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ et de 700 Å d'épaisseur.

*distance entre 2 champs d'échelles de résistance : 560 μm .

Dans la mesure où il est possible d'atteindre des résistances carrées suffisamment importantes, il peut être intéressant d'utiliser l'hydrogénation pour isoler les uns par rapport aux autres les différents composants, et ceci sans utiliser l'attaque mesa qui pose souvent des problèmes lors de la "descente" des grilles submicroniques.

	R(5 μm) ohms	R(10 μm) ohms	R(20 μm) ohms	R(50 μm) ohms
avant plasma	400	400	500	750
après plasma	2 M	4 M	20 M	20 M

Tableau IV : Essai de réalisation d'isolation par hydrogénation sur une couche de type HEMT.
Plasma : 3 W, 5 mn, 220°C.

GaAs:Si (n) $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 150 Å
AlGaAs:Si (n) $x = 0,22$ $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 300 Å
AlGaAs $x = 0,22$ NID 30 Å
GaAs NID 2000 Å
AlGaAs $x = 0,1$ NID 3000 Å
GaAs NID 1000 Å
Substrat S.I.

Figure II.11 : Structure de la couche de type HEMT utilisée dans cette étude.

L'étude des conditions d'hydrogénation nécessaires pour cette étape technologique a été effectuée en collaboration avec S. Mézière et les résultats donnés dans le tableau III montrent qu'il est possible d'obtenir des résistances carrées de l'ordre du Mohm ce qui semble suffisant pour réaliser une telle isolation.

II.1.2.4. Extension de nos études aux couches épitaxiées en GaAlAs

L'étude de la neutralisation de couches semiconductrices en GaAlAs a été effectuée tout particulièrement par le laboratoire de Bellevue en collaboration avec notre laboratoire. Les résultats obtenus pour différentes compositions d'alliages montrent que de façon générale les mêmes phénomènes sont observés : diminution de la concentration de porteurs libres sous l'effet de l'exposition au plasma d'hydrogène et augmentation de leur mobilité. A titre d'exemple, nous donnons dans le tableau IV quelques exemples d'évolutions des propriétés électriques de couches semiconductrices GaAs/GaAlAs (proches de celles utilisées dans la fabrication de HEMT) (figure II.11) lors de l'exposition à un plasma d'hydrogène. On constate que l'on peut aboutir à une neutralisation pratiquement complète des couches avec des temps d'exposition qui sont généralement plus courts que ceux utilisés dans le cas du GaAs. Pour ce type de matériau, il doit donc être également possible d'éviter l'attaque mesa pour isoler les composants entre eux.

II.2. LA DENEUTRALISATION

Dans la première partie de ce chapitre, pour l'étude de la dégradation de surface due au plasma, nous avons utilisé une des propriétés de l'hydrogène dans les semiconducteurs [3] : la réactivation des complexes sous l'effet d'une élévation de température et donc d'un recuit. En effet, dans le GaAs:Si hydrogéné, les complexes hydrogène-silicium se dissocient lorsque suffisamment d'énergie leur est fournie. Les donneurs formant les complexes peuvent être réactivés de trois façons différentes :

- par élévation de température ;
- par exposition aux ultraviolets ;
- par exposition à un faisceau d'électrons.

Si le premier effet était bien connu au démarrage de ce travail, les deux autres l'étaient beaucoup moins et leur étude va se révéler particulièrement intéressante pour la réalisation de composants.

La possibilité de détruire les complexes neutres dans les matériaux hydrogénés et la diversité des moyens nous permettant d'y parvenir, rendent le phénomène de neutralisation des donneurs par l'hydrogène particulièrement intéressant. Les possibilités multiples offertes par ce nouveau procédé pour la réalisation des composants sont accrues car les différents moyens dont nous disposons pour réactiver les complexes vont se révéler comme nous allons le montrer complémentaires :

- le recuit thermique permet d'agir sur le matériau hydrogéné en volume ;
- les expositions aux ultraviolets à l'aide d'un masque approprié peuvent agir localement ou complètement sur la zone hydrogénée ;
- le faisceau d'électrons permet de réactiver des zones de très petites dimensions et ceci de façon très précise.

Afin d'exploiter pleinement les différents moyens permettant de réactiver les complexes Si-H, il nous faut étudier successivement l'influence du recuit thermique, puis de l'exposition aux ultraviolets et enfin aux électrons, sur les phénomènes de décomplexation et de neutralisation.

II.2.1. La réactivation thermique

Le fait de pouvoir désactiver les complexes par chauffage thermique est un avantage lorsque nous voulons ajuster le taux de neutralisation d'un matériau hydrogéné pour modifier ses caractéristiques électriques. Un recuit thermique sur un matériau hydrogéné a pour effet de diminuer le taux de neutralisation. Ceci se traduit par une augmentation de la concentration en porteurs libres et par une diminution de la mobilité. Mais ce phénomène peut être un inconvénient pour les composants si, pendant leur utilisation, ils sont soumis à des températures importantes favorisant la réactivation des complexes. Il est donc nécessaire pour la suite de ce travail de connaître l'effet de la température sur le phénomène de décomplexation : par exemple, à quelle température la réactivation commence-t-elle à se manifester et au-delà de

quelle température le taux de complexes existant dans un matériau hydrogéné risque-t-il de se modifier ? Pour étudier ce phénomène, il nous a semblé intéressant d'étudier l'évolution du taux de neutralisation d'échantillons hydrogénés soumis à différents recuits.

II.2.1.1. Définition de la concentration de complexes et du taux de complexation

Avant d'entreprendre cette étude, il faut d'abord donner la définition de la concentration de complexes d'un matériau hydrogéné, et du taux de complexes restant après avoir fait subir un traitement thermique au matériau hydrogéné. Les études précédentes faites à Bellevue ont montré que la neutralisation est due à la formation d'un complexe neutre se composant d'un atome d'hydrogène et d'un atome donneur [6]. La concentration de complexes est donc simplement le nombre d'impuretés complexées avec un atome d'hydrogène existant par unité de volume après exposition au plasma. Cette définition étant faite, nous pouvons calculer cette concentration en appliquant le raisonnement suivant : si on nomme N_D la concentration initiale d'impuretés ionisées et N_{Dp} la concentration d'impuretés ionisées restant dans le matériau après hydrogénation, la relation ci-dessous nous donne la concentration N_0 de complexes formés après exposition au plasma d'hydrogène :

$$N_0 = N_D - N_{Dp} \quad (5)$$

Quand l'échantillon hydrogéné est soumis à un recuit thermique, à une température supérieure à 180°C [9], le phénomène de réactivation des complexes se produit. Les complexes Si-H formés lors de l'hydrogénation se dissocient et l'hydrogène ainsi libéré diffuse hors de l'échantillon : la concentration de complexes diminue. En appliquant le même raisonnement que ci-dessus, la concentration de complexes N restant après exposition au plasma et recuit est donnée par :

$$N = N_D - N_{Dpr} \quad (6)$$

où N_{Dpr} est la concentration d'impuretés ionisées après plasma et recuit.

De ces deux relations (5) et (6), on déduit le pourcentage de complexes restant après recuit :

$$\frac{N}{N_0} = \frac{N_D - N_{Dpr}}{N_D - N_{Dp}} \quad (7)$$

Ce taux de complexes peut aussi s'écrire :

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1 - \frac{N_{Dpr}}{N_D}}{1 - \frac{N_{Dp}}{N_D}} \quad (8)$$

où

- $\frac{N_{Dp}}{N_D}$ est le taux de donneurs restant après hydrogénation ;
- $\frac{N_{Dpr}}{N_D}$ est le taux de donneurs restant après hydrogénation et recuit.

Ces définitions sont importantes pour l'étude que nous allons entreprendre sur l'influence du recuit thermique sur les complexes Si-H.

II.2.1.2. Evolution du taux de complexes en fonction de la température

Comme pour les études expérimentales précédentes, nous avons utilisé des échelles de résistances réalisées sur des couches épitaxiées de faible épaisseur. Ces échelles ont été hydrogénées dans des conditions idéales et douces pour obtenir une neutralisation importante (c'est-à-dire une grande partie des dopants neutralisés) et pour causer le moins de dégradations possibles au niveau de la couche superficielle. Les échantillons ont été ensuite recuits pendant 20 minutes à des températures différentes. Puisque le matériau n'a pas été endommagé superficiellement dans les

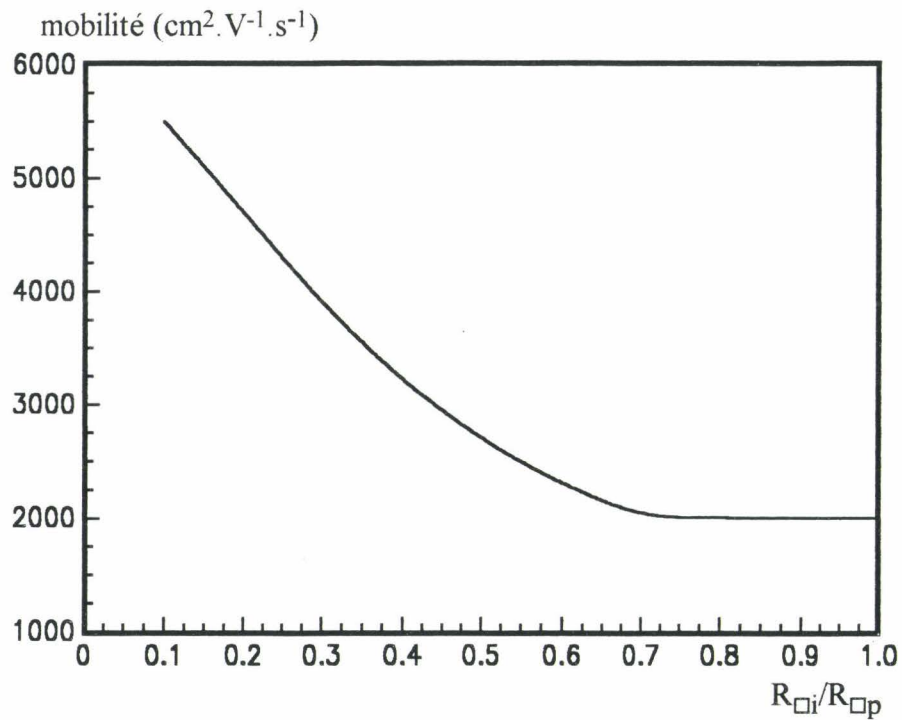


Figure II.12 : Evolution de la mobilité en fonction du rapport des résistances carrées avant et après hydrogénation pour du GaAs de type n dopé Si à $2 \cdot 10^{18} \text{ at.cm}^{-3}$ et de $0,2 \mu\text{m}$ d'épaisseur. Les mobilités ont été mesurées par magnétorésistance et les expositions au plasma ont été faites à 2 watts, 200°C et pour des temps d'hydrogénation variables.

conditions de plasma utilisées, les résistances carrées correspondant aux échantillons initiaux, après exposition au plasma puis après exposition au plasma et recuit s'écrivent respectivement $R_{\square i}$, $R_{\square p}$ et $R_{\square pr}$, et obéissent aux équations suivantes :

$$\frac{R_{\square i}}{R_{\square p}} = \frac{\mu_p N_{Dp}}{\mu_i N_D} \quad (9)$$

et

$$\frac{R_{\square i}}{R_{\square pr}} = \frac{\mu_{pr} N_{Dpr}}{\mu_i N_D} \quad (12)$$

Ces équations sont obtenues en admettant la neutralité électrique dans le semiconducteur, c'est-à-dire la concentration en électrons égale à la concentration en impuretés ionisées et non complexées.

Au cours de nos différentes études préliminaires, il nous a été possible de tracer une "courbe de référence" représentant l'évolution de la mobilité (μ) de la couche semiconductrice en fonction du rapport $\frac{R_{\square i}}{R_{\square p}}$ (figure II.12) pour une couche semiconductrice identique et hydrogénée dans des conditions de plasma similaires (même puissance et même température). Différents temps d'exposition au plasma ont cependant été appliqués afin d'obtenir la variation du rapport des résistances carrées. Les mobilités de ces échantillons hydrogénés reportées dans cette courbe de référence ont été mesurées par la méthode de magnétorésistance. Cette courbe de référence de $\mu\left(\frac{R_{\square i}}{R_{\square p}}\right)$ nous permet, connaissant les rapports des résistances carrées des échantillons hydrogénés et de ces mêmes échantillons hydrogénés puis recuits, d'accéder à la valeur des mobilités après exposition au plasma et après exposition au plasma puis recuit, que nous noterons respectivement μ_p et μ_{pr} . La mobilité initiale μ_i est connue puisque la couche utilisée pour la courbe de référence $\mu\left(\frac{R_{\square i}}{R_{\square p}}\right)$ et celle utilisée dans cette étude proviennent de la même couche "mère" et ont donc les mêmes caractéristiques. A

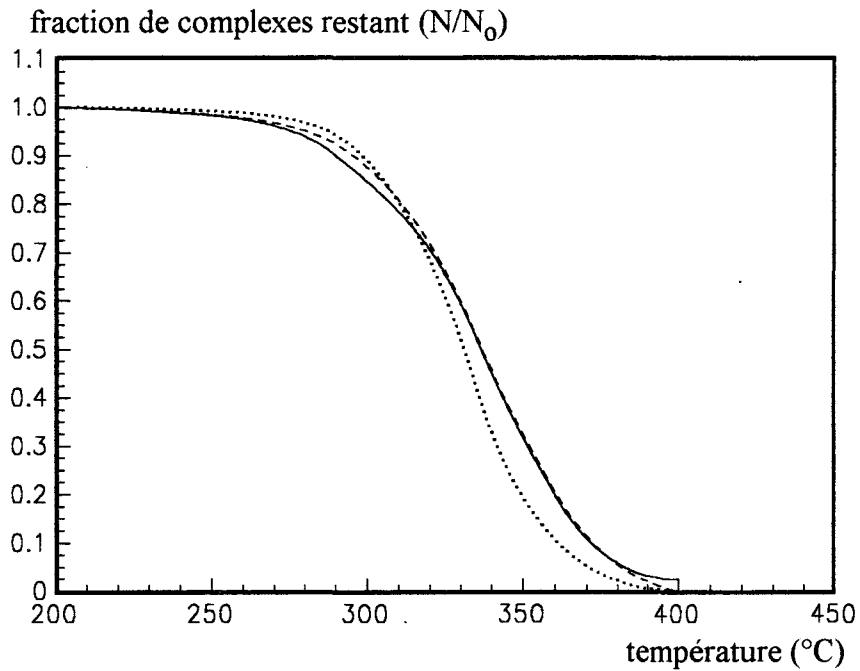


Figure II.13 : Evolution théorique et expérimentale de la fraction de complexes Si-H restant dans des échantillons de GaAs (n) hydrogénés et recuits. Les recuits ont une durée de 20 minutes. Plasma : 3 W, 180°C, 40 mn. GaAs:Si (n) dopé à $2 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³ et de 0,2 μm d'épaisseur.

— expérimentale.
 ---- $E_D = 1,465$ eV, $\nu = 7,1 \cdot 10^8$ s⁻¹.
 $E_D = 1,95$ eV, $\nu = 10^{13}$ s⁻¹.

partir des équations (9) et (10), nous pouvons facilement déduire les valeurs des taux de donneurs non complexés après traitement :

$$\frac{N_{Dp}}{N_D} = \frac{\mu_i R_{\square i}}{\mu_p R_{\square p}} \quad (11)$$

et

$$\frac{N_{Dpr}}{N_D} = \frac{\mu_i R_{\square i}}{\mu_p R_{\square pr}} \quad (12)$$

En remplaçant les fractions des donneurs non complexés dans la relation (8), nous obtenons finalement :

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1 - \frac{\mu_i R_{\square i}}{\mu_{pr} R_{\square pr}}}{1 - \frac{\mu_i R_{\square i}}{\mu_p R_{\square p}}} \quad (13)$$

L'évolution du taux de complexes restant en fonction de la température de recuit d'une durée de 20 minutes est représentée sur la figure II.13. On remarque que la décomplexation est faible pour des températures inférieures à 275°C : par exemple, le matériau hydrogéné ne perd qu'un dixième de ses complexes à 275°C. Au-dessus de cette température, la décomplexation se fait assez facilement et on constate qu'un recuit à 350°C détruit plus de 50 % des complexes Si-H et qu'au-delà de cette température presque tous les complexes sont dissociés après un temps de recuit de 20 minutes.

On peut se demander dans quelle mesure, la stabilité thermique des couches hydrogénées dépend des conditions de neutralisation qui pourraient éventuellement influencer sur le type de complexes formés et aussi sur leur tenue en température. Dans ce but, en collaboration avec S. Mézière, nous avons neutralisé des couches épitaxiées en utilisant des températures d'exposition du semiconducteur au plasma très différentes (150°C, 180°C et 270°C). Les temps d'exposition au plasma ont été ajustés de façon à obtenir une neutralisation très voisine dans les trois cas considérés et un taux de

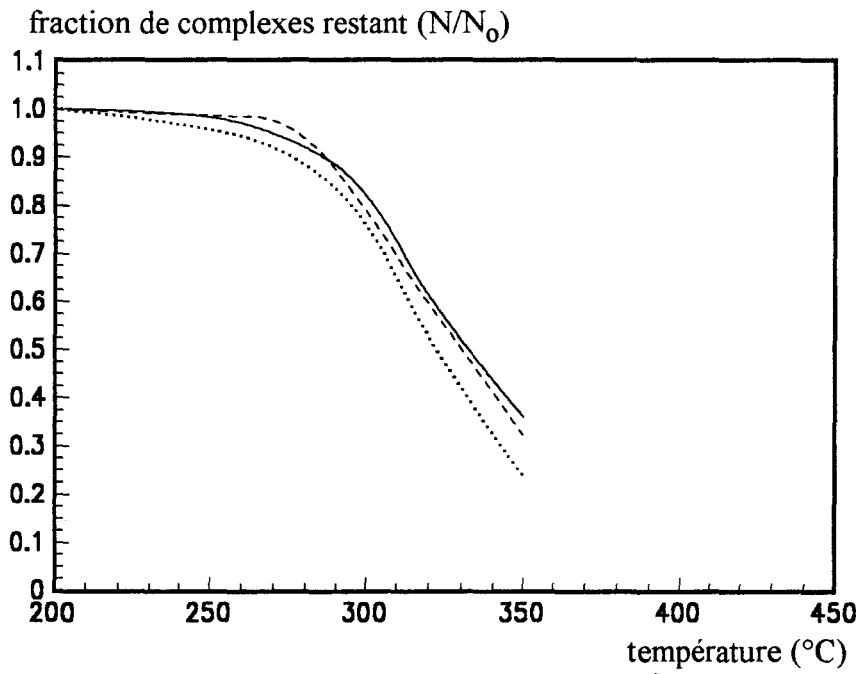


Figure II.14 : Evolution de la fraction de complexes restant dans des échantillons de GaAs (n) hydrogénés en fonction de la température de recuit. La durée de recuit est de 1 heure.
 GaAs:Si (n) dopé à $2 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³ et de 0,2 μ m d'épaisseur.
 ---- plasma : 3W, 150°C, 60 mn.
 plasma : 3W, 180°C, 40 mn.
 — plasma : 3W, 270°C, 90 mn.

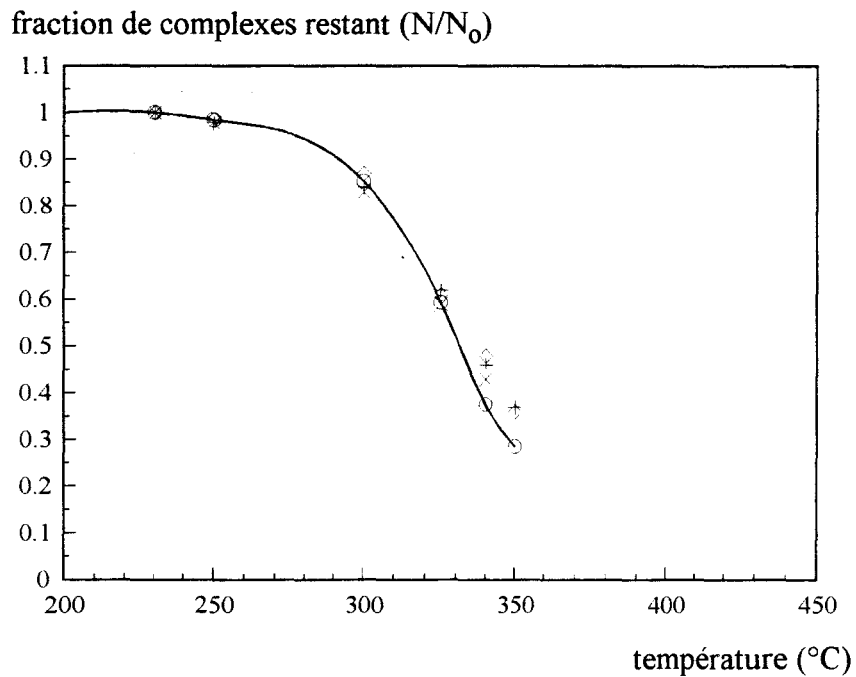


Figure II.15 : Fraction de complexes neutres restant dans des échantillons de GaAs hydrogénés avec ou sans couche de nitrure de silicium. Durée des recuits : 40 minutes.
 GaAs:Si (n) dopé à $2 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³ et de 0,2 μ m d'épaisseur.
 x : plasma : 10W, 200°C, 45 mn.
 + : plasma : 10W, 200°C, 45 mn, recouverte de nitrure.
 \diamond : plasma : 25W, 220°C, 90 mn.
 O : plasma : 25W, 220°C, 90 mn, recouverte de nitrure.

complexation final proche de 100 %. L'effet d'un recuit à température croissante a ensuite été étudié. Les résultats sont donnés sur la figure II.14. Aux erreurs de détermination près, on obtient des résultats quasi-identiques et ceci montre que dans les trois cas de figure, les complexes formés doivent être de même type. Par ailleurs, on peut constater que la stabilité thermique est très voisine de celle observée sur la figure II.13 ou encore lors des études effectuées à Bellevue (figure II.15).

II.2.1.3. Calcul de l'énergie de dissociation des complexes et estimation de la "durée de vie" de composants réalisés à partir de couches hydrogénées

A partir de ces résultats, il est possible d'obtenir des informations plus quantitatives sur la dissociation thermique des complexes. Il est largement admis que la dissociation obéit à une loi cinétique de premier ordre [3, 10]. On peut donc calculer le taux de complexes restant après recuit à partir de la relation suivante :

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\nu \exp\left(-\frac{E_D}{kT}\right) t\right) \quad (14)$$

avec

- $\frac{N}{N_0}$: taux de complexes restant après recuit ;
- t : temps de recuit ;
- T : température de recuit ;
- ν : fréquence de dissociation.

Il est donc intéressant de rechercher le couple de valeurs correspondant d'une part à la fréquence de dissociation ν et d'autre part à l'énergie de dissociation E_D qui permet d'obtenir à partir de la relation (14) le meilleur accord avec l'expérience. On constate (figure II.13) qu'un bon accord est obtenu en prenant $\nu = 7,1 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$ et $E_D = 1,465 \text{ eV}$. Le problème est qu'en prenant une valeur de ν fort différente (par exemple : $\nu = 10^{13} \text{ s}^{-1}$) on obtient en prenant une valeur de E_D plus élevée (par exemple 1,95 eV) un accord qui reste encore assez satisfaisant compte tenu de la précision des déterminations expérimentales comme on peut le constater sur la figure II.13. Ceci montre toute la difficulté de détermination de E_D , ce qui se reflète à la

	Température					
	100°C	120°C	150°C	170°C	200°C	250°C
$E_D = 1,465 \text{ eV}$	180 ans	18 ans	0,8 ans	49,2 h	4,3 h	3,3 h
$E_D = 1,950 \text{ eV}$	29115 ans	1332 ans	22 ans	2 ans	28 h	7,2 h

Tableau V : Estimation de la durée de vie des composants.

lecture de la littérature internationale où des valeurs comprises entre 1,2 eV et 2,1 eV ont été obtenues [10-14]. Remarquons que notre estimation $1,465 \text{ eV} < E_D < 1,95 \text{ eV}$ est bien encadrée par ces deux valeurs limites, et, il faut le souligner, que cette énergie correspond à la somme de l'énergie de liaison des complexes et de l'énergie de migration des atomes d'hydrogène [13].

L'intérêt de procéder à une évaluation quantitative de E_D réside dans le fait que, si on connaît cette valeur, on peut procéder à une évaluation de la durée de vie des composants utilisant des couches hydrogénées. Si, de façon un peu arbitraire, on fixe à 10 % le nombre de complexes qui peuvent par activation thermique être décomplexés sans que les propriétés du composant soient significativement modifiées, on peut évaluer cette durée de vie par la relation suivante :

$$t_{\text{vie}} = \frac{t_0 \exp \frac{E_D}{kT}}{\exp \frac{E_D}{kT_0}} \quad (15)$$

où

- T est la température de fonctionnement du composant ;
- t_0 est le temps de recuit nécessaire à la température T_0 pour obtenir une dissociation des complexes de 10 %.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau V pour deux valeurs de E_D correspondant aux deux valeurs limites de notre fourchette de détermination. On obtient ainsi, pour une température de fonctionnement de 150°C, une durée de vie comprise (suivant la valeur retenue pour E_D) entre 0,8 ans et 22 ans. Un tel résultat apparaît acceptable pour la plupart des composants utilisés en pratique.

II.2.2. Réactivation par exposition aux U.V.

Au cours d'un certain nombre d'études effectuées sur des échantillons hydrogénés, nous avons eu l'occasion de constater une évolution des caractéristiques électriques après avoir exposé les échantillons semiconducteurs à un éclairage U.V. important : les résistances carrées des couches diminuent après exposition à la lumière.

	avant plasma	après plasma	Temps d'exposition aux ultraviolets			
			10 mn	30 mn	40 mn	50 mn
R (5 μm) Ω	400	2 M	100 K	6000	2500	700
R (10 μm) Ω	400	4 M	500 K	4000	3000	1000
R (20 μm) Ω	500	20 M	300 K	6000	3000	1000
R (50 μm) Ω	750	20 M	300 K	5000	1900	900

Tableau VI : Effets des ultraviolets sur une couche de GaAs/AlGaAs hydrogénée (figure II.11) où on a enlevé la couche superficielle de GaAs.

Plasma : 3 W, 220°C, 20 mn.

	avant plasma	après plasma	Exposition aux ultraviolets					
			10 mn	20 mn	30 mn	40 mn	50 mn	60 mn
R $_{\square}$ (ohms)	53	1 M	900	600	380	270	230	210

Tableau VII : Evolution de la résistance carrée en fonction du temps d'exposition aux ultraviolets (longueur d'onde $_{\text{max}}$: 365 nm) d'un échantillon de GaAs:Si hydrogéné.

Plasma : 3 W, 180°C, 20 mn.

GaAs dopé Si à $4 \cdot 10^{18}$ at.cm $^{-3}$ et de 700 Å d'épaisseur.

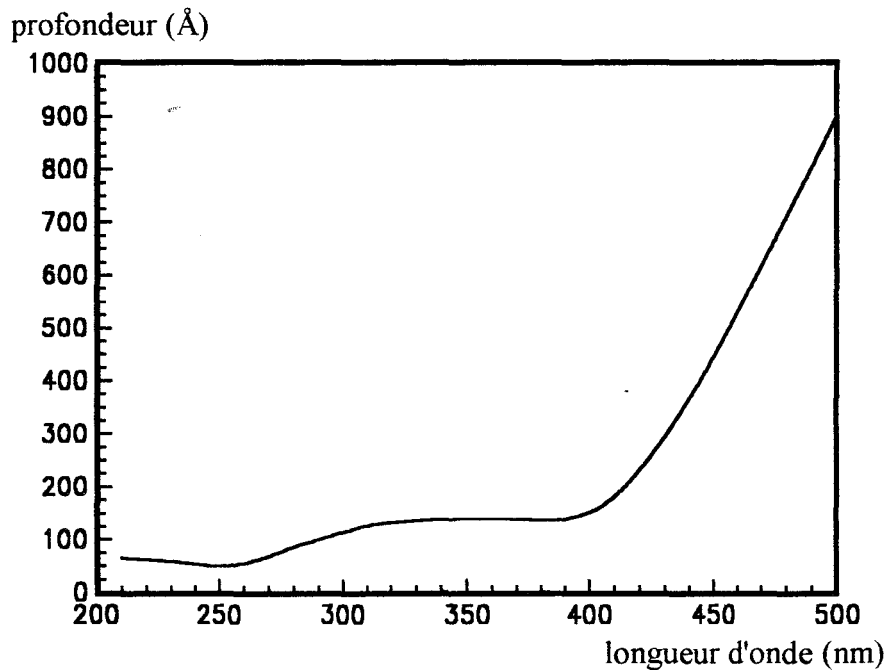


Figure II.16 : Evolution de la profondeur de pénétration d'une onde électromagnétique dans du GaAs en fonction de sa longueur d'onde.

Un tel effet montre que, sous l'influence d'une onde électromagnétique de fréquence suffisamment élevée, les complexes formés entre l'hydrogène et le silicium doivent se dissocier.

L'étude approfondie de ces phénomènes a été entreprise en étroite collaboration avec S. Mézière et D. Loridant [16]. Elle est actuellement en cours et nous ne donnerons ici qu'un résumé des résultats les plus importants dans la mesure où ils nous serviront dans la réalisation technologique des composants.

Des études préliminaires ont montré que la décomplexation était généralement d'autant plus importante que :

- le rayonnement électromagnétique était de fréquence élevée (ultraviolet plutôt qu'infrarouge) ;
- l'épaisseur de la couche épitaxiée dopée et conductrice était faible.

Afin d'étudier plus quantitativement les phénomènes, nous avons donc utilisé des sources de rayonnement de puissance contrôlée et de spectre connu, c'est-à-dire :

- soit une source U.V. intense associée à un spectromètre ;
- soit, plus simplement dans la réalisation de composants, la source U.V. utilisée dans les opérations d'alignement en lithographie ($\lambda_{\max} = 365 \text{ nm}$).

Les tableaux VI et VII donnent quelques exemples de résultats obtenus avec l'aligneur : on note que dans le cas de couches assez fines, il est possible de décomplexer une partie notable des complexes tant dans le cas du GaAs que du GaAlAs. Dans le cas de couches plus épaisses les effets observés sont plus faibles. Ce phénomène peut s'expliquer simplement en tenant compte de l'épaisseur de pénétration dans le matériau de l'onde lumineuse. Plus la fréquence est élevée, plus la profondeur de pénétration de l'onde électromagnétique est faible (figure II.16) [15] et moins les complexes peuvent être dissociés sur une épaisseur importante. Mais il faut aussi tenir compte du fait que plus la fréquence est élevée plus l'énergie des photons est importante et plus la probabilité de dissociation des complexes formés est élevée. Une étude quantitative effectuée dans le cadre du DEA de D. Loridant [16] a permis de vérifier ce phénomène qui est bien résumé sur la figure II.17, où l'on voit que l'efficacité des photons augmente considérablement lorsque leur longueur d'onde diminue.

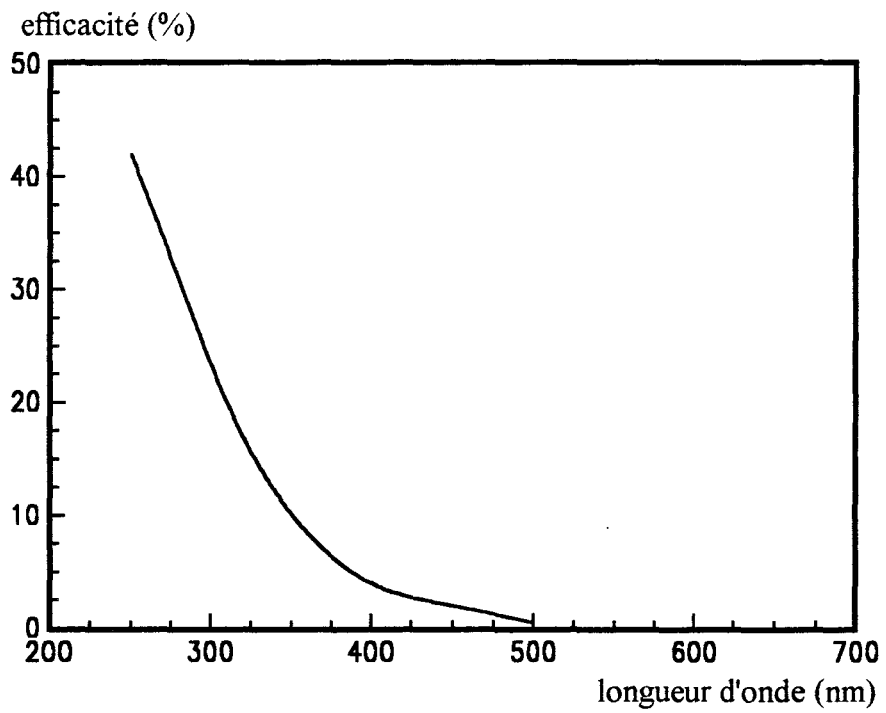


Figure II.17 : Evolution de l'efficacité de décomplexation par une onde électromagnétique dans du GaAs:Si (n) hydrogéné en fonction de sa longueur d'onde.

Dopage initial : $2 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³, épaisseur : 0,2 μ m.

Plasma : 3 W, 200°C, 60 mn.

Si on désire utiliser l'exposition à un rayonnement ultraviolet ou visible pour dissocier de façon locale les complexes formés par hydrogénation, il faut tenir compte de l'épaisseur de la couche à déneutraliser :

- si l'épaisseur est importante (plus de 1000 Å), il faut utiliser des rayonnements de fréquences pas trop élevées, mais l'efficacité des photons étant faible, il faut utiliser des temps d'exposition importants ;
- si l'épaisseur est suffisamment faible (quelques centaines d'Angströms), on peut alors utiliser des rayonnements U.V. de courtes longueurs d'onde et l'efficacité des photons étant importante, des temps d'exposition très courts peuvent alors être utilisés.

II.2.3. L'influence du faisceau d'électrons

Quand une couche semiconductrice hydrogénée est exposée aux ondes électromagnétiques, les complexes Si-H sont détruits et comme l'ont montré S. Mézière et D. Loridant, les ondes les plus énergétiques sont les plus efficaces pour dissocier le complexe. Malheureusement, les effets sont alors obtenus sur de très faibles profondeurs. Il serait donc intéressant pour obtenir davantage d'efficacité d'utiliser des énergies plus grandes et des ondes ou des particules pouvant pénétrer plus profondément dans le matériau semiconducteur. Or, l'énergie du faisceau d'électrons d'un masqueur électronique est beaucoup plus élevée et est largement réglable. Par ailleurs, le diamètre du faisceau est également réglable et peut être extrêmement fin. Cette méthode de réactivation présente d'autres avantages : le masqueur électronique utilise des marques de repérage pour positionner le faisceau d'électrons en un point précis et, de plus, la taille et la zone de balayage du faisceau étant réglables, il devrait être possible de réaliser une décomplexation et donc une déneutralisation des impuretés dans des zones très localisées et repérées précisément dans le composant. Dans ce but, il faut étudier l'influence d'une exposition au faisceau électronique sur les phénomènes de dissociation du complexe Si-H.

Les travaux que nous avons réalisés sont malheureusement très partiels. De plus, le masqueur électronique utilisé au début de ce travail était "obsolète" ou du moins n'était pas conçu pour ce type d'étude et donc les paramètres influant sur le faisceau d'électrons étaient peu accessibles et peu réglables. Afin de faire varier les

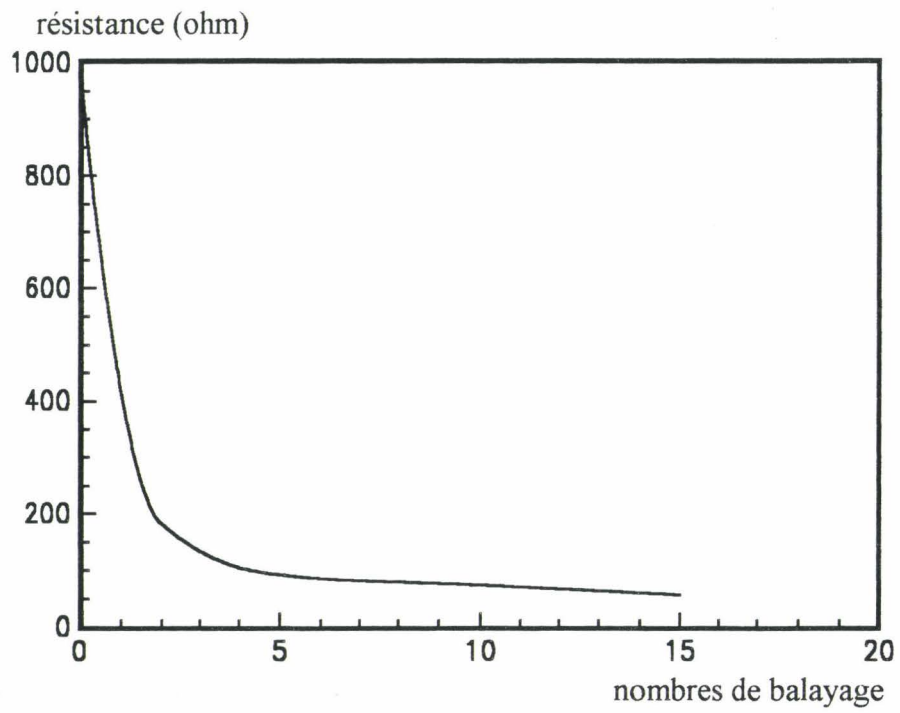


Figure II.18 : Effet de balayages successifs du faisceau d'électrons sur la résistance d'un échantillon de GaAs:Si (n) hydrogéné.
Dopage initial : $2 \cdot 10^{18}$ at.cm⁻³, épaisseur : 0,2 μ m.
Plasma : 10 W, 200°C, 60 mn.
Fréquence du faisceau : 1 KHz.
Surface balayée : 5 x 100 μ m.

doses lors d'une exposition aux électrons, on a fait varier la fréquence et le nombre de passages du faisceau. Les résultats préliminaires obtenus sont reportés dans les tableaux VIII et IX :

	avant plasma	après plasma	Temps (mn)			
			1	3	7	15
R (Ω)	5	6000	21	12,5	11,6	10

Tableau VIII : Variation de la résistance d'un canal de 5 μm hydrogéné après passage du faisceau d'électrons.
 plasma : 10 W, 200°C, 60 mn.
 GaAs:Si dopé à $2 \cdot 10^{18}$ at cm^{-3} et d'épaisseur de 2000 Å.
 fréquence du faisceau : 50 KHz.

	avant plasma	après plasma	Fréquence de balayage (KHz)	
			1	50
R (Ω)	7	∞	120	1333

Tableau IX : Evolution de la résistance d'un canal de 5 μm hydrogéné en fonction de la fréquence de balayage du faisceau d'électrons.
 plasma : 30 W, 60 mn, 200°C.
 GaAs:Si dopé à $2 \cdot 10^{18}$ at cm^{-3} et d'épaisseur de 2000 Å.

Ces résultats montrent que le faisceau d'électrons du masqueur électronique peut être utilisé pour décomplexer une couche semiconductrice hydrogénée et on constate comme prévu que la décomplexation est d'autant plus importante que le nombre de passages du faisceau d'électrons est grand et que la fréquence de balayage est faible. Notre but est d'utiliser cette méthode pour décomplexer les matériaux semiconducteurs hydrogénés dans des zones très localisées. C'est pourquoi nous avons étudié l'effet de balayages électroniques successifs à basse fréquence sur un matériau fortement neutralisé. Sur la figure II.18, on remarque qu'en réglant le nombre de passages du faisceau il est possible de déneutraliser progressivement une zone semiconductrice initialement hydrogénée et d'y régler à volonté le dopage actif.

CONCLUSION

Les différentes études présentées dans ce chapitre ont été entreprises afin d'acquérir une meilleure connaissance des phénomènes de neutralisation et de déneutralisation dans une couche mince semiconductrice. Elles ont permis de déterminer les conditions de plasma d'hydrogène optimales pour réaliser une bonne neutralisation avec peu de dégradations de la couche superficielle. Les études sur la décomplexation par U.V. et par faisceau d'électrons ont permis d'obtenir des résultats nouveaux et encourageants. Ces procédés devraient pouvoir être utilisés pour l'élaboration de composants. Nous sommes donc maintenant en mesure d'entreprendre les réalisations de transistors à effet de champ hydrogénés.

BIBLIOGRAPHIE

1. N. Caglio, 'Réalisation de transistors à effet de champ en GaAs par la neutralisation des donneurs légers par hydrogène atomique', Thèse de docteur, Lille, 1989
2. E. Constant, N. Caglio, J. Chevallier et J. C Pesant, 'Fabrication of a new type of field effect transistor using neutralisation of shallow donors by atomic hydrogen in n-GaAs (Si)', *Electronics Letters*, **23**, (16), pp. 841-843, 1987
3. J. Chevallier, W. C. Dautremont-Smith, C. W. Tu et S. J. Pearton, 'Donor neutralisation in GaAs(Si) by atomic hydrogen', *Appl. Phys. Lett.*, **47**, (2), pp. 108-110, 1985
4. A. Jalil, J. Chevallier, J. C. Pesant, R. Mostefaoui, B. Pajot, P. Murawala et R. Azoulay, 'Infrared spectroscopic evidence of silicon related hydrogen complexes in hydrogenated n-type GaAs doped with silicon', *Appl. Phys. Lett.*, **50**, (8), pp. 439-441, 1987
5. B. Pajot, 'Hydrogen passivation of shallow donors and acceptors in GaAs', *International Conference on Shallow Impurities in Semiconductors*, Linköping, Suède, *Inst. Phys. Conf. Ser.* 85, chapitre 7, 1988
6. B. Pajot, R. C. Newman, R. Murray, A. Jalil, J. Chevallier et R. Azoulay, 'High-resolution infrared study of the neutralisation of silicon donors in gallium arsenide', *Phys. Rev B*, **37**, (8), pp. 4188-4195, 1988
7. A. Jalil, 'Etude des interactions hydrogène-dopant dans l'arséniure de gallium', Thèse de docteur, Paris VI, 1988
8. R. Williams, 'Modern GaAs processing methods', Artech House, 1990
9. R. Rysk, B. Theys, J. C. Pesant, J. Chevallier, M. Aucourturier et B. Pajot, 'Deuterium effusion from crystalline n-type GaAs (Si)', *Phys. Rev B*, **47**, (23), pp. 15523-15532, 1993
10. S. J. Pearton, W. C. Dautremont-Smith, J. Chevallier, C. W. Tu et K. D. Cummings, 'Hydrogenation of shallow-donor levels in GaAs', *J. Appl. Phys.*, **59**, pp. 2821-2827, 1986
11. H. Y. Cho, E. K. Min, S. Min, K. J. Chang et C. Lee, 'Electric-field-enhanced dissociation of the hydrogen-Si complex in GaAs', *J. Appl. Phys.*, **68**, (10), pp. 5077-5080, 1990

12. H. Y. Cho, S. Min, K. J. Chang et C. Lee, 'Negatively charged state of atomic hydrogen in n-type GaAs', *Phys. Rev. B*, **44**, (24), pp. 13779-13782, 1991
13. G. Roos, N. Johnson, C. Herring et J. S. Harris, 'Thermal dissociation energy of the Si-H complex in n type GaAs', *Appl. Phys. Lett.*, **59**, (4), pp. 461-463, 1991
14. S. J. Pearton, C. R. Abernathy et J. Lopata, 'Thermal stability of dopant-hydrogen pairs in GaAs', *Appl. Phys. Lett.*, **59**, (27), pp. 3571-3573, 1991
15. D. E. Aspnes et A. A. Studna, 'Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs and InSb from 1,5 to 6,0 eV', *Phys. Rev. B*, **27**, (15), pp. 985-1009, 1983
16. D. Lorient, 'Structure photoconductrices hydrogénées en GaAs pour la dosimétrie à U.V.', D.E.A., Lille, 1994

Chapitre III

CHAPITRE III

Réalisation et caractérisation des transistors à effet de champ hydrogénés

INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous nous proposons de présenter la démarche suivie pour réaliser des transistors à effet de champ de plus en plus performants élaborés à partir de couches hydrogénées. Dans ce but, après avoir décrit les procédés "classiques" utilisés habituellement pour réaliser un transistor à effet de champ, nous dégagerons les inconvénients présentés par la structure ainsi réalisée et nous essaierons de définir une structure "idéale" qui permettrait de les éviter.

Ayant à l'esprit cette structure, nous essaierons d'étudier progressivement comment, en utilisant les nouvelles possibilités présentées par le procédé d'hydrogénation de neutralisation ou de déneutralisation des impuretés, il est possible de réaliser des transistors dont la structure se rapproche de celle idéale précédemment définie. Bien entendu cette démarche ambitieuse n'a pu et ne peut se réaliser que progressivement. C'est pourquoi nous décrirons successivement les différents essais qui ont été effectués pour fabriquer des TEC hydrogénés ayant une structure de plus en plus voisine de la structure de référence en utilisant tout d'abord la neutralisation et la déneutralisation en volume puis les nouvelles possibilités ouvertes par la dissociation locale des complexes sous l'effet d'une irradiation U.V. ou électronique.

Compte tenu de la nouveauté des procédés utilisés, en particulier ceux utilisant les ultraviolets et les électrons, il nous a paru raisonnable de concentrer l'étude sur la réalisation de MESFET GaAs. Néanmoins, les premiers résultats obtenus dans la fabrication de HIGFET seront présentés.

III.1. REALISATION DE MESFET CLASSIQUES OU HYDROGENES ?

III.1.1. Le procédé classiquement utilisé pour la réalisation de MESFET

Il est important pour mettre au point la technologie de fabrication de transistors hydrogénés de type MESFET de présenter la technologie MESA habituellement utilisée au laboratoire pour la réalisation des MESFET "classiques". Ces transistors sont réalisés sur une couche de GaAs dopée silicium de type N⁺N (figure III.1) élaborée par épitaxie par jets moléculaires.

GaAs:Si (n) 10 ¹⁸ à 4.10 ¹⁸ at.cm ⁻³ 300 à 1200 Å
GaAs:Si (n) 2.10 ¹⁷ à 9.10 ¹⁷ at.cm ⁻³ 600 à 1200 Å
GaAs NID 6000 à 8000 Å
GaAs semi-isolant

Figure III.1 : Caractéristiques des couches généralement utilisées pour la réalisation de MESFET.

La première étape de ce procédé consiste à isoler les composants entre eux. Pour cela, on masque les parties qui constitueront les composants et on effectue une attaque chimique des couches supérieures N⁺N non masquées. Cette manipulation s'appelle MESA, d'où le nom de ce type de technologie. Après cette étape d'isolation des composants, les contacts ohmiques (Ni/AuGe/Ni) sont déposés sur la couche

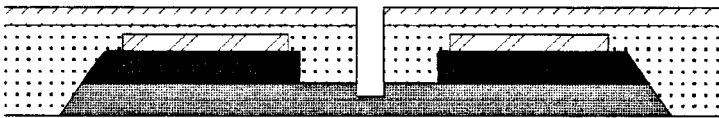
Mésa et dépôt des contacts ohmiques



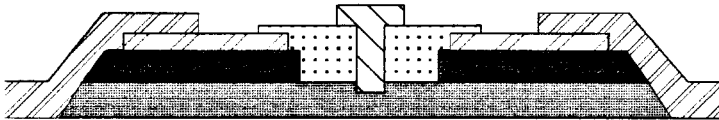
Recess de la couche N⁺⁺



Lithographie + second recess



Grille rectangulaire et plots d'épaissement










-  Couche N⁺⁺
-  Couche N
-  Contacts ohmiques
-  Grille
-  Plots d'épaissement
-  PMMA
-  Diélectrique

Figure III.2 : Phase générale de fabrication par la technologie "mesa" de MESFET à grille en "T".

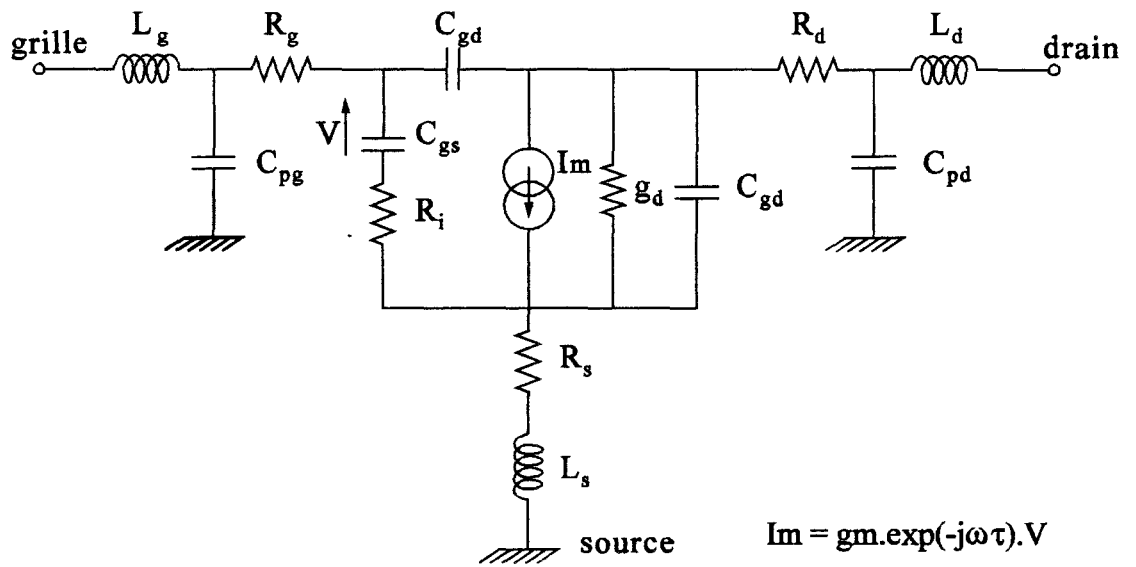


Figure III.3 : Schéma équivalent petit signal du transistor à effet de champ.

supérieure dite "de contact" qui est très fortement dopée. Le canal actif est ensuite éventuellement dégagé par attaque chimique de cette couche supérieure N⁺.

L'étape suivante est la réalisation de la grille. Celle-ci nécessite plusieurs opérations. Pour réaliser une grille en "T" submicronique, on dépose tout d'abord une épaisseur de diélectrique, par exemple du nitrure de silicium. La plaquette est ensuite entièrement recouverte de résine électrosensible PMMA et, à l'aide du masqueur électronique, on réalise le masquage approprié pour permettre de graver la zone du diélectrique où on veut déposer la grille. Avant le dépôt métallique du contact Schottky (Ti/Pt/Au), une légère attaque de la couche N est effectuée pour ajuster la tension de seuil du transistor. Dans le jargon technologique, ceci s'appelle un "recess". Une grille de section en "T" est ensuite déposée grâce à une nouvelle lithographie et le composant est alors presque terminé puisqu'il ne reste plus qu'à déposer les plots d'épaissement. Ces plots métalliques vont permettre la prise de contacts électriques sur les composants. Les phases générales de la réalisation du MESFET à grille en "T" sont reportées dans la figure III.2.

III.1.2. Les principaux inconvénients présentés par la structure réalisée par les procédés classiques

Il est bien connu qu'un transistor sera d'autant plus performant que seront aussi faibles que possibles les grandeurs définissant son schéma électrique équivalent "petit signal" représenté sur la figure III.3, à savoir :

- 1. La résistance totale d'accès source grille : R_s ;
- 2. la capacité grille source : C_{gs} ;
- 3. la capacité grille drain : C_{gd} ;
- 4. l'inverse de sa transconductance : g_m^{-1} ;
- 5. la conductance de drain : g_d ;
- 6. le temps de transit des électrons dans le canal conducteur : τ ;
- 7. la résistance de métallisation de grille : R_g .

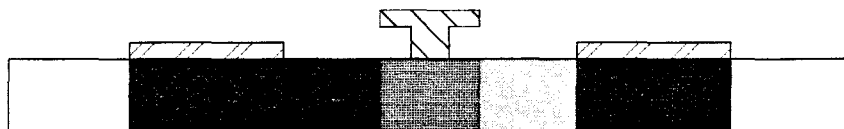
Bien entendu la structure réalisée en utilisant les procédés classiques de fabrication du composant a dors et déjà été conçue pour remplir ces conditions, avec :

- l'utilisation d'une couche de contact permettant l'obtention de meilleurs contacts ohmiques et la diminution de la résistance d'accès entre source et grille ;
- l'utilisation de grilles largement submicroniques pour diminuer le temps de transit ;
- la fabrication de grilles de section en "T" ou en "Y" afin de diminuer la résistance de grille ;
- l'utilisation dans la couche active d'un dopage relativement élevé (jusqu'à 7.10^{17} at.cm⁻³) de façon à obtenir des transconductances et des courants importants.

Néanmoins le transistor ainsi réalisé présente un certain nombre d'inconvénients. En premier lieu, l'utilisation d'une attaque mesa pour isoler les différents composants les uns des autres pose le problème de la descente de grille. Celle-ci risque en effet de provoquer la rupture de la métallisation de cette électrode lorsque la longueur de la grille devient de plus en plus submicronique et entraîne également des capacités grille source supplémentaires (ainsi que des courants de fuite dans le cas des transistors à hétérojonction utilisant des semiconducteurs à faible largeur de bande interdite).

En second lieu, l'utilisation d'une couche de contact semiconductrice très dopée nécessite l'utilisation de la technique de "recess" ou du creusement du canal pour déposer la grille sur la couche active moins dopée. Or ce procédé présente lui aussi un certain nombre d'inconvénients :

- l'introduction de capacités supplémentaires entre les flancs du recess et la grille comme l'a montré I. Valin dans sa thèse [1, 2], se traduisant par une augmentation de C_{gs} et de C_{gd} ;
- la réalisation d'une structure non plane rendant un peu plus délicate la lithographie nécessaire pour élaborer la grille ;






-  Contacts ohmiques et plots d'épaississement
-  Grille
-  Les zones semiconductrices sont d'autant plus foncées que le dopage actif est important

Figure III.4 : La structure "MESFET idéale" qui devrait permettre d'obtenir des performances élevées.

- une reproductibilité plus faible liée à la difficulté de contrôler précisément la profondeur d'attaque du canal et la forme du "recess", et de réaliser une passivation efficace.

Enfin la nécessité d'utiliser des dopages élevés pour la couche active sur laquelle est déposée la grille se traduit par des capacités grille drain importantes et surtout une tension de claquage relativement faible, et donc une limitation des possibilités pour le transistor de délivrer des puissances importantes.

Ces différentes considérations montrent que des progrès dans la fabrication du transistor à effet de champ sont encore possibles afin de se rapprocher de la structure idéale qui permettrait l'obtention de performances encore plus élevées. Encore faut-il disposer de procédés technologiques adaptés pour réaliser ce type de structures et nous nous proposons de montrer que la neutralisation des impuretés par hydrogénation est sans doute un des moyens les plus commodes pour remplir ces conditions.

III.1.3. Définition d'une structure quasi idéale réalisable en utilisant la neutralisation par hydrogénation

Nous avons représenté sur la figure III.4 la structure du transistor qu'il nous semblerait intéressant de réaliser parce que, comme nous nous proposons de l'expliquer :

- elle est sans doute proche de la structure idéale permettant d'obtenir des performances très élevées ;
- elle devrait être réalisable en utilisant toutes les possibilités offertes par la neutralisation par hydrogénation.

Sur la figure III.4, les zones semiconductrices ont été représentées d'autant plus foncées que le dopage actif (c'est-à-dire non neutralisé par l'hydrogène) est important. On peut remarquer que la structure envisagée est entièrement "planar", ce qui facilite aussi bien l'obtention d'une grille très largement submicronique (sans rupture de la métallisation lors de la descente de grille) que la lithographie, la reproductibilité et la fiabilité puisqu'il n'y a pas d'attaque "recess" et que l'on peut mieux maîtriser la passivation.

Par ailleurs la zone d'accès source grille et les deux contacts sous l'électrode de source et de drain sont très fortement conductrices et ces caractéristiques présentent beaucoup d'avantages :

- les résistances de contact peuvent avec une bonne reproductibilité être très faibles ;
- la résistance de source est diminuée ce qui ne peut qu'être favorable à l'obtention d'un faible facteur de bruit et d'une transconductance extrinsèque élevée ;
- compte tenu des champs électriques très faibles existant dans la zone d'accès source grille qui est très conductrice, les porteurs rentrant dans le canal conducteur ont une énergie très proche de l'énergie d'équilibre thermodynamique et de ce fait peuvent atteindre des vitesses particulièrement élevées sous la grille puisque le phénomène de survitesse peut jouer pleinement [3]. Dans ces conditions le temps de transit sous la grille peut être très court et la fréquence de coupure en courant devrait être particulièrement élevée.

Remarquons, par ailleurs, que le dopage effectif de la zone active sous la grille reste élevé et qu'il est donc possible d'obtenir des transconductances et des courants importants. Malgré ce dopage élevé sous la grille, la tension de claquage devrait pouvoir être importante dans la mesure où la concentration en impuretés non neutralisées a été abaissée entre grille et drain. L'objectif, en réglant le dopage dans cette région, est d'essayer d'uniformiser le champ électrique et ainsi de retarder le déclenchement du régime d'avalanche. En effet, il doit être possible de créer entre grille et drain une zone de "charge d'espace" qui peut diminuer considérablement la conductance de drain g_d (toujours trop élevée pour un TEC à grille submicronique) et diminuer très sensiblement la capacité grille drain. Cette modification des caractéristiques du transistor est donc favorable pour l'obtention de gains élevés mais risque de se traduire par une augmentation du temps de transit des porteurs sous la grille et donc un compromis optimal devra être trouvé.

La structure définie dans la figure III.4 présente donc beaucoup d'avantages, encore faut-il qu'elle soit réalisable. Or, grâce à la souplesse du procédé de neutralisation par hydrogénation, on devrait pouvoir la fabriquer à partir de cette technique. Il suffit de partir d'une couche semiconductrice très dopée et d'ajuster le

dopage de chaque zone, après ou en cours de fabrication du transistor, en procédant en premier lieu à une neutralisation globale ou localisée, puis pour les régions où c'est nécessaire, à une déneutralisation locale par exposition aux U.V. ou à un faisceau électronique. Si, au plan des principes, il est possible de définir plusieurs ensembles de séries de processus technologiques permettant d'aboutir à la structure de la figure III.4, encore faut-il définir le processus global de fabrication le plus commode, c'est-à-dire souvent le plus simple, permettant d'obtenir non seulement des performances élevées mais encore un rendement de fabrication suffisant.

C'est l'objectif que nous avons poursuivi et que nous continuons à suivre aujourd'hui en effectuant une démarche progressive tout en s'efforçant de réaliser des structures de transistor à effet de champ se rapprochant de plus en plus de la structure dite optimale définie sur la figure III.4. Compte tenu de la nouveauté de notre démarche utilisant des effets encore très mal connus, un grand nombre de structures intermédiaires a dû être défini. Nous allons donc décrire successivement les procédés que nous avons suivis pour les fabriquer et les premiers résultats que nous avons obtenus. C'est ainsi que nous décrirons tour à tour :

- la réalisation et la caractérisation de TEC "planars" (op608) et non "planars" (op614) à partir de couches hydrogénées homogènes d'épaisseur importante à grille en "T" micronique ($L_g \approx 1 \mu\text{m}$) ;
- la réalisation et la caractérisation de TEC "planars" (op695) à grille submicronique en "T" à partir de couches hydrogénées rendues non homogènes par une exposition "symétrique" aux ultraviolets ($L_g < 0,3 \mu\text{m}$) ;
- la réalisation et la caractérisation de TEC "planars" (op759) à grille submicronique simple à partir de couches hydrogénées où seule la zone source grille est déneutralisée par exposition aux ultraviolets ($L_g < 0,3 \mu\text{m}$) ;
- la réalisation et la caractérisation des premières structures (op773-1 et op773-2) largement submicroniques ($L_g < 0,1 \mu\text{m}$).

A la lumière des résultats obtenus, nous essaierons alors de définir le processus global qui pourrait être utilisé pour réaliser la structure dite optimale et les problèmes restant éventuellement à résoudre pour la fabriquer.

III.2. LES PROCÉDES GÉNÉRAUX UTILISÉS DANS LA RÉALISATION DES HTECS

Procédant par étapes pour la réalisation de TEC hydrogénés à structure idéale, nous avons réalisé plusieurs TEC à couche semiconductrice unique N⁺. Dans les paragraphes suivants nous détaillerons le procédé utilisé. On donnera pour chaque réalisation technologique de transistors leurs particularités telles que les caractéristiques de la couche semiconductrice utilisée et les principales étapes du procédé technologique mis en oeuvre pour réaliser la couche active. Nous présenterons ici les caractéristiques les plus générales des procédés utilisés.

III.2.1. Caractéristiques des couches utilisées

Les couches épitaxiées utilisées pour l'élaboration des transistors hydrogénés sont différentes de celles des MESFET. En effet, au lieu d'être constituées de deux couches épitaxiées N⁺ et N, elles sont constituées d'une couche active unique dopée N⁺ de faible épaisseur [4]. Les caractéristiques des différentes couches utilisées sont décrites dans la figure III.5.

GaAs dopé Si 2.10 ¹⁸ à 4.10 ¹⁸ at.cm ⁻³ 700 à 2000 Å
GaAs NID 6000 Å
Substrat GaAs NID

Figure III.5 : Caractéristiques des différentes couches utilisées pour les réalisations de transistors à effet de champ hydrogénés.

L'épaisseur et le dopage de la couche de GaAs:Si ont été choisis judicieusement de manière à obtenir, par exposition au plasma d'hydrogène, une couche active peu dopée de très bonne qualité. Nous avons donc légèrement modifié le procédé technologique du MESFET "classique" pour y inclure cette étape. Le phénomène de réactivation des complexes par exposition aux ultraviolets ou à un faisceau d'électrons

n'a pas été utilisé dans les premières réalisations technologiques. Elles ont été faites en n'utilisant que les phénomènes de neutralisation des donneurs par plasma d'hydrogène et de réactivation thermique des complexes en volume. Par la suite les réalisations ont été élaborées pour inclure les procédés de déneutralisation.

III.2.2. Description succincte des différents procédés utilisés

Le mesa :

Cette étape, comme nous l'avons dit précédemment, a pour but d'isoler les composants entre eux et est généralement réalisée par attaque chimique des zones supérieures dopées. Au lieu de creuser les couches actives par attaque chimique, le mesa pourrait être effectué par neutralisation des porteurs en exposant la plaquette au plasma d'hydrogène. Il suffit pour cela d'utiliser des conditions de plasma fortement neutralisantes afin de rendre le matériau complètement isolant. Cette filière n'a pas été exploitée pour la réalisation de nos transistors car elle demande des modifications technologiques importantes du procédé que l'on n'a pas voulu entreprendre avant d'avoir optimisé les différentes phases technologiques du transistor hydrogéné.

Les contacts ohmiques :

Les contacts ohmiques sont déposés sur la zone fortement dopée et sont réalisés de la même façon que ceux du MESFET classique par dépôt de Ni/AuGe/Ni.

La zone active :

Cette étape consiste à délimiter la partie du composant qui sera exposée au plasma d'hydrogène pour créer la zone active du transistor. Les parties ne devant pas être neutralisées par l'hydrogénation sont recouvertes d'un matériau non perméable au plasma. Les matériaux à la fois résistants et imperméables au plasma d'hydrogène sont généralement soit des diélectriques [5, 6] soit des métaux constituant par exemples les contacts ohmiques. Dans le premier cas, la plaquette est recouverte complètement d'une fine couche de nitrure de silicium (1200 Å) qui présente une bonne tenue et une bonne imperméabilité au plasma d'hydrogène. Celle-ci est elle-même recouverte de résine PMMA et, à l'aide du masqueur électronique, on vient créer le masque approprié

dans la résine pour effectuer une ouverture des zones à hydrogéner. L'ouverture du diélectrique est faite par gravure ionique réactive (CF_4).

L'exposition au plasma :

C'est l'étape-clé de notre procédé technologique et elle nécessite beaucoup de soins. Il faut en effet que la couche ne soit pas dégradée par l'exposition au plasma d'hydrogène mais il faut également que la neutralisation soit suffisante, notamment dans le cas de la réalisation de transistors à grille en "T" submicronique où l'hydrogénation s'effectue au travers d'une ouverture du diélectrique large seulement de 0,25 microns. Afin d'obtenir une neutralisation homogène de la plaquette, le gaz utilisé doit être très pur et l'état de surface de la plaquette le plus parfait possible. Le plasma utilisé peut être indifféremment de l'hydrogène ou du deutérium. La première série de transistors hydrogénés (op608 et op614) a été réalisée en utilisant les conditions expérimentales d'exposition au plasma optimisées par les études préliminaires effectuées sur le nouveau bâti :

Puissance : 2 watts ;
Température : 230°C ;
Temps : 20 minutes ;
Pression d'hydrogène : 1 mbar.

Le recess :

Dans la filière classique, cette étape est effectuée pour ôter la couche N^+ de surface et pour ajuster les caractéristiques du composant. Ici, le recess est également utilisé, lorsque c'est nécessaire, pour enlever la couche superficielle du semiconducteur dans laquelle se sont accumulés des défauts dus à une concentration trop importante d'hydrogène en surface, ces défauts altérant la conductivité de la couche active. La profondeur de recess dépend des caractéristiques électriques de la couche après plasma et de la tension de pincement désirée. La profondeur du recess est contrôlée en utilisant une solution d'attaque calibrée. Sa longueur est délimitée par le canal creusé dans le diélectrique. Notons qu'il est important de bien contrôler la forme du canal creusé car elle peut influencer sur les performances du transistor [1].

La grille :

Deux types de grilles peuvent être déposées :

1. une grille simple ou plate qui est déposée après le recess ;
2. une grille en "T" ou en "Y" ou "champignon" qui nécessite un deuxième masquage après la gravure du diélectrique. Elle est donc plus délicate puisqu'il faut réaliser une seconde lithographie et s'aligner exactement sur l'ouverture réalisée précédemment dans le diélectrique. Puis, si cela s'avère nécessaire un "recess" est effectué.

Après le dépôt de contact Schottky de la grille, les conditions de recuit sont choisies de façon à éviter une éventuelle réactivation thermique des complexes de la zone hydrogénée.

Les plots d'épaississement :

C'est la dernière étape de la réalisation des composants. Le dépôt métallique des plots d'épaississement se fait après la gravure du diélectrique au niveau des contacts ohmiques.

III.2.3. Le choix des paramètres d'hydrogénation

III.2.3.1. La puissance de plasma

En accord avec les résultats que nous avons obtenus lors des études préliminaires, la puissance doit être supérieure à 1 watt et inférieure à 5 watts pour avoir une dégradation superficielle de la couche semiconductrice inférieure à 10 %. La puissance a donc été choisie la plus faible possible pour espérer une dégradation minimale d'où la valeur de 2 watts.

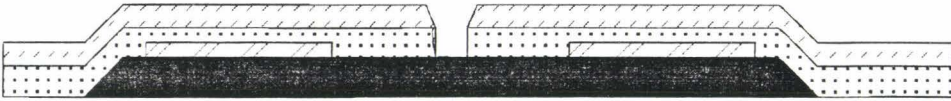
III.2.3.2. La température de l'échantillon

Le matériau est chauffé à 230°C durant l'exposition au plasma. Cette température est plus haute que celle prévue lors de l'étude préliminaire où nous avons observé la meilleure neutralisation pour une température de 180°C. Cependant nous

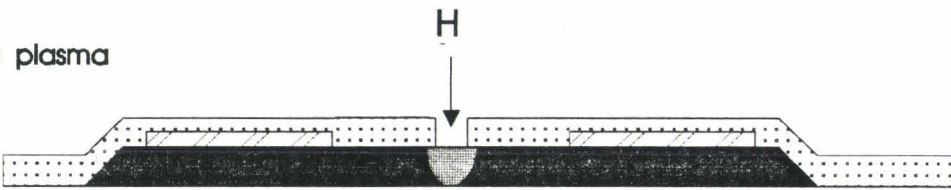
Méssa et dépôt des contacts ohmiques



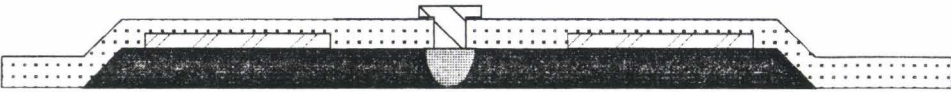
Lithographie et attaque du diélectrique



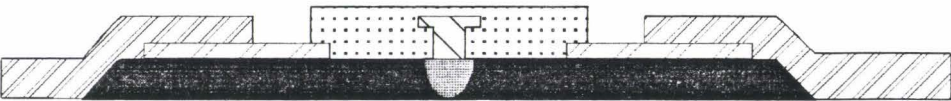
Exposition au plasma



Lithographie et dépôt de la grille en T



Protection de la grille et dépôt des plots d'épaissement










-  Zone non hydrogénée
-  Zone hydrogénée
-  Contacts ohmiques
-  Grille
-  Plots d'épaissement
-  Diélectrique
-  PMMA

Figure III.7 : Procédé utilisé pour la réalisation du premier transistor "planar" hydrogéné op608 à couche épaisse (0,2 μm).

avons constaté une meilleure uniformité de la neutralisation sur la plaquette à cette température de 230°C et cet écart peut sans doute s'expliquer par le fait que les essais préliminaires ont été effectués sur des morceaux de 0,04 cm² alors que les composants sont réalisés sur une couche de 5 cm².

III.2.3.3. Le temps d'exposition

Pour inclure l'étape d'hydrogénation dans la fabrication des composants, il est très important d'avoir un temps d'hydrogénation le plus court possible afin de ne pas augmenter inconsidérément le temps où les composants semiconducteurs sont soumis à une température élevée : par exemple pour une couche épitaxiée de 0,2 μm d'épaisseur un temps d'exposition de 20 minutes s'avère suffisant.

III.3. PREMIERES REALISATIONS DE TRANSISTORS HYDROGENES

III.3.1. Transistor hydrogéné "planar" non optimisé sur couche semiconductrice unique de 0,2 μm (op608)

Afin de réaliser des structures "planars", il est nécessaire de maîtriser la réalisation de la couche active des transistors à effet de champ par hydrogénation. Nous avons d'abord étudié la faisabilité du dispositif en réalisant des transistors hydrogénés sans recess. Le procédé technologique que nous nous proposons d'utiliser n'est pas optimisé tant par la structure du transistor que par l'épitaxie de départ. En effet, l'épitaxie utilisée consiste en une couche de GaAs unique dopée Si relativement épaisse (figure III.6).

GaAs dopé Si 2.10 ¹⁸ at.cm ⁻³ 2000 Å
GaAs NID 6000 Å
Substrat GaAs NID

Figure III.6 : Couche utilisée pour les premières réalisations de transistors à effet de champ hydrogénés.

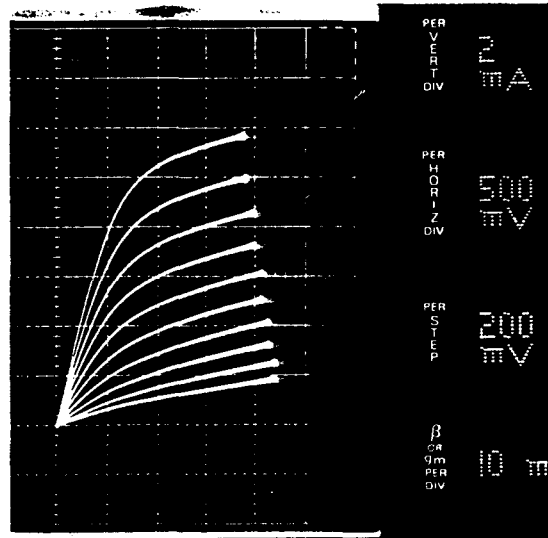


Figure III.8 : Caractéristiques statiques I(V) du transistor planar à couche épaisse (op608) en polarisation inverse ($V_{gs \max} = -1,8 \text{ V}$). $L_g = 1 \mu\text{m}$ et $W = 50 \mu\text{m}$.

$g_{m_{\text{ext}}}$ $\text{mS} \cdot \text{mm}^{-1}$	$g_{m_{\text{int}}}$ $\text{mS} \cdot \text{mm}^{-1}$	F_c (GHz)	η
310	420	21	1,14

Tableau I : Caractéristiques des performances du premier transistor hydrogéné "planar" (op608) élaboré sur une couche de GaAs:Si épaisse de $0,2 \mu\text{m}$.

H_{21}^2 (dB)	16,35	16,05	16,31	16,71
MAG (dB)	4,14	4,02	4,03	4,66
F_c (GHZ)	20,2	20,3	20,4	19,5

Tableau II : Très bonne uniformité des performances des TEC hydrogénés "planars" (op608) élaborés sur une couche unique de GaAs:Si épaisse de $0,2 \mu\text{m}$. Le MAG est mesuré à la fréquence de 26 GHz et le H_{21}^2 à 2 GHz.

III.3.1.1. *Elaboration de la couche active*

Les différentes étapes technologiques de la réalisation de ces transistors à grille en "T" sont définies sur la figure III.7. Dans ce procédé, un masque de diélectrique (nitrure de silicium) a été utilisé pour définir la zone à exposer au plasma d'hydrogène. La longueur de la couche active sur laquelle est déposée la grille est délimitée par une ouverture de 1 μm dans le diélectrique et l'ajustement de la concentration en impuretés actives a été effectuée en exposant la plaquette à un plasma d'hydrogène de 2 watts à 230°C pendant 20 minutes.

Le jeu de masques utilisé a comme motif élémentaire une échelle de résistances ($l : 2, 5, 10, 20 \times 75 \mu\text{m}^2$) et trois dispositifs de transistors ayant comme caractéristiques :

- Largeurs de grilles : 35, 50 et 75 μm ;
- Distance source drain : 1,5 μm ;
- Longueur de grille : 1 μm ;
- Epaisseur de nitrure de silicium : 1200 Å.

III.3.1.2. *Performances des transistors de l'op608*

L'op608 n'a pas donné des performances "records", mais sa réalisation a été riche en renseignements sur l'utilisation du procédé de neutralisation par plasma d'hydrogène. Les caractéristiques statiques I(V) (figure III.8) montrent une tension de pincement un peu trop négative de l'ordre de -2 volts.

Les caractéristiques statiques et hyperfréquences des transistors de l'op608 sont reportées dans les tableaux I et II. Ces transistors présentent en moyenne des transconductances extrinsèques de 280 $\text{mS}\cdot\text{mm}^{-1}$ ce qui est assez remarquable pour des grilles de 1 μm . De plus, on a constaté une très bonne uniformité des caractéristiques de ces transistors (tableau II). Remarquons, par ailleurs que le facteur d'idéalité est très bon puisqu'il est proche de 1 (tableau I) ce qui semble indiquer que la détérioration superficielle liée à l'exposition au plasma est très faible.

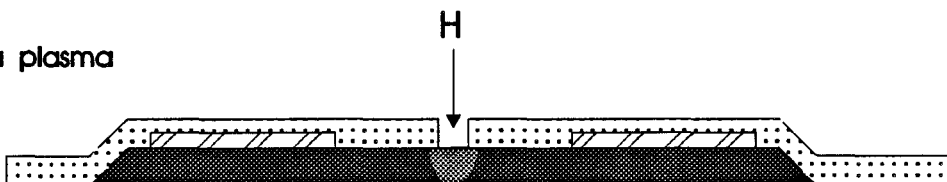
Méso et dépôt des contacts ohmiques



Lithographie et attaque du diélectrique



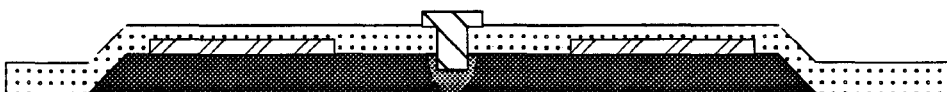
Exposition au plasma



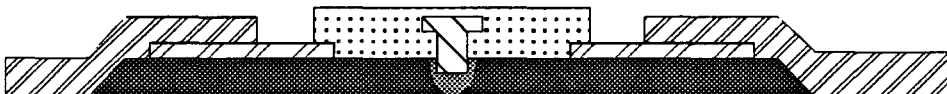
Recess



Lithographie et dépôt de la grille en T



Protection de la grille et dépôt des plots d'épaissement










-  Zone non hydrogénée
-  Zone hydrogénée
-  Contacts ohmiques
-  Grille
-  Plots d'épaissement
-  Diélectrique
-  PMMA

Figure III.9 : Procédé de réalisation du transistor hydrogéné non planar (op614).

Pour mieux comprendre les tensions de pincement très négatives obtenues, nous avons évalué le taux de donneurs actifs dans le canal. On peut utiliser dans ce but, l'expression classique donnant la tension de pincement de transistor V_p soit :

$$V_b - V_p = \frac{qN_D a^2}{2\epsilon} \quad (1)$$

où

- V_b : barrière de potentiel Métal-Semiconducteur ;
- N_D : dopage actif ;
- a : épaisseur du canal ;
- ϵ : permittivité du matériau.

Pour déterminer N_D , il faut connaître V_b et cette détermination peut s'effectuer en déterminant la caractéristique $I_{gs}(V_{gs})$ régie par la relation :

$$I_{gs} = A^* T^2 S \exp\left(\frac{q(V_p - V_b)}{kT}\right) \quad (2)$$

où

- A^* : constante de Richardson ;
- S : surface de la grille ($l_g \times Z$).

La tension de barrière peut ainsi se déterminer en extrapolant la courbe de $\text{Log } I_{gs}(V_{gs})$ à $V_{gs} = 0$ et l'on obtient de cette façon des valeurs de V_b voisines de 0,6 volts. La variation de la transconductance en fonction de V_{gs} permet d'obtenir avec une meilleure précision la tension de pincement qui est de 2,3 volts. L'application de la relation (1), nous donne alors un dopage actif de 9.10^{16} at.cm⁻³ pour la couche semiconductrice exposée au plasma d'hydrogène. Ainsi pour les conditions d'hydrogénation utilisées il est possible d'avoir une neutralisation particulièrement importante (le dopage actif initial était de 2.10^{18} at.cm⁻³) (figure III.6). Notons, que malgré ce faible dopage la tension de pincement est trop fortement négative (tableaux I et II). Pour travailler avec des valeurs de V_p plus proche de zéro tout en utilisant des

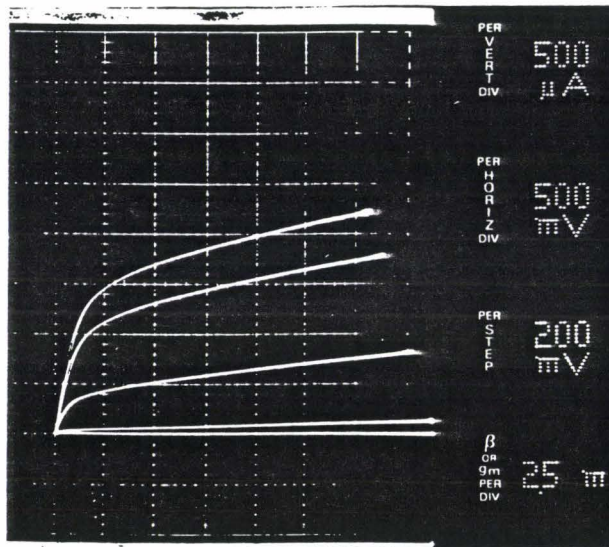
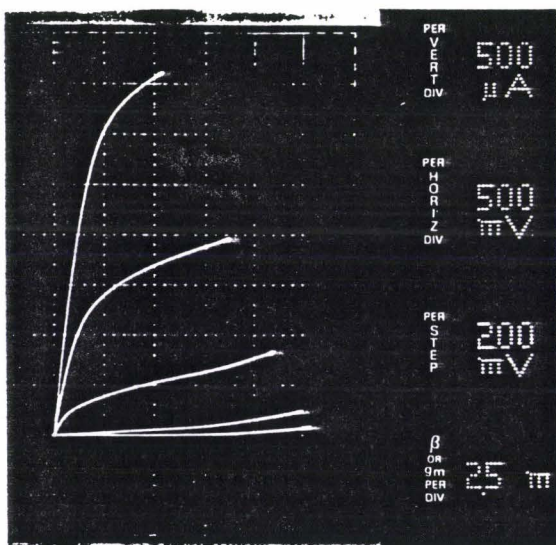
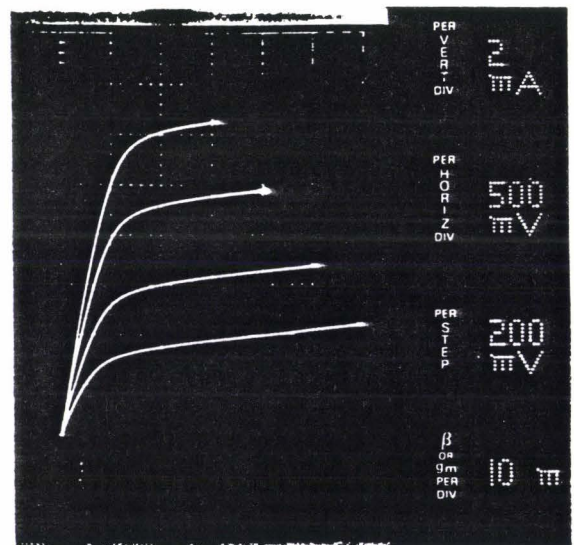


Figure III.10 : Caractéristiques statiques I(V) du transistor hydrogéné (op614) brut de réalisation. Le transistor est "normally off" et la caractéristique a été faite pour des tensions $V_{gs} > 0$. $L_g = 1 \mu\text{m}$ et $W = 50 \mu\text{m}$.



(a)



(b)

Figure III.11 : Caractéristiques statiques I(V) du transistor hydrogéné (op614) après un recuit à 240°C pendant 2 heures. Le transistor est maintenant "normally on".
 (a) $V_{gs} < 0$. (b) $V_{gs} > 0$.
 $L_g = 1 \mu\text{m}$ et $W = 50 \mu\text{m}$.

dopages plus élevés, il nous faut donc utiliser des épaisseurs plus faibles et c'est un des objectifs de l'opération technologique op614 que nous allons maintenant décrire.

III.3.2. Transistor hydrogéné non optimisé sur couche semiconductrice unique de 0,2 μm avec recess (op614)

Dans cette seconde réalisation de TEC hydrogénés, la couche utilisée a les mêmes caractéristiques que celle de l'op608 mais le procédé technologique est par contre légèrement différent (figure III.9). La seule modification que nous avons apportée dans ce procédé est un "recess" de la couche active avant le dépôt des contacts Schottky de façon à diminuer l'épaisseur du canal pour améliorer les performances des transistors et augmenter la tension de pincement. La profondeur du recess est de 1000 Å. Remarquons que les conditions d'hydrogénations sont les mêmes que pour la réalisation précédente (op608).

Les caractéristiques I(V) des transistors mesurés sous pointes après le dépôt des plots d'épaississement montrent qu'ils sont "normally off" (figure III.10). Le dopage actif de la couche semiconductrice est donc très faible. Pour ajuster leurs caractéristiques et passer d'un composant "normally off" à "normally on", un recuit thermique de deux heures à 240°C a été effectué (figure III.11). Ce recuit thermique permet de dissocier les complexes en volume et donc d'augmenter le dopage actif du canal. Ces transistors ont été ensuite caractérisés sous cascade.

Les caractéristiques des transistors de l'op614 sont reportées dans le tableau III. Ces résultats montrent qu'un recuit contrôlé permet de régler le dopage actif du canal à la concentration désirée. Le composant ainsi obtenu présente des caractéristiques tout à fait remarquables : une transconductance intrinsèque de 600 mS.mm⁻¹ et une fréquence de coupure de 18,2 GHz pour une grille de 1 μm .

Nous avons pour les transistors de l'op614 estimé le dopage sous le canal après recuit en procédant de la même façon que pour l'op608. Ces composants ont une tension de barrière de 0,6 volts. Si on estime l'épaisseur du canal à 1000 Å et la tension de pincement à 0,9 volts, on obtient à partir de la relation (1) un dopage de $1,8 \cdot 10^{17}$ at.cm⁻³.

Ces deux réalisations op608 et op614 ont constitué les étapes obligatoires pour mieux connaître le procédé de réalisation de couches actives par neutralisation par plasma d'hydrogène. Elles ont permis de montrer qu'il était possible de réaliser par hydrogénation des couches d'excellente quantité, et de définir les structures de couches semiconductrices à utiliser, ainsi que les mises en oeuvre des différentes étapes d'élaboration du transistor "idéal".

III.4. REALISATION DE TRANSISTORS HYDROGENES PAR DENEUTRALISATION LOCALISEE

III.4.1. Transistor hydrogéné à grille submicronique réalisé sur couche de faible épaisseur (op695)

Dans les premiers procédés de réalisation de transistors à effet de champ hydrogénés décrits précédemment, les phénomènes de réactivation des complexes Si-H par une exposition aux ultraviolets ou par faisceau d'électrons n'ont pas encore été utilisés. Ces deux procédés de déneutralisation vont nous permettre de réaliser nos transistors différemment en utilisant l'expérience acquise lors des réalisations préliminaires. L'épitaxie est toujours composée d'une couche semiconductrice de dopage uniforme mais la couche utilisée est d'une part plus dopée afin d'obtenir des résistances d'accès plus faibles et est d'autre part plus mince (figure III.12) afin d'atteindre des performances élevées.

GaAs:Si $4 \cdot 10^{18} \text{ at. cm}^{-3}$ 700 Å
GaAs NID 6000 Å
Substrat NID

Figure III.12 : Couche utilisée pour les réalisations de transistors hydrogénés à structure idéale.

III.4.1.1. Réalisation de la couche active

Afin de réaliser des composants se rapprochant de la structure idéale, le procédé technologique de réalisation de la couche active par hydrogénation a été modifié pour y inclure la réactivation localisée des zones neutralisées et pour réaliser une grille en "T". Notre but est de déterminer l'influence de ces nouveaux procédés sur les performances du transistor et, de façon plus précise, sur les caractéristiques de son schéma équivalent : R_s , R_d , C_{gs} , C_{gd} et g_d . Les phases générales de la réalisation de ces composants sont données dans la figure III.13. La première étape est la réalisation de l'isolation de type mesa, suivie du dépôt des contacts ohmiques. Les caractéristiques de la couche active sur laquelle va être réalisée le transistor sont ensuite ajustées par exposition au plasma.

Dans ce procédé, la zone hydrogénée se situe entre les contacts ohmiques de source et de drain. Par rapport à la technique précédente, il n'y a plus de zones protégées par le nitrure de silicium puisque tout le canal est exposé directement au plasma d'hydrogène. Les conditions d'hydrogénation ont été modifiées pour obtenir une neutralisation satisfaisante sur une couche semiconductrices de $0,07 \mu\text{m}$:

Puissance : 2 watts ;

Temps : 8 minutes ;

Température : 220°C .

Après la réalisation de la couche active la plaquette est recouverte d'une fine couche de nitrure de silicium (800 \AA). Le dépôt du diélectrique est fait à 100°C pour éviter une éventuelle décomplexation de la zone neutralisée. Une grille en "champignon" de $0,25 \mu\text{m}$ est ensuite réalisée. Puis, pour que les zones entre source grille et grille drain puissent être directement exposées aux U.V. ou aux électrons, le nitrure de silicium de ces zones est enlevé par gravure ionique réactive (CF_4). Enfin, les plots d'épaissement sont déposés.

Le jeu de masque est constitué de transistors ayant les caractéristiques suivantes :

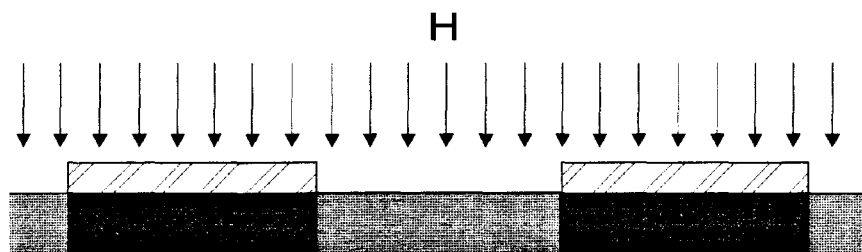
Largeurs de grille : 50 et $75 \mu\text{m}$;

Distance source drain : $1,5 \mu\text{m}$;

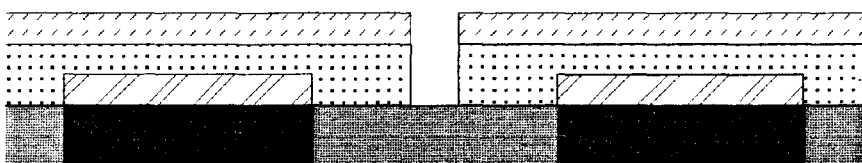
Longueur de grille : $0,25 \mu\text{m}$;

Épaisseur de nitrure de silicium : 800 \AA .

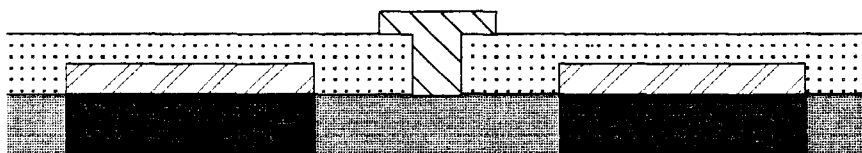
Dépôt des contacts ohmiques et exposition au plasma d'hydrogène



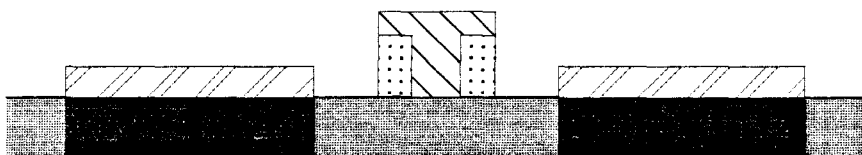
Lithographie et gravure du diélectrique



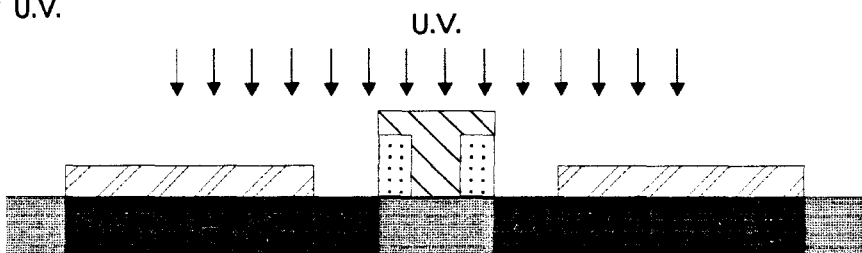
Dépôt de la grille



Gravure du diélectrique



Exposition aux U.V.









-  Zone non hydrogénée
-  Zone hydrogénée
-  Contacts ohmiques
-  Grille
-  Diélectrique
-  Résine PMMA

Figure III.13 : Réalisation du transistor "planar" hydrogéné à grille en "T" op695 élaboré sur couche mince (0,07 μm)

Après leur fabrication les transistors sont "normally off" et un recuit à 250°C pendant 1 heure a été nécessaire pour augmenter la concentration en porteurs libres les rendant ainsi "normally on". Ces transistors ont été ensuite directement exposés aux U.V. de l'aligneur et l'évolution des caractéristiques ainsi obtenues est discutée dans le paragraphe suivant.

III.4.1.2. Description des résultats obtenus avec l'exposition aux U.V.

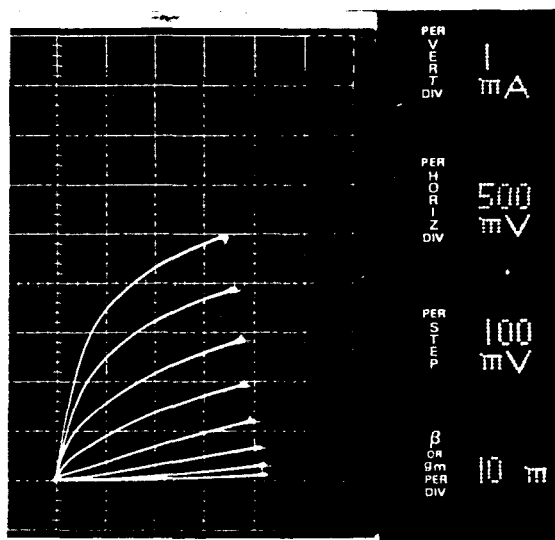
L'utilisation de couches hydrogénées pour élaborer un TEC offre une opportunité assez unique qui est de faire varier les propriétés (dopage actif) de la couche active et de ses abords à volonté une fois le composant réalisé. Il est donc possible d'étudier l'évolution des performances d'un transistor en modifiant de façon externe (par exemple l'exposition à un rayonnement U.V.) un certain nombre de ses paramètres tout en gardant strictement la même structure géométrique. Il doit être possible ainsi :

- d'étudier l'évolution des différents paramètres constituant le schéma équivalent du transistor sous l'effet d'une modification du dopage dans certaines régions spécifiquement choisies du transistor et de vérifier ainsi un certain nombre de prévisions théoriques effectuées par les équipes du D.H.S.-I.E.M.N. travaillant dans la simulation et la modélisation du transistor à effet de champ ;
- de définir expérimentalement la structure la plus favorable à l'obtention de performances élevées ;
- de fournir toutes les informations nécessaires à la définition du processus technologique global qui permettra la fabrication du transistor optimal.

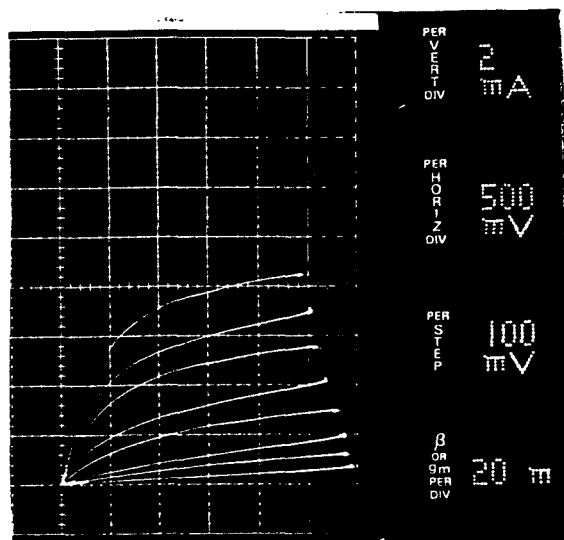
Dans le cas étudié, on se trouve en présence d'une structure présentant une grille en "T" protégeant de l'exposition soit aux électrons soit aux U.V. les deux zones semiconductrices très voisines de la grille tant du côté source que du côté drain. En exposant progressivement aux U.V. l'ensemble du transistor, il est donc possible d'augmenter simplement le dopage actif de la couche semiconductrice constituant l'accès source grille et l'accès grille drain. Les principaux résultats obtenus par ce

op695	initial	après exposition aux U.V.
η	1,73	1,67
V_b (volt)	0,5	0,51
V_p (volt)	-0,6	-1,2
I_{ds} (mA.mm ⁻¹) à $V_{gs} = 0,5$ V	133	360
R_s (Ω .mm)	1,14	0,36
R_d (Ω .mm)	1,52	0,32
C_{gs} (pF.mm ⁻¹)	1,59	1,97
C_{gd} (pF.mm ⁻¹)	0,073	0,345
H_{21}^2 (dB) à 2 GHz	15,9	28,3
MAG (dB) à 26 GHz	0,14	7,4
MSG (dB) à 26 GHz	8,3	10,5
F_c (GHz)	16,1	70
g_m (mS.mm ⁻¹)	161	800
g_{mext} (mS.mm ⁻¹)	126	601
g_d (mS.mm ⁻¹)	30,3	83

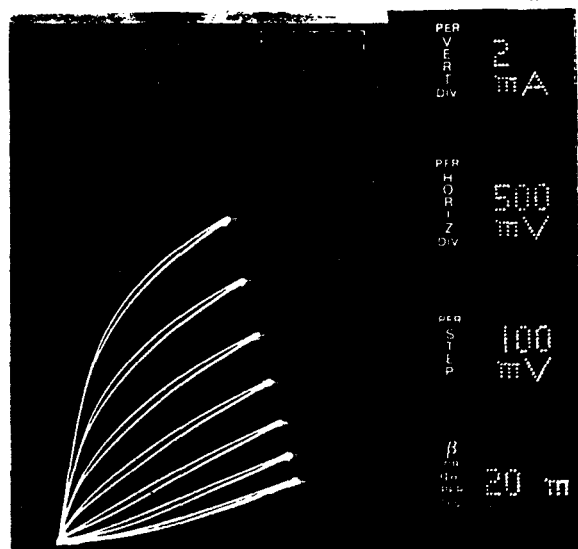
Tableau IV : Caractéristiques des transistors hydrogénés "planars" à grille en "T" de 0,25 μ m (op695). Les caractéristiques initiales ont été obtenues sur des transistors hydrogénés qui ont été recuits à 240°C pendant une heure. Ils ont ensuite été exposés aux U.V. de façon symétrique côté source grille et grille drain. Puis caractérisés. Les expositions ont duré 12 heures.
Source d'U.V. : lampe de l'aligneur.



Initial



Après 40 minutes
d'exposition
aux U.V.



Après 12 heures
d'expositions
aux U.V.

Figure III.14 : Caractéristiques statiques I(V) à $V_{gs} < 0$ pour les transistors hydrogénés de l'op695 au cours des différentes phases d'exposition aux U.V.
 $L_g < 0,3 \mu\text{m}$ et $W = 75 \mu\text{m}$.

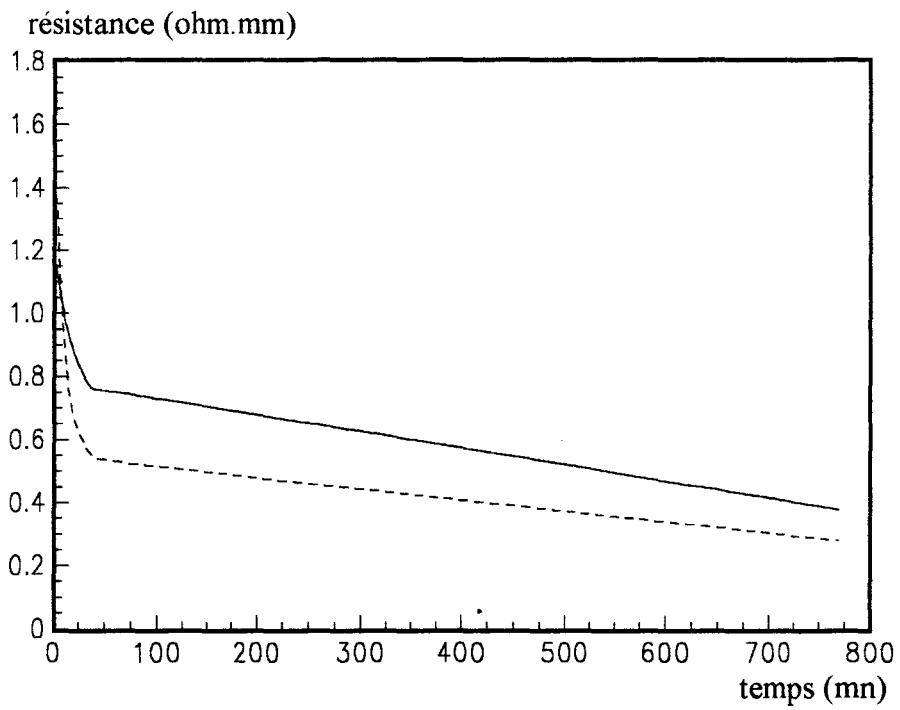


Figure III.15 : Evolution des résistances d'accès R_s et R_d en fonction du temps d'exposition aux U.V.

— R_s
 --- R_d

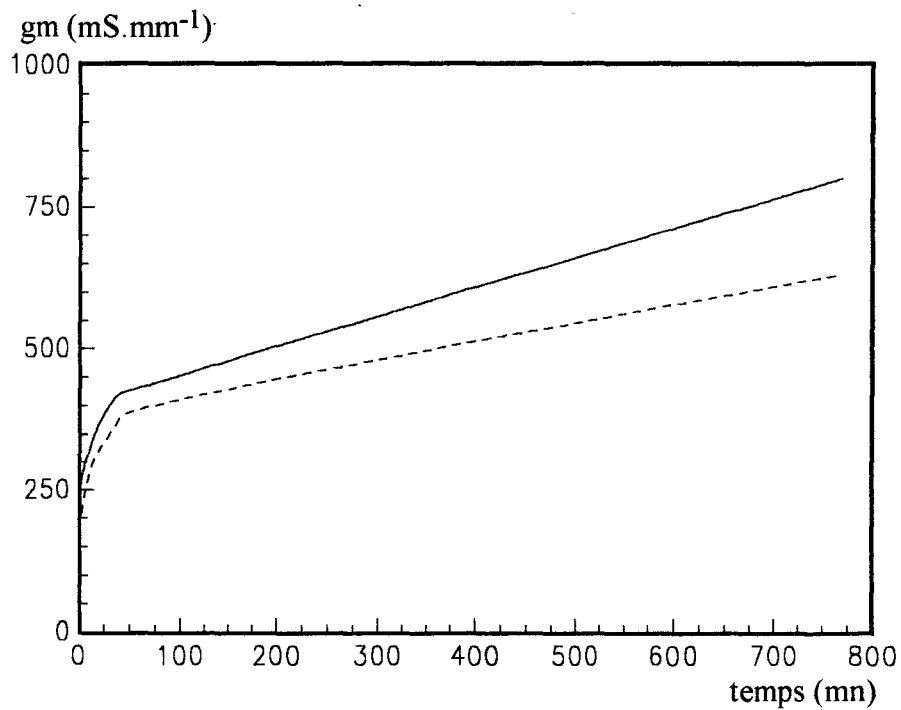


Figure III.16 : Influence des expositions aux U.V. sur la transconductance intrinsèque g_m et extrinsèque $g_{m_{ext}}$ du transistor.

— g_m
 --- $g_{m_{ext}}$

procédé sont illustrés sur le tableau IV, et dans les figures III.14 à III.20 où l'on a représenté l'évolution des principales caractéristiques du transistor en fonction du temps d'exposition total aux U.V.. Les constatations suivantes peuvent être faites :

- Comme on pouvait s'y attendre, on constate une diminution progressive de la résistance de source et de drain au fur et à mesure de l'exposition aux rayonnements U.V. Il faut noter que cette diminution est considérable puisqu'elle passe (figure III.15) d'une valeur de 1,14 ohm.millimètre à 0,3 ohm.millimètre. Il nous a donc été possible de diviser par un facteur supérieur à trois les résistances d'accès source grille et grille drain ;
- Corrélativement, la transconductance extrinsèque augmente (figure III.16), mais le point le plus important réside dans le fait que l'on observe une augmentation très importante également de la transconductance intrinsèque. Une faible partie de cette augmentation peut s'expliquer par le fait que le potentiel entre la grille et l'entrée du canal est un peu plus élevé. Cependant l'accroissement essentiel ne peut s'interpréter qu'à partir d'une augmentation très significative de la vitesse des porteurs dans le canal conducteur. Cette dynamique électronique plus favorable est certainement liée, comme l'ont montré les nombreuses simulations effectuées dans notre laboratoire [7], au fait que compte tenu de la conductivité très élevée de la zone d'accès source grille les porteurs peuvent arriver à l'entrée du canal avec une énergie proche de l'énergie thermique et de ce fait acquérir une survitesse importante dans le canal conducteur ;
- De ce fait, et très logiquement, on constate sur les figures III.17.a et III.17.b une augmentation lors de l'exposition aux U.V. du gain en courant H_{21} et corrélativement de F_c qui est inversement proportionnelle (en première approximation) au temps de transit des porteurs ;
- Si les deux premiers effets observés ne peuvent qu'être bénéfiques à l'obtention de performances élevées, d'autres phénomènes moins favorables se produisent également. C'est ainsi que l'on peut noter une augmentation considérable lors de l'exposition aux U.V. de la conductance de drain (figure III.18) qui peut s'interpréter facilement à partir des nombreux travaux effectués dans notre laboratoire [7, 8]. Il est maintenant bien connu que pour un TEC

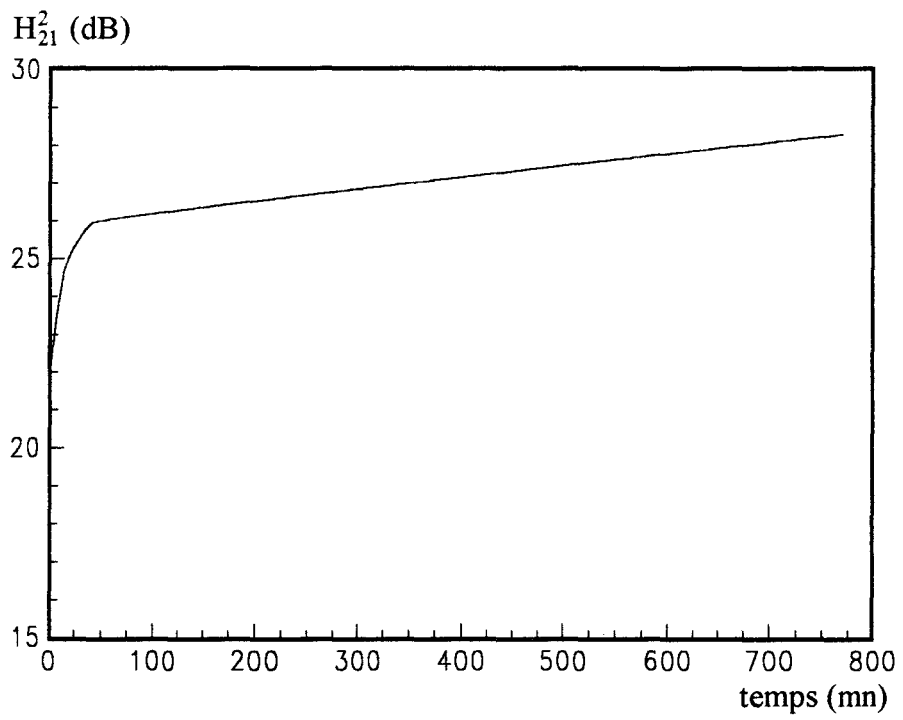


Figure III.17.a : Influence des expositions aux U.V. sur le H_{21}^2 mesuré à 2 GHz et à V_{gs} constant.

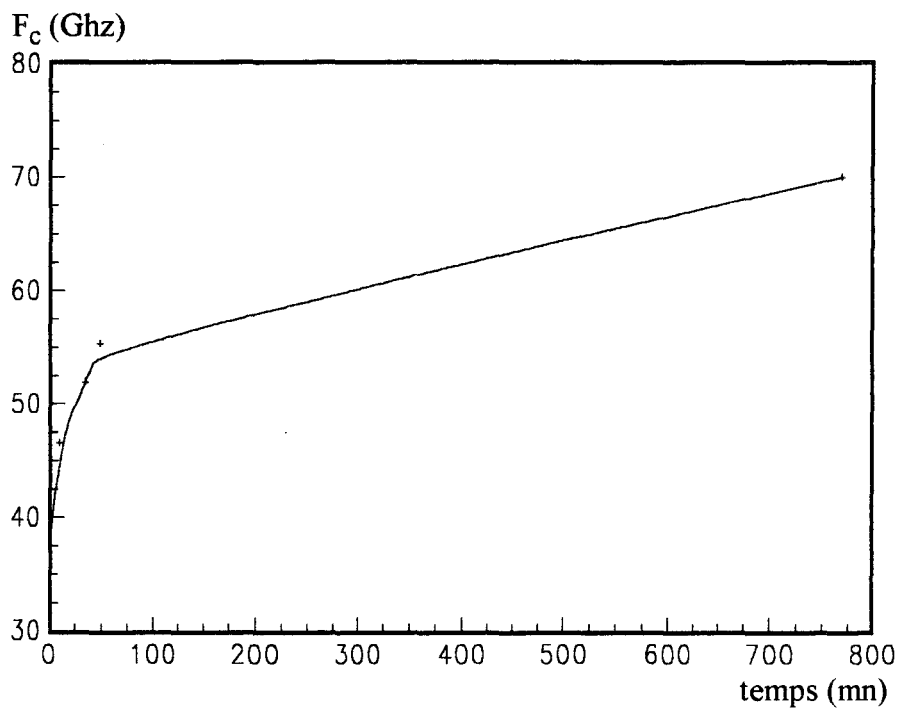


Figure III.17.b : Evolution de la fréquence de coupure F_c en fonction du temps d'exposition aux U.V.

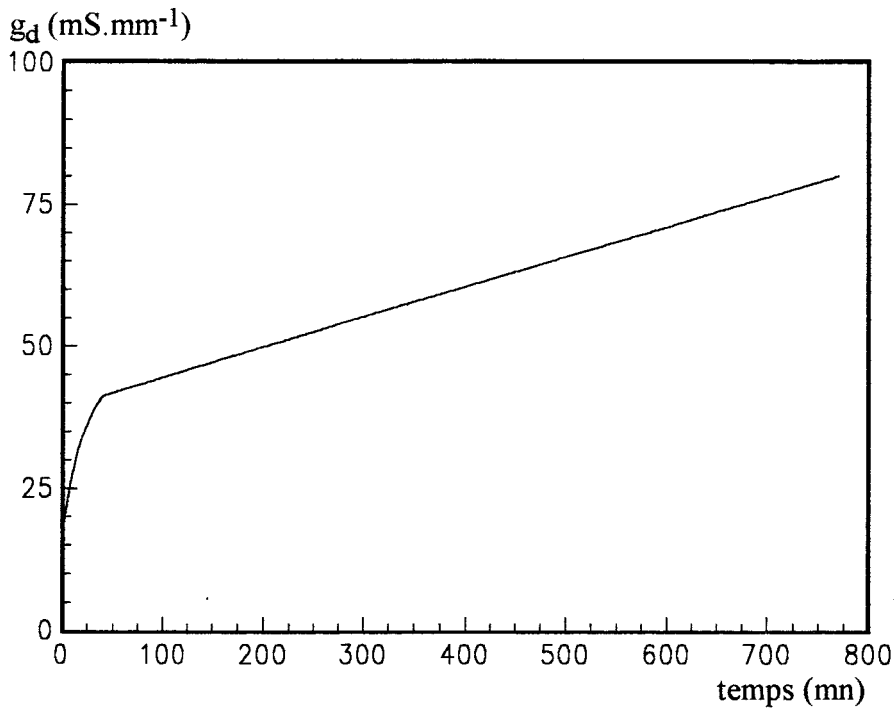


Figure III.18 : Variation de la conductance de drain g_d au cours des expositions aux U.V.

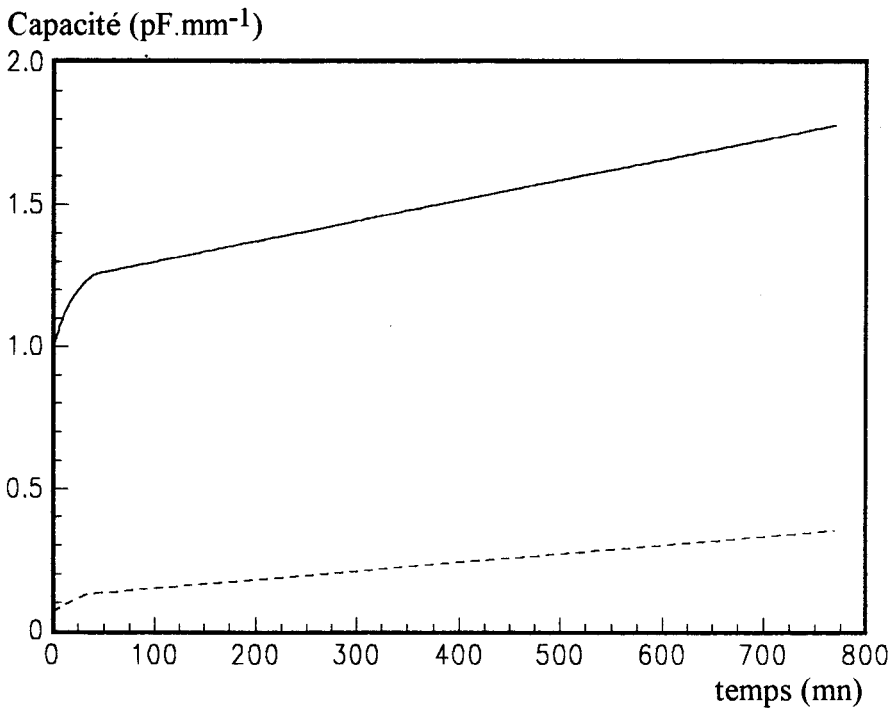


Figure III.19 : Evolutions de C_{gs} et C_{gd} en fonction du temps d'exposition aux U.V.

— C_{gs}
 - - - C_{gd}

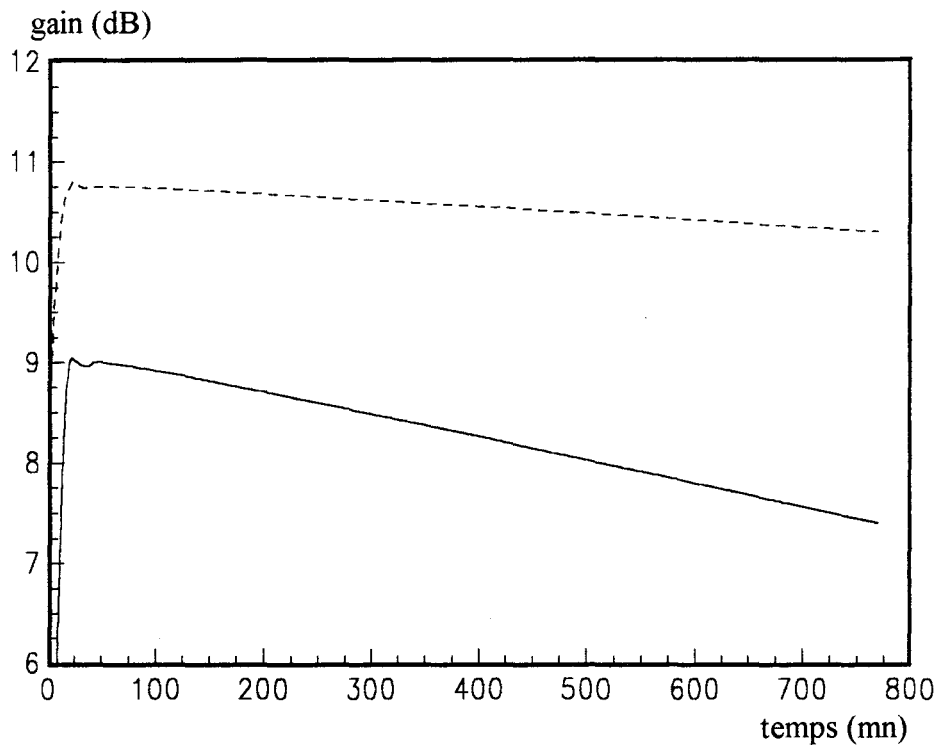


Figure III.20 : Evolution du MAG et du MSG d'un transistor en fonction des expositions aux U.V.

— MAG
--- MSG

submicronique cette conductance est majoritairement déterminée par l'inverse de la résistance de charge d'espace constituée par les électrons injectés par effet de champ électrique sous le canal conducteur dans la couche tampon. Le point important réside dans le fait que cette résistance diminue considérablement lorsque la longueur de la zone de charge d'espace où existe un champ important diminue et lorsque la vitesse des électrons augmente. Or ce sont bien les deux effets qui se produisent lorsque les deux zones d'accès source grille et grille drain deviennent plus conductrices puisqu'en particulier, compte tenu de l'augmentation du dopage effectif, les effets de bord de chaque côté de la grille se produisent sur des distances beaucoup plus courtes ;

- De ce fait et corrélativement il est possible d'expliquer l'augmentation des capacités C_{gs} et C_{gd} constatée sur la figure III.19 avec l'exposition aux rayonnements puisque les capacités additionnelles dues aux effets de bords de chaque côté de la grille dans le semiconducteur augmentent lorsque les deux zones d'accès deviennent plus conductrices. On ne peut exclure une augmentation de la capacité sous la grille liée à une légère augmentation du dopage actif sous l'électrode dû à la diffusion des rayonnements U.V.. Bien entendu, l'augmentation en valeur relative de la capacité C_{gd} est beaucoup plus importante dans la mesure où, contrairement à C_{gs} qui est constituée d'une capacité intrinsèque importante, C_{gd} est essentiellement déterminée par cette capacité additionnelle (la capacité intrinsèque C_{gd} étant très faible) ;
- Ces augmentations avec l'exposition aux U.V. de C_{gs} , C_{gd} , et g_d expliquent le fait que malgré l'augmentation du g_m et la diminution de R_s , l'accroissement du MAG et du MSG (figure III.20) est beaucoup moins important qu'on aurait pu l'espérer. L'augmentation de C_{gd} et de g_d compense les effets bénéfiques liés à l'accroissement du g_m et l'on peut même noter une diminution du gain du transistor lorsque, sous l'effet de l'exposition aux U.V., l'augmentation produite pour C_{gd} et g_d est devenue trop considérable.

Ces différents résultats, constatations et interprétations montrent que si grâce à l'utilisation de couches hydrogénées, il est possible de modifier de façon commode et très significative les performances d'un transistor, encore faut-il optimiser le processus afin d'obtenir la structure optimale susceptible des performances maximales. C'est ainsi que dans le cas de la structure et des procédés que nous venons d'étudier les résultats

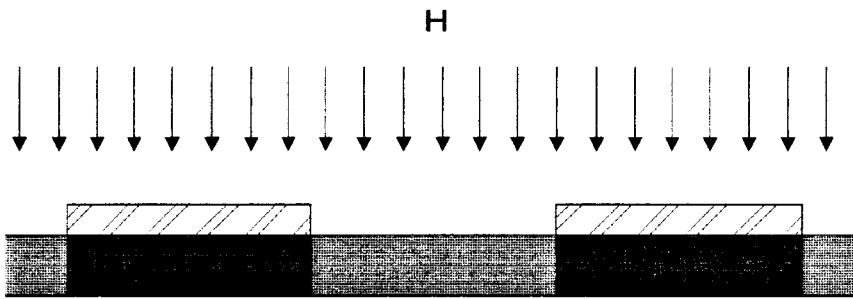
obtenus ne sont finalement pas totalement satisfaisants. Ils peuvent s'expliquer et, à la lumière de l'étude effectuée, des améliorations importantes devraient pouvoir être apportées au processus global de fabrication. Deux problèmes majeurs peuvent en effet être identifiés dans les procédés utilisés actuellement pour modifier les propriétés de la couche hydrogénée et deux critiques essentielles peuvent être formulées :

- la première résulte dans le fait que nous avons modifié simultanément et de façon symétrique les zones d'accès source grille et grille drain. Or la structure idéale que nous avons définie figure III.4 est caractérisée par des dopages beaucoup plus faibles côté drain. Dans toute réalisation future il faudra donc trouver un procédé adapté pour modifier de façon indépendante le dopage côté source et côté drain.
- la seconde réside dans l'utilisation de rayonnements U.V. dont les fréquences ne sont pas optimisées et compte tenu des longueurs d'ondes employées, il est très probable que les profondeurs de pénétration ne soient pas suffisantes pour modifier les propriétés conductrices de l'ensemble de la couche semiconductrice exposée. Or l'amélioration maximale des performances ne pourra sans doute être obtenue que si cette condition est respectée lors de l'augmentation de la conductivité de la couche semiconductrice source grille qui doit si possible être déneutrialisée sur toute son épaisseur.

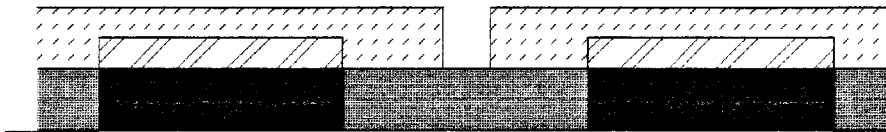
III.4.2. Réalisation du transistor hydrogéné à résistances d'accès dissymétriques par exposition aux U.V. (op759)

Pour réaliser des transistors à résistances d'accès faibles du côté source grille et élevées du côté grille drain, nous avons tenté d'utiliser pleinement les possibilités offertes par la déneutrialisation par U.V. et par les électrons. Il suffit dans ce but d'utiliser un masque pour cacher la zone grille drain qui ne doit pas être déneutrialisée par les U.V. L'épithaxie de départ est une couche de GaAs fine de $0,07 \mu\text{m}$ et dopée silicium à $4 \cdot 10^{18} \text{ at. cm}^{-3}$ (figure III. 12).

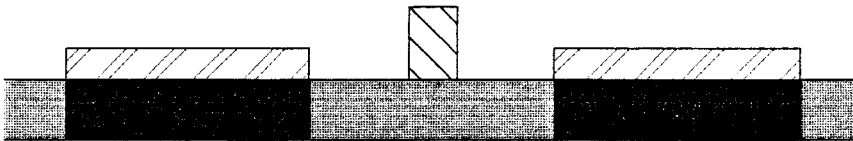
Dépôt des contacts ohmiques et exposition au plasma d'hydrogène



Lithographie



Dépôt de la grille








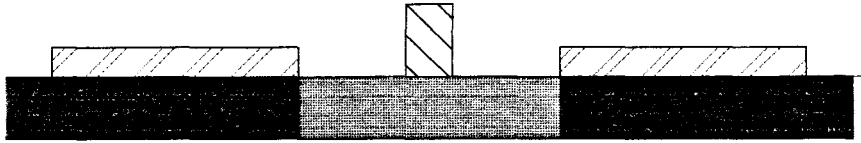
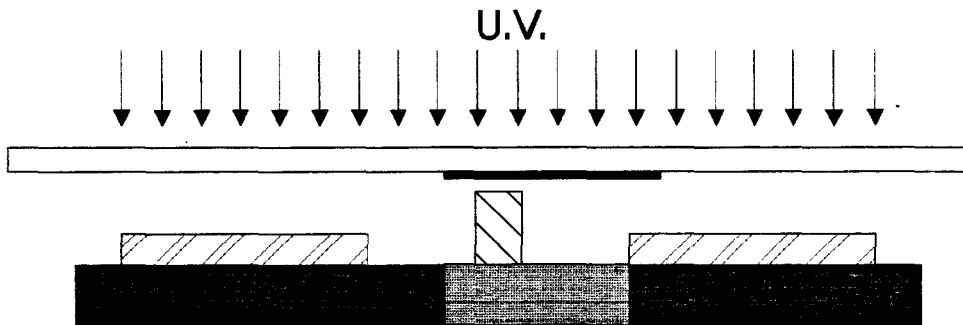
-  Zone non hydrogénée
-  Zone hydrogénée
-  Contacts ohmiques
-  Grille
-  Résine PMMA

Figure III.21 : Procédé d'élaboration du transistor hydrogéné à grille submicronique simple.

Zone active hydrogénée



Exposition aux U.V. avec utilisation d'un masque








-  Dopage actif important
-  Dopage actif moyen
-  Dopage actif faible
-  Contacts ohmiques
-  Grille

Figure III.22 : Procédé de réalisation de résistances d'accès dissymétriques pour un transistor hydrogéné à grille simple

III.4.2.1. Détail de la réalisation

Nous avons réalisé ces transistors à grille simple suivant le procédé décrit sur la figure III.21. Après la réalisation des contacts ohmiques, la zone entre source et drain a été hydrogénée en utilisant les paramètres suivants :

- Puissance de plasma : 2 watts ;
- Température d'échantillon : 220°C ;
- Temps d'exposition : 9 mn.

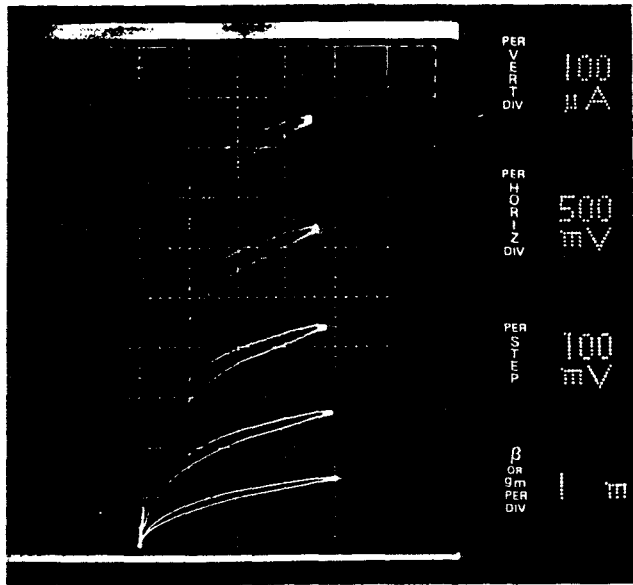
Puis, nous avons choisi de réaliser une grille submicronique simple dans le but d'éviter le dépôt de nitrure de silicium. En effet, nous avons préféré éviter l'étape de dégagement du diélectrique présent sur les zones d'accès qui risque d'apporter des perturbations supplémentaires à la surface de la couche. Un recess de 100 Å est effectué avant le dépôt du contact Schottky. Ensuite, les plots d'épaississements sont réalisés.

Les caractéristiques géométriques des transistors sont :

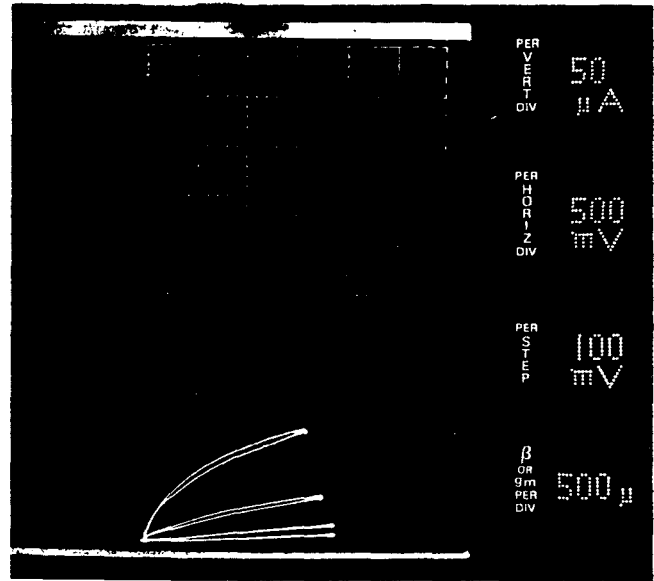
- Largeurs de grille : 50 et 75 μm ;
- Distance source drain : 1,5 μm ;
- Longueur de grille : 0,25 μm ;
- Recess : 100 Å.

III.4.2.2. Performances des transistors à résistances d'accès dissymétriques (op759)

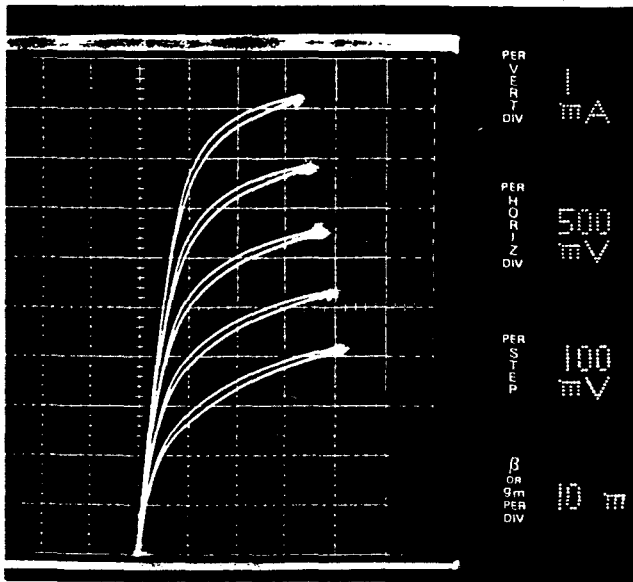
Les composants terminés, ils sont recuits à 240°C pendant une heure pour ajuster le dopage du canal. Ils sont ensuite caractérisés en statique et en hyperfréquences avant de procéder à la réactivation de la zone d'accès source grille de façon à connaître leurs performances avant exposition aux U.V. Pour effectuer la désactivation partielle des zones d'accès nous avons utilisé un masque d'oxyde de fer qui permet d'exposer uniquement la zone source grille aux rayonnements U.V. de l'aligneur (figure III.22). La plaquette a été exposée pendant une heure aux U.V. puis les transistors ont été caractérisés.



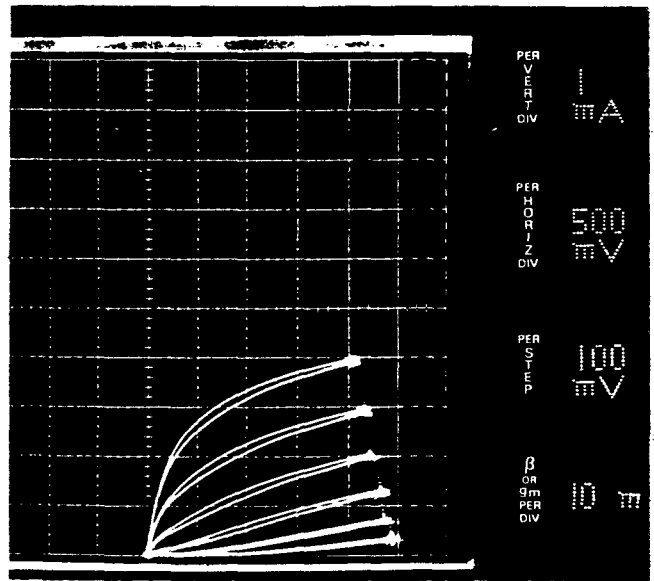
(a) $V_{gs} > 0$



$V_{gs} < 0$



(b) $V_{gs} > 0$



$V_{gs} < 0$

Figure III.23 : Caractéristiques statiques I(V) des transistors hydrogénés à zones d'accès dissymétriques (a) avant et (b) après exposition aux U.V. La durée totale d'exposition est d'une heure.
 $L_g = 0,2 \mu\text{m}$ et $W = 50 \mu\text{m}$

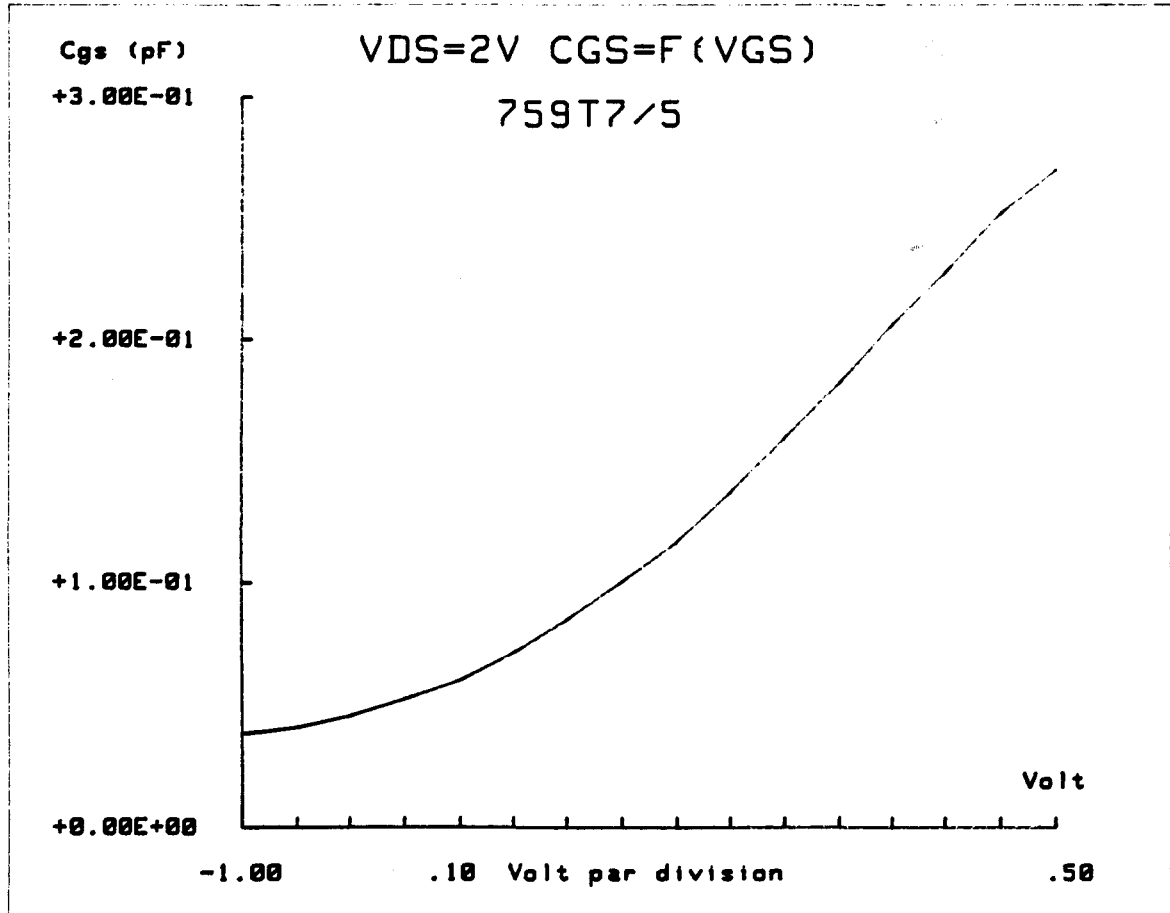
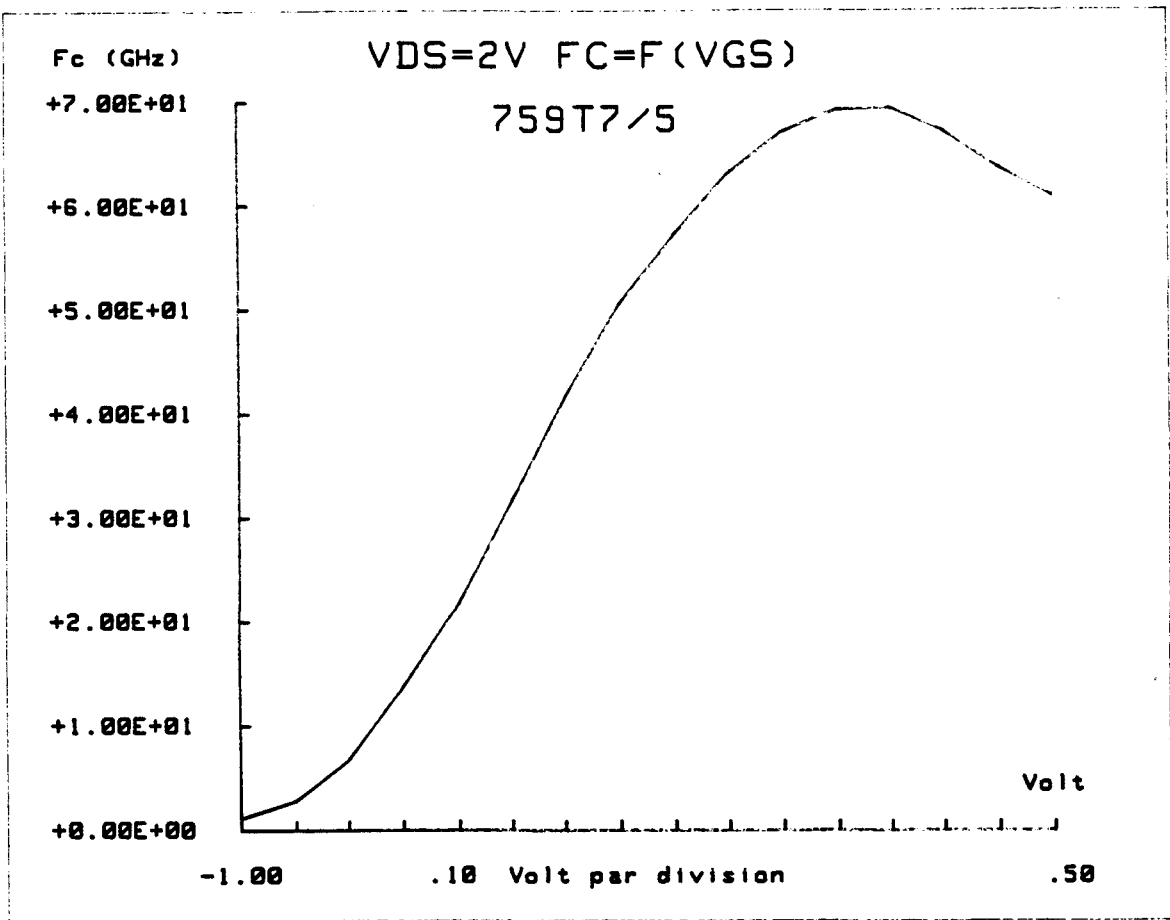


Figure III.24 : Evolution de Fc et Cgs en fonction de Vgs d'un transistor de l'op759 après exposition aux U.V..
W = 150 μm et lg = 0,2 μm .

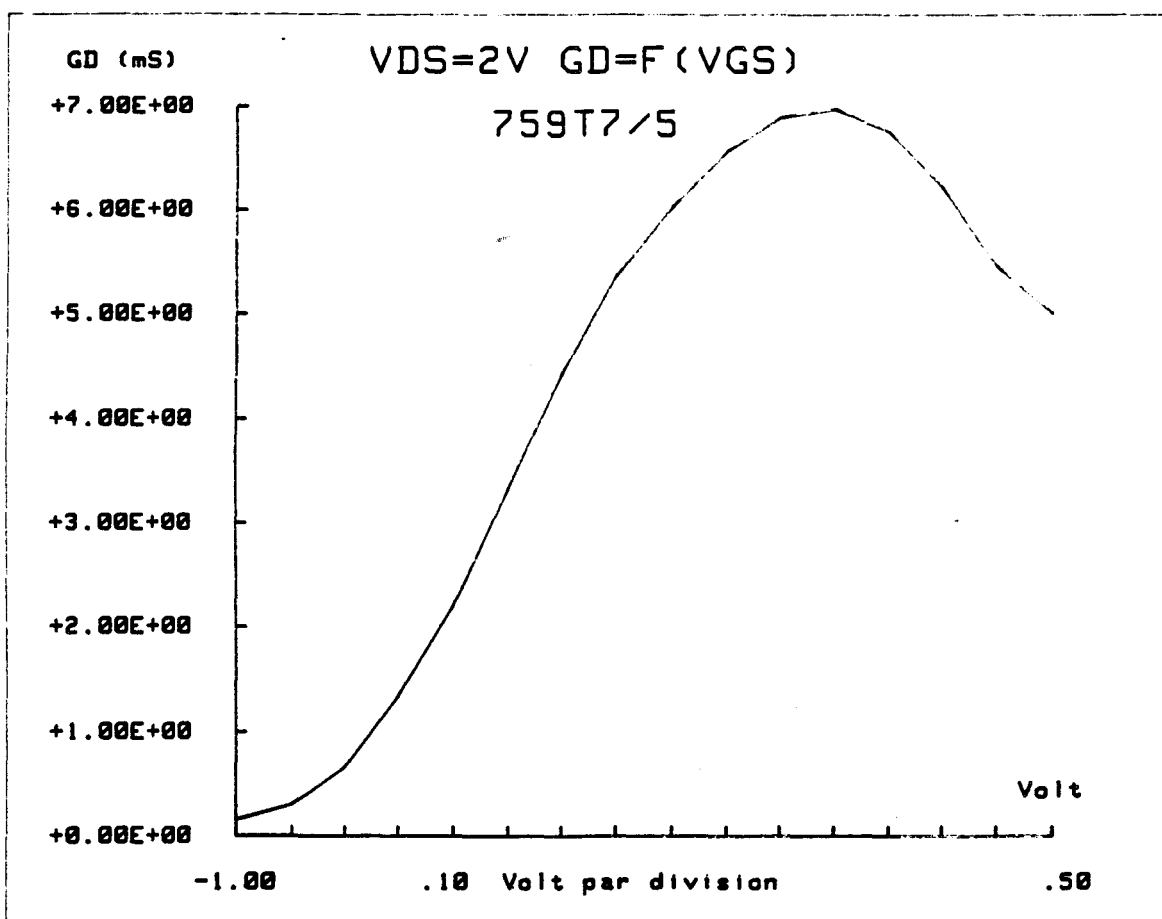
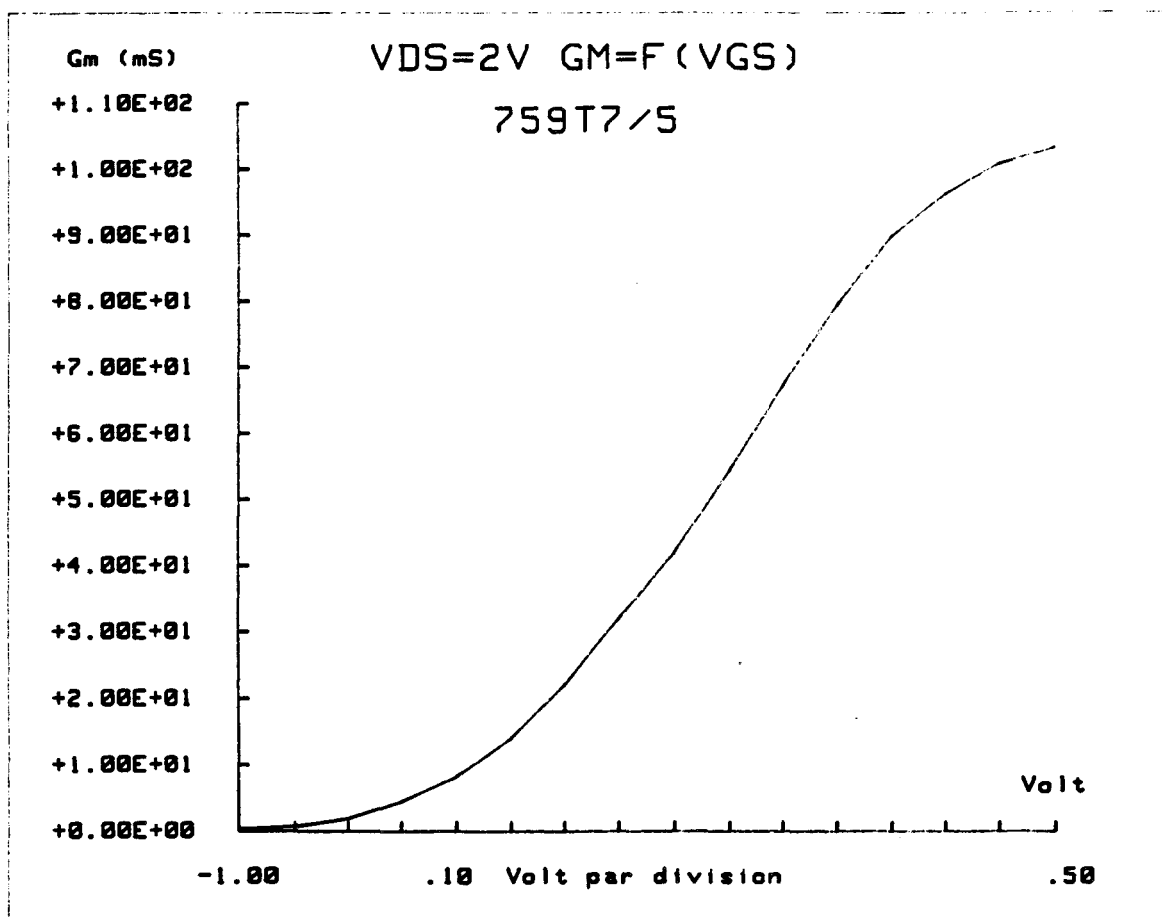


Figure III.25 : Evolution de g_m et g_d en fonction de V_{gs} d'un transistor de l'op759 après exposition aux U.V..
 $W = 150 \mu\text{m}$ et $l_g = 0,2 \mu\text{m}$.

op759	initial	après exposition aux U.V.
η	1,4	1,48
V_b (volt)	0,47	0,46
V_n (volt)	-0,4	-1
I_{ds} (mA.mm ⁻¹) à $V_{gs} = 0,5$ V	33	367
R_s (Ω .mm)	2,64	0,56
R_d (Ω .mm)	2,41	0,83
C_{gs} (pF.mm ⁻¹)	0,89	1,27
C_{gd} (pF.mm ⁻¹)	0,121	0,073
H_{21}^2 (dB) à 2 GHz	16,6	28,1
MSG (dB) à 26 GHz	5	16
F_c (GHz)	17,1	70
g_m (mS.mm ⁻¹)	96	700
g_{mext} (mS.mm ⁻¹)	62,4	473
g_d (mS.mm ⁻¹)	26	34,1

Tableau V : Caractéristiques des transistors hydrogénés à grille simple de 0,25 μ m élaborés sur une couche de GaAs fine. Les caractéristiques initiales ont été obtenues sur des transistors hydrogénés et recuits pendant une heure à 240°C. Ces mêmes composants ont été ensuite exposés aux U.V. pendant une heure de façon dissymétrique côté source grille et puis ils ont été caractérisés.

Source d'U.V. : lampe de l'aligneur.

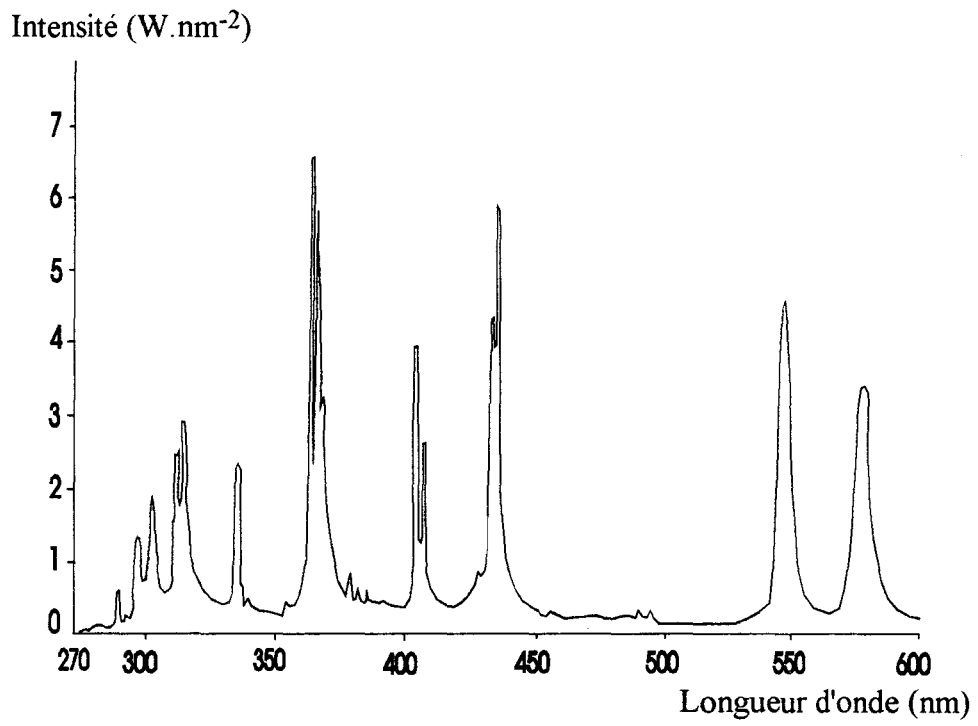


Figure III.26 : Spectre de la lampe de l'aligneur (HBO 200 W).

Les principales caractéristiques des transistors avant et après exposition aux U.V. sont reportés figures III.23 à III.25 et dans le tableau V. On peut noter que contrairement à nos prévisions la résistance R_d a diminué malgré le fait qu'elle n'a pas été exposée aux U.V. et ceci de façon beaucoup plus importante qu'on ne le pensait. Ceci montre que le cache en oxyde de fer n'est pas totalement imperméable aux longueurs d'ondes émises par la source de l'aligneur. On peut cependant noter que la résistance du côté source a plus décré que celle du côté drain. S'il apparaît néanmoins difficile de juger pleinement de l'efficacité du procédé d'exposition aux U.V. on peut néanmoins noter que les performances obtenues sont globalement assez satisfaisantes : une fréquence de coupure de 70 GHz et une transconductance intrinsèque de 700 mS.mm⁻¹. Aussi, contrairement au cas précédent on constate que l'exposition aux U.V. s'est traduite par une augmentation importante du MSG et d'une diminution de la capacité C_{gd} .

Cette réalisation de transistors dissymétriques a montré que la désactivation des zones hydrogénées par le rayonnement U.V. de l'aligneur était tout à fait réalisable mais qu'il fallait utiliser un masque beaucoup plus imperméable aux U.V. émis par la lampe de l'aligneur. Il faut savoir que la lampe de l'aligneur a été utilisée sans filtre et que les longueurs d'ondes émises sont de 365 nm à 600 nm (figure III.26). Par ailleurs, compte tenu de la durée de l'exposition aux U.V. on ne peut exclure une décomplexation thermique liée à l'échauffement de la plaque. Pour les prochaines réalisations de transistors par cette technique il faudra éviter les effets thermiques. Par ailleurs on pourra éventuellement utiliser un masque en chrome qui a la caractéristique d'être totalement imperméable aux U.V..

III.4.2.3. Etude de bruit généré par le composant

Des mesures des quatre paramètres (F_{min} , R_n , Γ_{opt} et G_{ass}) caractérisant le bruit ont été réalisées sur ces transistors hydrogénés (op759) où :

- F_{min} est le facteur de bruit minimum ;
- R_n est la résistance équivalente de bruit ;
- Γ_{opt} est le coefficient de réflexion optimum ;
- G_{ass} est le gain associé.

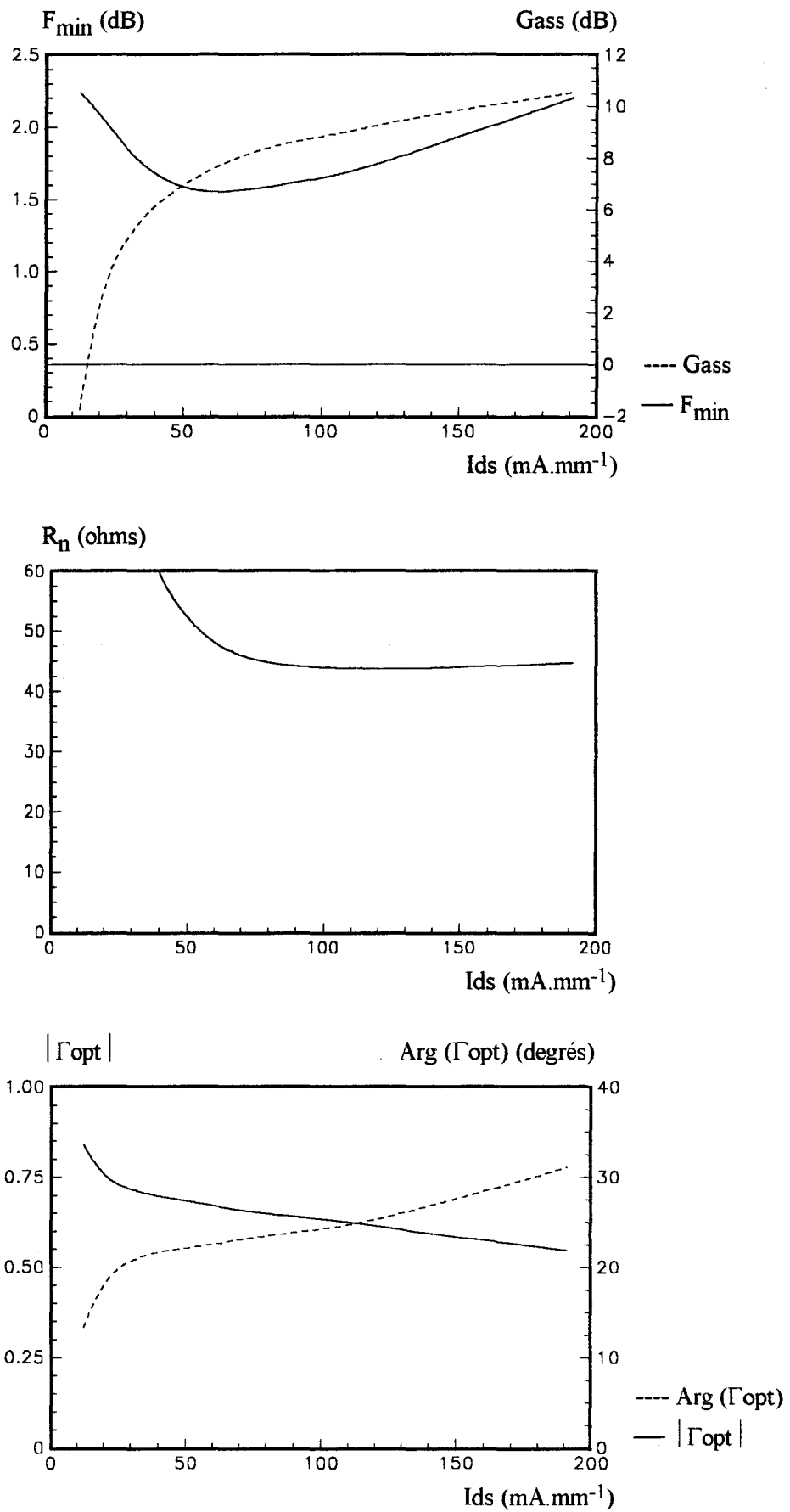


Figure III.27 : Caractéristiques des quatre paramètres de bruit en fonction du courant I_{ds} mesurés pour un transistor hydrogéné (op759) à $V_{ds} = 2 \text{ V}$ et à 12 GHz.
 $W = 150 \mu\text{m}$ et $l_g = 0,2 \mu\text{m}$.

Ces paramètres constituent une donnée importante pour la réalisation des circuits hyperfréquences. La méthode de mesure utilisée a été développée au sein du D.H.S. par l'équipe de A. Cappy [9, 10] qui a mis au point le système de mesure automatique de bruit sous pointes.

Les principaux paramètres de bruit obtenus pour un transistor de développement de 150 μm sont donnés sur la figure III.27. Nous pouvons noter que ces résultats sont très encourageants même si les valeurs des résistances d'accès R_s , R_d et R_g de ces composants sont relativement élevées. Par conséquent, on peut s'attendre à de meilleures performances en bruit des transistors hydrogénés en optimisant leurs éléments extrinsèques.

III.4.3. Fabrication de transistors hydrogénés avec une grille de largeur 0,1 μm à résistances d'accès dissymétriques (op773)

Pour réaliser des transistors plus performants, la démarche la plus naturelle est de diminuer encore la longueur de grille. Cette approche est aujourd'hui possible au sein de l'I.E.M.N. puisque nous disposons d'un masqueur électronique performant. C'est pourquoi, au terme de ce travail, nous avons tenté ce type de démarche qui pose néanmoins un certain nombre de difficultés :

- le premier problème rencontré réside dans le fait que la résistance d'accès de grille croît généralement comme l'inverse du carré de la longueur de grille. De ce fait, si l'on veut éviter des valeurs de R_g prohibitives, il faut utiliser des structures en "T" et/ou diminuer considérablement les largeurs des grilles élémentaires donc, pour une largeur totale de grille, le nombre de grilles en parallèle.
- le second problème est que lorsque la longueur de la grille diminue, il faut réduire l'épaisseur de la couche (et sans doute augmenter aussi son dopage) de façon à conserver un rapport L_g/a identique. On gardera ainsi une structure similaire à celles utilisées pour les grilles plus longues.

Malheureusement, compte tenu d'un certain nombre de problèmes liés à la mise en route de la nouvelle Centrale de Technologie de l'I.E.M.N., nous n'avons pas été en mesure de respecter ces différents impératifs. C'est ainsi que les couches épitaxiées

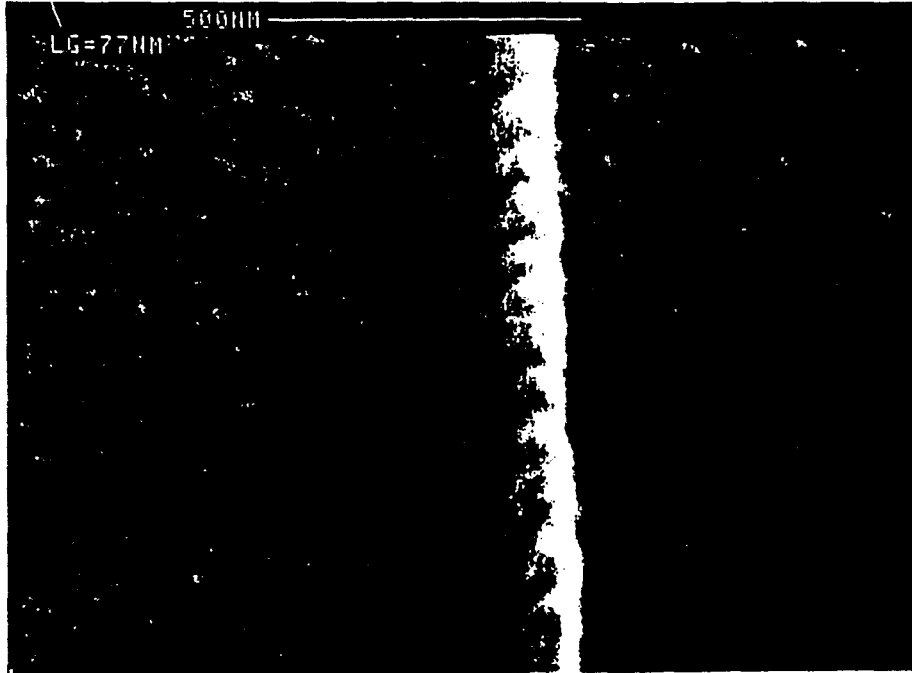
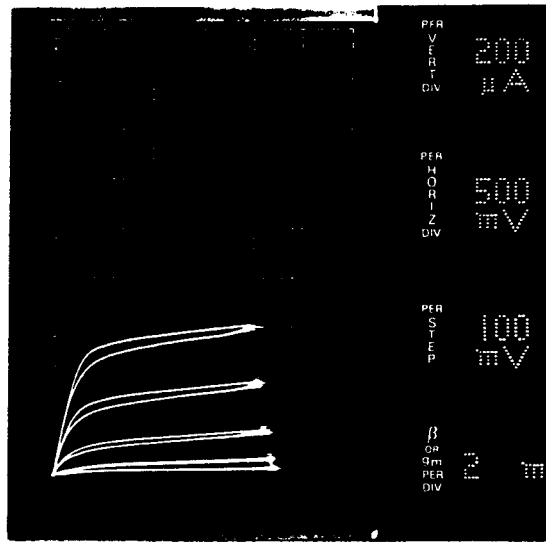
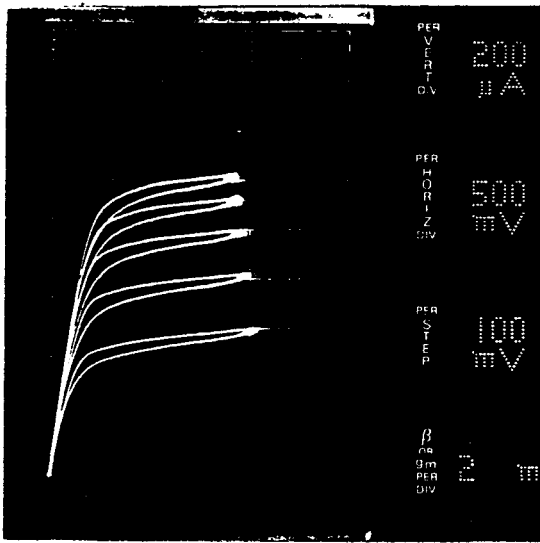


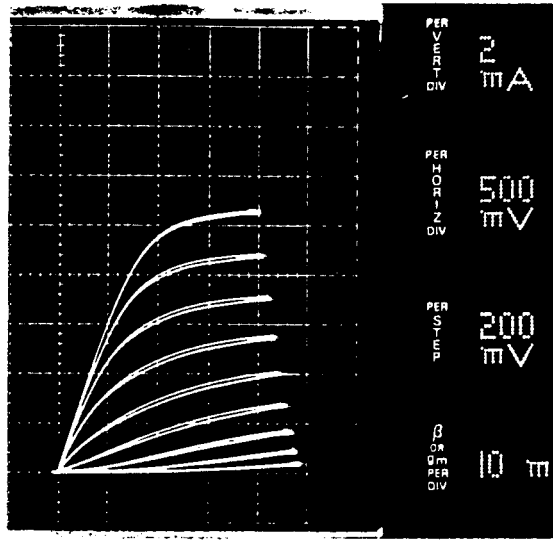
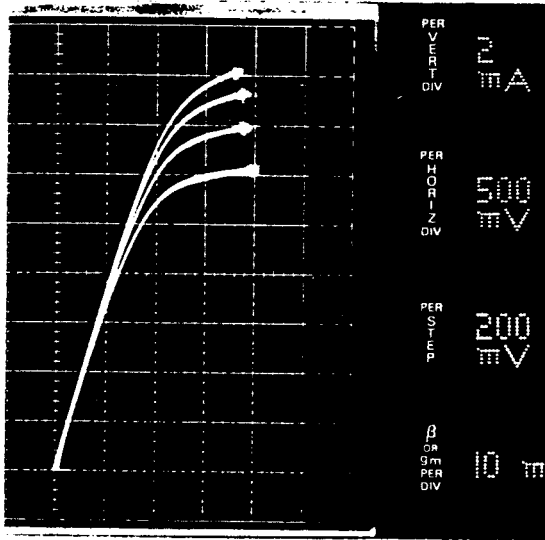
Figure III.28 : Photographie d'une grille submicronique ($l_g = 77 \text{ nm}$) obtenue par microscope électronique à balayage.



Initial

(a) $V_{gs} > 0$

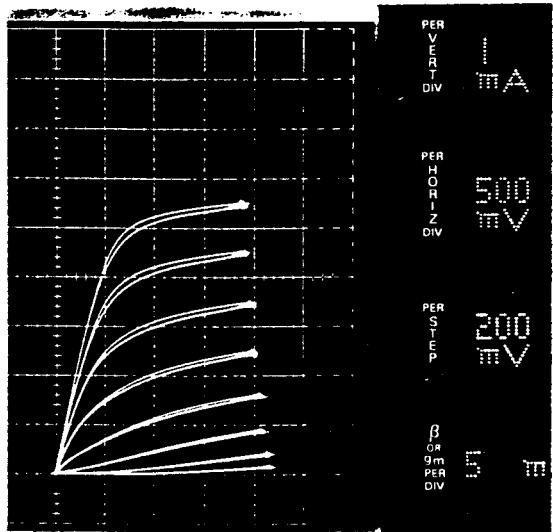
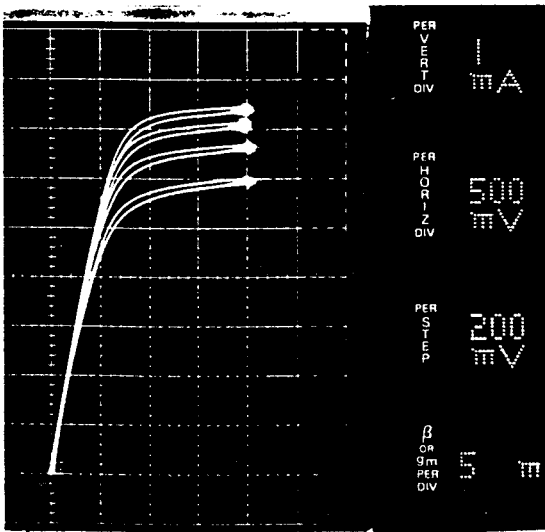
$V_{gs} < 0$



après
exposition
aux U.V.

(b) $V_{gs} > 0$

$V_{gs} < 0$



après
exposition
au faisceau
d'électrons

(c) $V_{gs} > 0$

$V_{gs} < 0$

Figure III.29 : Caractéristiques statiques I(V) des transistors hydrogénés ayant des longueurs de grilles de $0,1 \mu\text{m}$ (op773). $W = 50 \mu\text{m}$.
(a) initial, (b) après exposition aux U.V., (c) après passage au faisceau d'électrons.

op773 - 1	initial	après exposition aux U.V.
η	1,41	1,48
V_b (volt)	0,53	0,53
V_p (volt)	-0,6	-1,8
I_{ds} (mA.mm ⁻¹)	18	240
R_s (Ω .mm)	8,85	0,75
R_d (Ω .mm)	9,15	1,95
C_{gs} (pF.mm ⁻¹)	0,167	0,45
C_{gd} (pF.mm ⁻¹)	0,064	0,04
H_{21}^2 (dB) à 2 GHz	13,2	30,6
MSG (dB) à 26 GHz	1,9	10,7
F_c (GHz)	15,8	92
g_m (mS.mm ⁻¹)	16,7	231
g_{mext} (mS.mm ⁻¹)	11,8	198
g_d (mS.mm ⁻¹)	4,1	25,3

Tableau VI : Caractéristiques des transistors hydrogénés à grille simple de 0,1 μ m élaboré sur une couche de GaAs:Si de faible épaisseur. Les performances initiales ont été obtenues sur des transistors hydrogénés et recuits pendant une heure à 240°C. Ces mêmes composants ont été ensuite exposés aux U.V. pendant 45 minutes. Puis, ils ont été caractérisés en hyperfréquence et en statiques.

Source d'U.V. : lampe de l'aligneur.

utilisées, identiques aux précédentes réalisations (op695 et op759), sont beaucoup trop épaisses pour un transistor de 0,1 μm de longueur de grille. De plus, la technologie de réalisation de grilles en "T" avec les nouveaux moyens de lithographie n'était pas encore au point au moment où nous avons terminé ces réalisations technologiques. De ce fait, le transistor que nous avons pu réaliser et caractériser dans le cadre de ce travail est très loin d'être optimal et des progrès considérables devraient être possibles en utilisant des épitaxies encore plus fines et des structures de grilles en "T".

Les structures étudiées ont été réalisées en utilisant des procédés très voisins de ceux utilisés pour l'opération précédente (op 759). La différence essentielle réside dans le fait que la grille réalisée est maintenant très largement submicronique et peut atteindre dans certain cas des longueurs aussi faibles que 700 Å (figure III.28). Les caractéristiques obtenues avec ce type de structure avant toute exposition aux U.V. ou au faisceau d'électrons sont présentées sur la figure III.29. Les résultats résumés sur la colonne de gauche des tableaux VI et VII sont évidemment très mauvais dans la mesure où les zones d'accès sont très faiblement conductrices. Par conséquent, les valeurs observées pour R_s et R_d sont prohibitives et il en résulte des valeurs de transconductance très faibles pour les raisons précédemment évoquées lorsque nous avons interprété les résultats obtenus sur l'opération 759.

III.4.3.1. Exposition aux U.V.

Afin de palier à cet inconvénient majeur, nous avons donc exposé une partie des composants réalisés à un rayonnement U.V. Compte tenu de l'expérience précédente, nous nous sommes efforcés de n'exposer que la zone d'accès source grille et de limiter l'échauffement lié au rayonnement en procédant par des expositions successives. Les résultats obtenus (illustrés sur la figure III.29.b et dans la deuxième colonne du tableau V) ne sont pas totalement satisfaisants. Certes, on constate une diminution notable de la résistance entre grille et source (et donc de R_s) beaucoup plus importante que celle de R_d . Néanmoins, la valeur obtenue pour R_s est encore trop élevée et l'on aurait pu s'attendre à une diminution beaucoup moins importante de la résistance entre grille et drain. On peut cependant noter une augmentation spectaculaire des performances tant au niveau de H_{21} que de MSG et de la fréquence de coupure qui atteint 82 GHz. De plus, un point important à noter est que cet accroissement de performance ne s'est pas accompagné d'une augmentation de C_{gd} . Cette constatation montre clairement l'avantage d'une exposition aux U.V. ne se limitant qu'au côté

op773 - 2	initial	après exposition au faisceau d'électrons
η	1,46	1,67
V_b (volt)	0,47	0,44
V_p (volt)	-0,4	-1,4
I_{ds} (mA.mm ⁻¹)	13	120
R_s (Ω .mm)	11,25	0,94
R_d (Ω .mm)	14,25	2,78
C_{gs} (pF.mm ⁻¹)	0,323	0,253
C_{gd} (pF.mm ⁻¹)	0,08	0,046
H_{21}^2 (dB) à 2 GHz	11	28,6
MSG (dB) à 26 GHz	2,3	8,9
F_c (GHz)	19	76,9
g_m (mS.mm ⁻¹)	41	148
g_{mext} (mS.mm ⁻¹)	18	120
g_d (mS.mm ⁻¹)	16	25

Tableau VII : Caractéristiques des transistors hydrogénés à grille simple de 0,1 μ m (op773). Les caractéristiques initiales ont été obtenues sur les transistors hydrogénés puis recuit pendant une heure à 240°C. Ces mêmes composants ont été exposés du côté source grille par un faisceau d'électrons et puis ils ont été caractérisés.

source grille. La transconductance reste malheureusement un peu faible et ceci peut sans doute s'expliquer par la valeur encore beaucoup trop élevée de R_g .

En résumé, l'ensemble de ces résultats est encourageant surtout si l'on considère le fait que la structure réalisée était caractérisée par un rapport L_g/a proche de 1!! Bien entendu, il aurait été intéressant de faire une étude plus complète des propriétés en très hautes fréquences dans le domaine des ondes millimétriques. Malheureusement, dans le cas étudié, les propriétés observées sont complètement déterminées et limitées par les valeurs anormalement élevées des résistances de grille obtenues. Les déterminations expérimentales en hyperfréquence de R_g donnent en effet des valeurs comprises entre 60 et 90 ohms et ces valeurs s'expliquent facilement en considérant la résistance de métallisation qui, pour une largeur de grille de 100 μm et une largeur de grille de 0,1 μm est de 1000 ohms, ce qui correspond à une résistance R_g théorique de 83,3 ohms en utilisant la relation classique :

$$R_g = \frac{R_m}{3n^2}$$

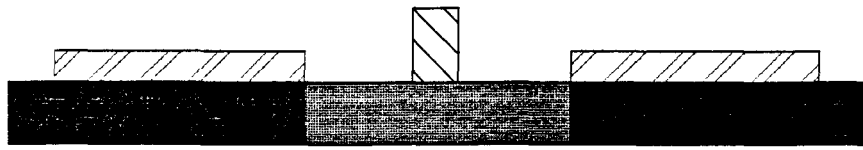
où n est le nombre de grilles en parallèle qui est ici égal à 2.

Bien entendu, compte tenu de ces valeurs élevées de R_g , les performances en hyperfréquences ne peuvent être de qualité. D'autres réalisations utilisant des grilles en "T" ou des largeurs élémentaires beaucoup plus faibles (15 à 30 μm) sont donc nécessaires pour exploiter pleinement les possibilités de la structure.

III.4.3.2. Réactivation par faisceau d'électrons

Il nous a semblé intéressant d'étudier également les effets d'une exposition aux électrons (figure III.30.a). Dans ce cas, il est possible de choisir très précisément la région que nous voulons irradier et la figure III.30.b montre la géométrie exacte de la zone entre source et grille qui a été exposée au faisceau d'électrons. Des études beaucoup plus approfondies auraient été nécessaires pour définir la zone et les conditions d'exposition aux électrons optimales. Nous ne faisons ici que donner les premiers résultats obtenus qui sont illustrés dans la figure III.29.c et la deuxième

Zone active hydrogénée



Exposition localisée à un faisceau d'électrons

E.B.

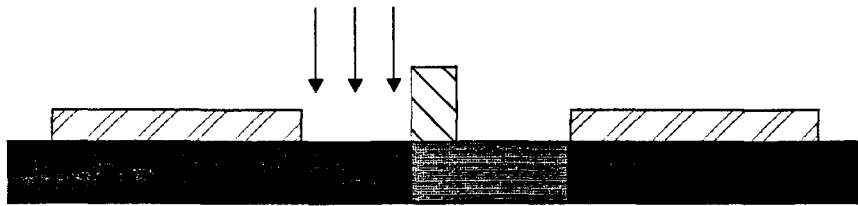


Figure III.30.a : Réactivation de la zone source grille du transistor hydrogéné par faisceau d'électrons.

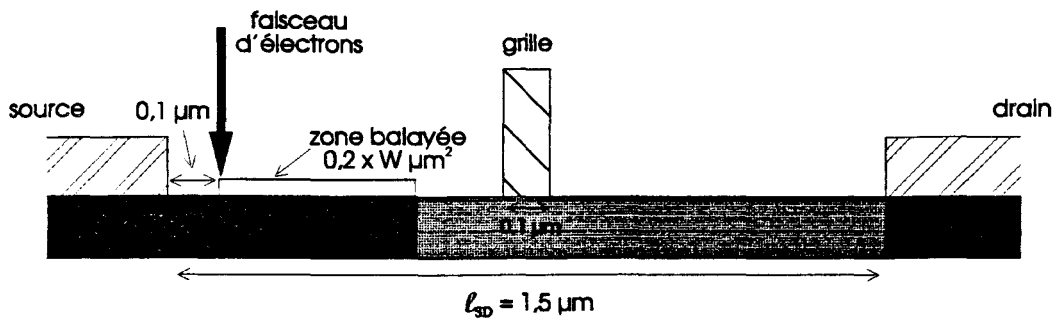


Figure III.30.b : Surface balayée par le faisceau d'électrons du masqueur électronique pour réaliser la déneutralisation de la zone d'accès source grille. W est la largeur du composant.

- Zone non hydrogénée
- Zone hydrogénée
- Contacts ohmiques
- Grille

colonne du tableau VI. Ici encore, on constate une diminution importante de R_s et R_d avec une dissymétrie marquée entre ces deux valeurs, mais on aurait cependant pu s'attendre à avoir des valeurs plus faibles de R_s et des valeurs plus fortes de R_d . L'amélioration constatée est cependant assez spectaculaire quoique inférieure à celle réalisée suite à une exposition aux U.V.. Un travail plus complet dans des conditions plus optimisées (par exemple avec des électrons de plus faibles énergies) aurait sans doute permis d'obtenir des performances plus élevées. Constatons que les premiers résultats obtenus sont encourageants puisqu'ils nous ont montré que l'exposition sélective aux électrons constituait un moyen efficace de modifier à volonté les caractéristiques d'une région donnée d'un composant.

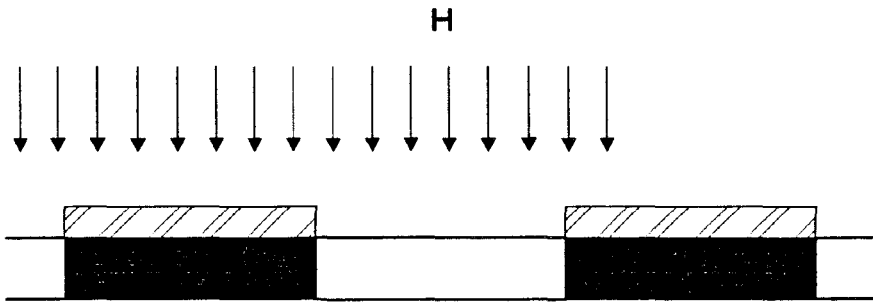
III.5. PREMIER ESSAI DE REALISATION DE HIGFET PAR PROCÉDE D'HYDROGENATION

Afin d'étudier toutes les possibilités de la neutralisation par hydrogène pour réaliser des transistors à effets de champ, nous avons essayé à partir de ce procédé de réaliser un HIGFET. Ce type de composants, qui fonctionne par enrichissement à tension de grille largement positive, présente dans sa réalisation une difficulté majeure : la couche active sous la grille doit être non dopée et de ce fait pour assurer les contacts source et drain, il faut réaliser par implantation ionique des caissons n^+ ou p^+ suivant la nature du canal que l'on veut réaliser. Cependant, la nécessité de procéder après implantation à un recuit impose pour la réalisation de la grille d'utiliser des métaux réfractaires et ce type de technologie est peu adapté aux hyperfréquences compte tenu des valeurs très importantes des résistances de métallisations.

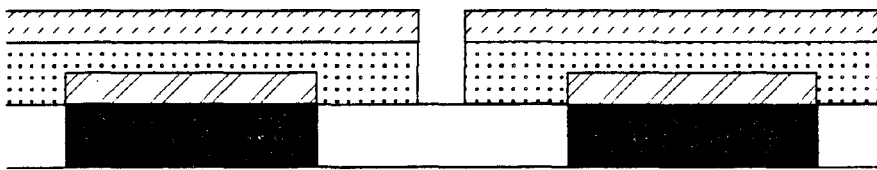
L'utilisation de la neutralisation par hydrogénation permet de s'affranchir de cette difficulté. On peut, en effet, partir d'une couche suffisamment dopée pour permettre la fabrication de contacts ohmiques puis réduire fortement le dopage actif de la couche par hydrogénation avant le dépôt de la grille qui, de cette façon, reposera sur une couche pratiquement non dopée. La réalisation d'une telle structure a nécessité la mise au point d'un ensemble de nouveaux procédés technologiques que nous allons ici décrire sommairement.

Les caractéristiques des épitaxies utilisées sont données sur la figure III.31. On note la valeur élevée de la composition de l'alliage utilisée pour la couche $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0,4$) ceci dans le but d'obtenir des discontinuités de potentiel suffisantes pour

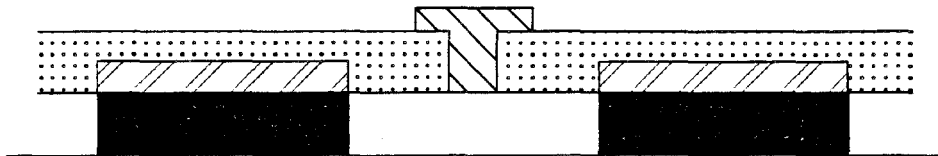
Dépôt des contacts ohmiques et exposition au plasma d'hydrogène



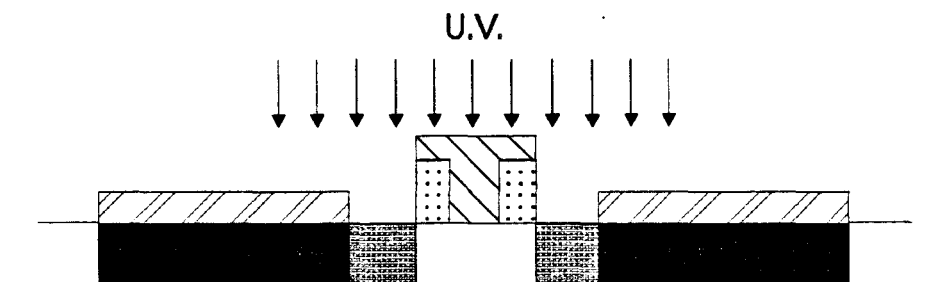
Lithographie et gravure du diélectrique



Dépôt de la grille



Gravure du diélectrique et exposition aux U.V.










-  Zone non hydrogénée
-  Zone hydrogénée (partiellement réactivée)
-  Zone fortement hydrogénée
-  Contacts ohmiques
-  Grille
-  Diélectrique
-  Résine PMMA

Figure III.32 : Procédé d'élaboration du HIGFET hydrogéné à grille en "T".

pouvoir appliquer des tensions de grilles importantes sans provoquer des courants trop élevés. Par ailleurs, on peut constater la valeur importante de la concentration en impuretés dans cette couche qui est assez élevée contrairement aux caractéristiques des couches utilisées dans les procédés classiques de réalisation de HIGFET.

GaAs:Si 5.10 ¹⁸ at.cm ⁻³ 150 Å
AlGaAs:Si x = 0,4 5.10 ¹⁸ at.cm ⁻³ 400 Å
GaAs NID 2000 Å
AlGaAs x = 0,1 NID 3000 Å
GaAs NID 1000 Å
Substrat GaAs NID

Figure III.31 : Couche utilisée pour la réalisation de HIGFET hydrogénés.

III.5.1. Procédé de réalisation du HIGFET hydrogéné

Les principales étapes de la réalisation du transistor sont illustrées sur la figure III.32. Les contacts ohmiques sont tout d'abord réalisés sur les couches très dopées. Une exposition au plasma permet alors de neutraliser le dopage actif dans toutes les couches non protégées par les contacts ohmiques de source et drain et les conditions d'hydrogénation utilisées sont :

- Puissance de plasma : 2 watts ;
- Température d'échantillon : 220°C ;
- Temps d'exposition : 15 mn.

Après un dépôt sur tout le composant d'une couche de nitrure de silicium, une ouverture est pratiquée dans ce matériau diélectrique afin de pouvoir déposer la grille. La longueur de la grille est ainsi déterminée par les dimensions de cette ouverture qui est ici environ 0,2 µm. Une nouvelle étape de lithographie permet ensuite de déposer le

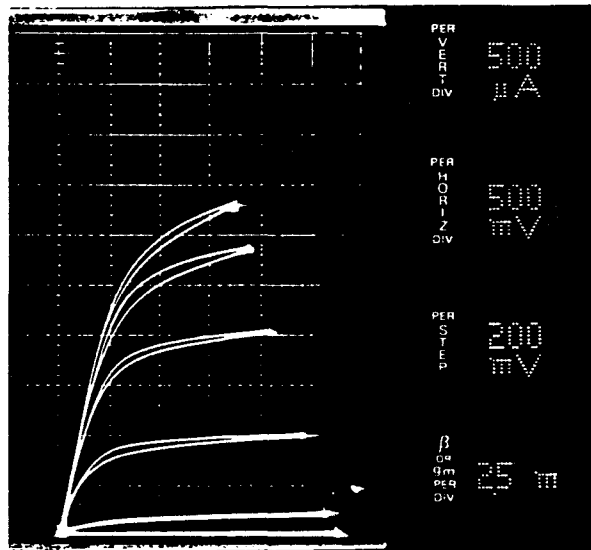


Figure III.33 : Caractéristiques statiques $I(V)$ à $V_{gs} > 0$ (V_{gs} max = 1,2 V) du HIGFET hydrogéné après une exposition de 30 minutes aux U.V..
 $L_g = 0,2 \mu\text{m}$ et $W = 100 \mu\text{m}$.

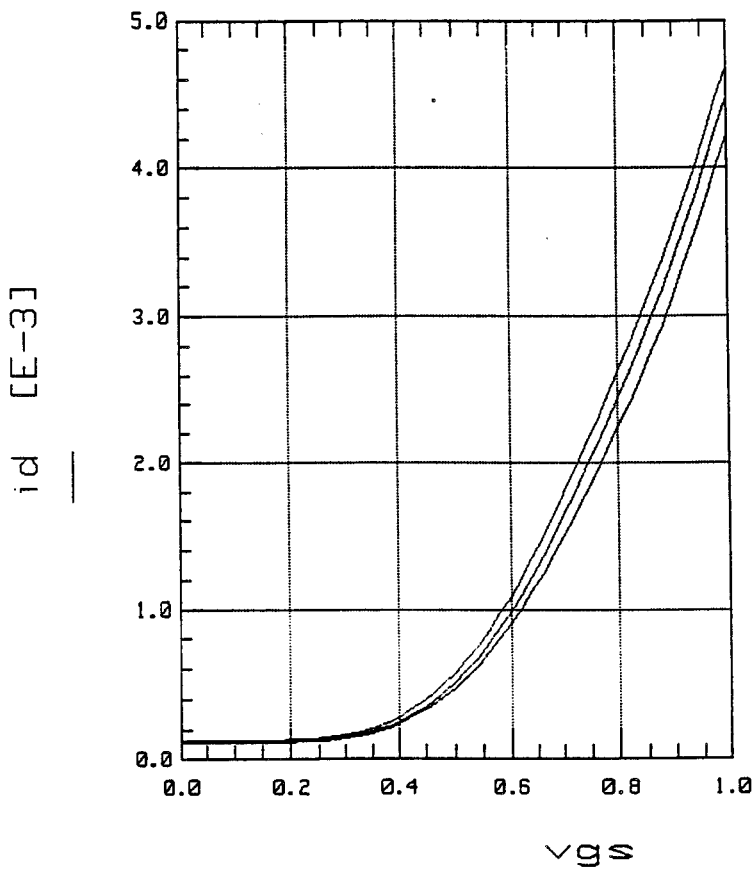


Figure III.34 : Evolution du courant I_d en fonction de la tension V_{gs} appliquée. $L_g = 0,2 \mu\text{m}$ et $W = 100 \mu\text{m}$.

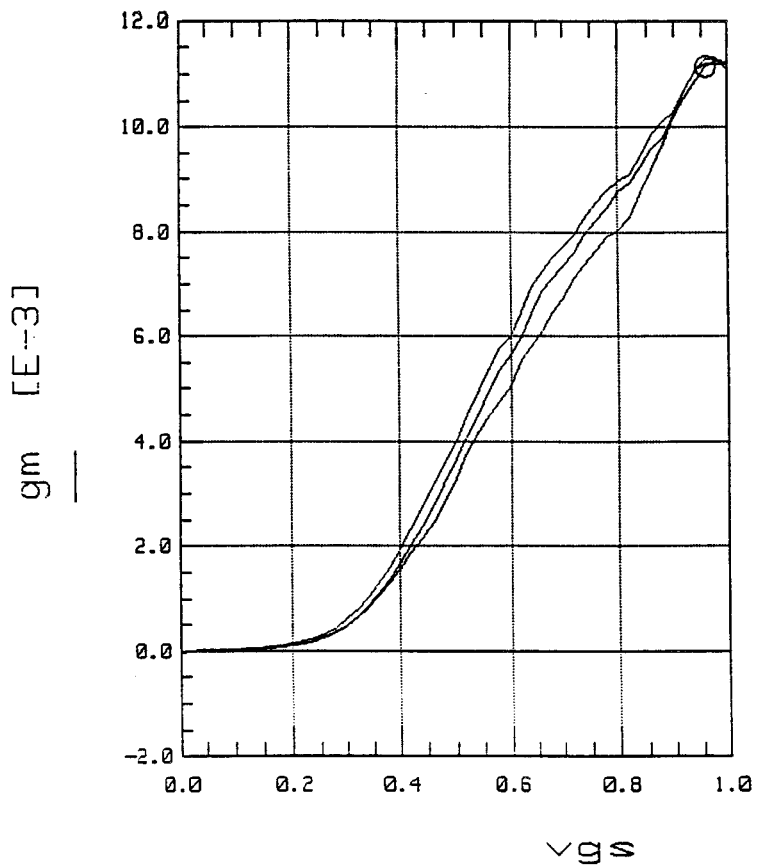


Figure III.35 : Evolution de la transconductance extrinsèque $g_{m_{ext}}$ en fonction de la tension V_{gs} appliquée. $L_g = 0,2 \mu\text{m}$ et $W = 100 \mu\text{m}$.

métal de grille dont la section ressemble ainsi à un "T". Une gravure sèche de la couche de nitrure de silicium non protégée par la branche supérieure du "T" de la grille permet d'ouvrir les zones d'accès source grille et grille drain. Ces zones peuvent maintenant être exposées aux rayonnements U.V. de façon à leur restituer un dopage actif proche des valeurs initiales. On obtient ainsi une structure très voisine du HIGFET classique. Remarquons ici que la barre supérieure du "T" de grille joue le rôle "d'espaceur" entre les zones très dopées de source grille et de grille drain.

Le jeu de masque utilisé permet de réaliser des transistors de différentes largeurs et leurs caractéristiques géométriques sont :

- Largeurs de grille : 35, 50 et 75 μm ;
- Distance source drain : 1 μm ;
- Longueur de grille : 0,25 μm ;
- Epaisseur de nitrure de silicium : 800 \AA .

III.5.2. Performances des HIGFET hydrogénés

Les figures III.33 à III.35 donnent les premières caractéristiques obtenues en utilisant l'ensemble de ces procédés. Celles-ci sont données après exposition aux U.V. Avant cette exposition, les résistances d'accès sont beaucoup trop élevées pour permettre des performances significatives. Les résultats obtenus ne sont pas pleinement satisfaisants dans la mesure où les résistances d'accès sont encore trop élevées. Néanmoins, malgré ce handicap et le fait qu'aucune optimisation supplémentaire de la géométrie de la structure n'a été effectuée, les performances réalisées sont encourageantes avec des F_{max} de 40 GHz et des F_T à 20 GHz (tableau VIII). Bien entendu, une étude plus approfondie doit être effectuée pour exploiter pleinement les avantages du nouveau procédé de réalisation de HIGFET par hydrogénation.

R_s	R_d	gm	C_{gs}	C_{gd}	F_c	g_d	MSG	MAG
Ω	Ω	$\text{mS}\cdot\text{mm}^{-1}$	pF	pF	GHz	$\text{mS}\cdot\text{mm}^{-1}$	dB	dB
0,8	1,2	180	1,5	0,15	21	20	8	5

Tableau VIII : Caractéristiques du HIGFET hydrogénés obtenues après une exposition d'une demi-heure aux U.V.

CONCLUSION

Au terme de ce chapitre consacré à la fabrication de transistors de la filière AlGaAs/GaAs, il apparaît incontestablement que le procédé d'hydrogénation constitue un moyen particulièrement commode de disposer de degrés de liberté supplémentaires dans la fabrication de composants. La possibilité de doser à volonté le dopage actif dans le transistor soit globalement soit de façon localisée constitue une voie nouvelle d'amélioration des performances dont nous avons illustré les premières possibilités tant sur des structures à déplétion qu'à enrichissement.

BIBLIOGRAPHIE

1. I. Valin, 'Simulation microscopique et technologie de réalisation du transistor à effet de champ à base de GaAs', Thèse de docteur, Lille 1993
2. J. Vanbremeersch, E. Constant, P. Godts et G. Dambrine, 'Comment réaliser des TEC GaAs de transconductance supérieure à 700 mS/mm et à fréquence de coupure élevée', *Revue Physique Appliquée*, **24**, pp. 51-56, 1989
3. J. Vanbremeersch, E. Constant, J. Zimmermann, I. Valin, P. Godts et A. Leroy, 'Design and realisation of very high performance 0,2 μm GaAs MESFETs', *Electron. Lett.*, **26**, (2), pp. 152-154, 1990
4. N. Caglio, 'Réalisation de transistors à effet de champ en GaAs par la neutralisation des donneurs légers par hydrogène atomique', Thèse de docteur, Lille, 1989
5. E. Constant, N. Caglio, J. Chevallier et J. C. Pesant, 'Fabrication of a new type of field effect transistor using neutralisation of shallow donors by atomic hydrogen in n-GaAs (Si)', *Electron. Lett.*, **23**, (16), pp. 841-843, 1987
6. E. Constant, 'Plasma-hydrogenated microwave and optoelectronic devices', *Physica B*, **170**, pp. 397-408, 1991
7. B. Carez, A. Cappy, A. Kaszinski, E. Constant et G. Salmer, 'Modelling of submicrometer gate effect transistor including effects of stationary electron dynamics', *J. Appl. Phys.*, **51**, (1), pp. 784-790, 1987
8. F. Heliodore, M. Lefebvre, G. Salmer et O. L. El-Sayed, 'Two-dimensional simulation of micrometer GaAs MESFET's: Surface effects and optimisation of recessed gate structures', *IEEE Trans. Electron. Devices*, **35**, (7), pp. ,1988
9. G. Dambrine, H. Happy, F. Danneville et A. Cappy, 'A new method for on wafer noise measurement', *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **41**, (3), pp. 375-381, 1993
10. F. Danneville, H. Happy, G. Dambrine, J. M. Belquin et A. Cappy, 'Microscopic noise modelling and macroscopic noise models: How good a connection?', *IEEE Trans. Electron. Devices*, **41**, (5), pp. 779-786, 1994

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Les travaux entrepris dans le cadre de cette étude et que nous venons de décrire permettent de dresser un premier bilan sur les possibilités d'utilisation de couches hydrogénées dans la réalisation des transistors à effet de champ microondes.

Une constatation un peu négative peut tout d'abord être faite. Dans l'état actuel des études effectuées, il n'est pas possible de se prononcer définitivement sur les possibilités d'utilisations industrielles de ce procédé. Des travaux complémentaires utilisant plus largement et de façon mieux contrôlée les effets nouveaux mis en évidence lors de notre recherche sont encore nécessaires pour exploiter toutes les ressources présentées par l'hydrogénation contrôlée des impuretés dans un semiconducteur.

Néanmoins, il apparaît que les résultats obtenus sont dans l'ensemble très encourageants et parmi les éléments particulièrement positifs, on peut signaler les points suivants :

- la très grande qualité des couches hydrogénées attestée par les performances records en transconductance obtenues pour des transistors à effet de champ à grille micronique ;
- la très faible importance des dégâts superficiels causés par l'exposition au plasma d'hydrogène attestée par les coefficients de qualité proche de 1 obtenus dans la réalisation des barrières Schottky directement sur des couches semiconductrices hydrogénées ;
- la possibilité démontrée expérimentalement de modifier à volonté et de façon externe au composant les propriétés électriques de régions convenablement choisies par exposition, soit aux rayonnements U.V., soit aux électrons ;
- la possibilité d'appliquer le nouveau procédé non seulement aux épitaxies GaAs mais aussi aux hétéroépitaxies GaAlAs/GaAs ;
- la possibilité illustrée dans la toute première réalisation d'un HIGFET largement submicronique de remplacer l'étape implantation-recuit classique par l'exposition aux U.V. de couches hydrogénées.

Certes, à l'heure actuelle, compte tenu des retards liés à l'installation de notre nouvelle Centrale de Technologie, compte tenu de la nouveauté des effets physiques utilisés, compte tenu du fait que certaines des technologies utilisées dans ce travail ne sont pas, de ce fait, encore pleinement maîtrisées, il ne nous a pas été possible de réaliser des composants présentant des performances réellement records. Cependant, tout est désormais en place pour progresser dans cette voie et pour étudier de façon encore plus approfondie les possibilités pratiques de l'hydrogénation dans la fabrication de transistors particulièrement performants.

De façon plus générale, et au terme de ces travaux, que peut-on dire aujourd'hui de l'avenir du "procédé hydrogénation" dans la réalisation des composants microélectroniques ?

Au passif, se pose le problème fondamental de la stabilité thermique du phénomène de neutralisation utilisé. Grâce à nos travaux, les limites dans ce domaine sont aujourd'hui bien cernées et il apparaît clairement que, si des températures de fonctionnement de transistors hydrogénés inférieures à 150°C voire dans certain cas 180°C ne posent pas de problèmes majeurs, leur emploi au-delà de ces températures apparaît fort difficile. Bien entendu, si cette limitation n'interdit pas beaucoup d'applications, elle rend sans doute rédhibitoire un certain nombre d'entre elles telles que le fonctionnement en environnement très sévère ou la production de très grandes puissances. La seule parade à ce problème pourrait être de substituer à l'hydrogène d'autres éléments tel que le fluor dans l'espoir d'obtenir des énergies de complexation plus importantes. Mais tout reste à faire pour évaluer cette nouvelle possibilité !

A l'actif, il y a beaucoup d'avantages. La complexation par hydrogénation des impuretés et leur réactivation contrôlée constituent sans doute le moyen le plus commode et le plus doux (car c'est en plus un procédé basse température) de modifier à volonté et de façon très localisée le "dopage actif" dans un matériau et/ou un composant. Au-delà des quelques exemples probants présentés dans ce travail, les applications potentielles de ces nouveaux procédés sont certainement multiples et ne concernent pas seulement la fabrication de transistors à effet champ. C'est ainsi que l'on peut citer de façon non exhaustive différentes pistes possibles :

- l'isolation simple et rapide de composants évitant ainsi la technique du mesa (diode avalanche, Gunn, Schottky, tunnel, bipolaire);

Conclusion Générale

- le réglage final post-technologique de composants et circuits intégrés monolithiques à partir de la réactivation contrôlée d'éléments hydrogénés initialement insérés dans les circuits ;
- la fabrication de nanostructures à partir d'éléments hydrogénés réactivés très localement par faisceau d'électrons de diamètre nanométrique.

Mais d'autres utilisations des couches hydrogénées sont également possibles comme pour la réalisation de détecteurs ou de dosimètres, compte tenu de leur sensibilité à une exposition aux U.V. ou aux électrons.

Un ensemble de travaux utilisant les moyens mis en place dans notre Centrale de Technologie (en particulier le bâti d'hydrogénation) est actuellement entrepris par l'I.E.M.N., non seulement pour réaliser des transistors hydrogénés encore plus performants, mais aussi pour évaluer l'intérêt de ces différentes pistes qui pourraient se révéler particulièrement fructueuses dans une perspective à long terme.

