

N° d'ordre : 1310

50376
1985
177

50376
1985
177

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE FLANDRES ARTOIS

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE TROISIEME CYCLE

par

THAO BOUN



**TECHNOLOGIE DES DIODES IMPATT
A HAUT RENDEMENT :
- A BARRIERE METAL-SEMICONDUCTEUR GAAs
- A HETERO JONCTIONS GAINAs/INP**

Soutenu le 12 Décembre 1985 devant la Commission d'Examen

Membres du Jury :

MM. E. CONSTANT	Président
L. RACZY	Rapporteur
E. BRIDOUX	Examineur
M. BRIDOUX	Examineur
G. SALMER	Examineur
J. VANBREMEERSCH	Examineur

A mes parents,

A mes frères et soeurs,

A ma famille,

A tous mes professeurs,

A mes amies et amis.

à : Monsieur le Professeur CONSTANT

Directeur du Centre Hyperfréquences
et Semiconducteurs de l'Université
des Sciences et Techniques de Lille I

Je vous remercie de me faire l'honneur de présider la Commission d'Examen et de juger mon travail.

Je tiens à vous témoigner ma profonde gratitude :

- pour m'avoir accueilli dans votre Unité de Recherches,
- pour avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires à mes travaux, sans lesquels cette tâche n'aurait pu parvenir à son terme,
- pour m'avoir prodigué d'incessants conseils et encouragements pendant cette période.

Sous votre direction, cette étude concernant les diodes à avalanche, dont vous êtes l'un des précurseurs au laboratoire, a largement bénéficié de votre compétence dans ce domaine et a été le fruit d'un enseignement permanent.

Vos qualités humaines, votre générosité et votre efficacité sont exemplaires.

Je suis très reconnaissant à Monsieur **L. RACZY**, Professeur à l'Université des Sciences et Techniques de Lille I, de me faire l'honneur d'être membre-rapporteur de cette commission d'examen. Sa bienveillance et sa générosité m'ont sans cesse encouragé au cours de la réalisation de ce projet. Son efficacité, son sens pratique ainsi que ses précieux conseils ont facilité ma tâche et ont permis de la mener à terme.

J'exprime toute ma reconnaissance envers Monsieur **G. SALMER**, Professeur à l'Université des Sciences et Techniques de Lille I, qui malgré ses nombreuses occupations s'est libéré afin de participer à ce jury. J'ai eu avec lui de fréquentes discussions, notamment en ce qui concerne les matériaux GaInAs et InP, qui se sont révélées riches d'enseignement. Je lui suis gré d'avoir été l'auteur de nombreux contacts avec la Thomson pour la fourniture des matériaux à hétéro-structure et pour la visite des laboratoires industriels à la Thomson C.S.F.

Qu'il me soit permis d'exprimer ma reconnaissance envers **M. BRIDOUX**, Professeur à l'Université des Sciences et Techniques de Lille I, qui me fait le plaisir de participer à ce jury et d'examiner mon travail.

Je remercie Monsieur **E. BRIDOUX**, Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, qui me fait l'honneur de faire partie de ce jury.

Je remercie Monsieur **J. VANBREMEERSCH**, Ingénieur au Centre National de Recherches Scientifiques, qui a accepté de faire partie du jury. Je lui suis reconnaissant de ses nombreux conseils pratiques au cours de cette étude.

Je tiens également à remercier Messieurs **J.C. DE JAEGER** et **R. KOZLOWSKI** pour leur sympathique collaboration et les nombreuses discussions qui se sont révélées très utiles.

J'exprime ma sincère amitié à Monsieur **Renaud FAUQUEMBERGUE** pour sa sympathie, sa simplicité et sa cordialité.

J'adresse mes remerciements à tout le personnel du Centre Hyperfréquences et Semiconducteurs ainsi qu'à l'ensemble du personnel technique et administratif du laboratoire et à ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail, en particulier :

- Mesdames et Messieurs **J.L. LORRIAUX, A. LEROY, D. VANDERMOERE, A. FATTORINI, S. MARICOT, P. LEGRY, M. MIENS, P. ARMANT** ainsi que tous les autres membres du personnel de la Centrale de Technologie pour leur aimable collaboration ;

- Madame et Monsieur **E. DELOS** et **E. PLAYEZ** pour l'aide technique et efficace qu'ils m'ont apportée dans la partie caractérisation des composants ;

- Madame **J. CHARVET** qui a assuré la dactylographie de ce mémoire, pour sa gentillesse, la qualité de son travail et la rapidité de son exécution ;

- Monsieur **DEHORTER** qui a assuré l'impression de cet ouvrage avec célérité et sympathie.

Je remercie chaleureusement :

- les laboratoires industriels de Thomson de Corbeville pour la fourniture des couches d'essais et de l'épitaxie R 7893;

- les laboratoires industriels de Thomson CSF pour la fourniture des matériaux à hétéro-structure GaInAs et InP.

Ce travail a bénéficié du soutien de la Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique et de la Direction des Recherches, Etudes et Techniques. Je remercie les Directeurs de ces organismes qui ont rendu possible cette étude.

SOMMAIRE

	<u>Page</u>
INTRODUCTION GENERALE	1
 <u>IERE PARTIE : STRUCTURES IMPATT A HAUT RENDEMENT</u> 	
I.1. EXPRESSION SIMPLIFIEE DE LA PUISSANCE ET DU RENDEMENT HYPERFREQUENCES D'UNE STRUCTURE IMPATT	4
I.2. STRUCTURES IMPATT GaAs A PROFIL DE CONCENTRATION EN IMPURETES DIFFERENCIE POUR LA BANDE X	8
I.2.1. CHOIX D'UNE STRUCTURE	9
I.2.2. STRUCTURE OPTIMALISEE LHL A BARRIERE METAL SEMICONDUCTEUR	12
I.2.2.1. Zone d'avalanche	12
I.2.2.2. Zone de transit.....	14
I.2.2.3. Performances attendues	16
I.3. HETEROSTRUCTURES IMPATT $Ga_{0,47}In_{0,53}As/InP$ POUR LES APPLICATIONS EN ONDES CENTIMETRIQUES ET MILLIMETRIQUES ..	18
I.3.1. HETEROSTRUCTURE $GaInAs(P^+)/GaInAs(N)/InP(N)$ OPTIMISEE POUR LA BANDE X.....	20
I.3.2. OPTIMALISATION DE L'HETEROSTRUCTURE $InP(P^+)/InP(N)/$ $GaInAs(N)/InP(N)$ POUR LA BANDE X.....	22
I.3.2.1. Zone d'avalanche : $InP(N) + GaInAs(N)$	22
I.3.2.2. Zone de transit : $InP(N)$	23
I.3.2.3. Section du composant et densité du courant	25
I.3.2.4. Performances attendues	25
I.3.3. PERSPECTIVES EN MILLIMETRIQUES	26
 <u>IIEME PARTIE : TECHNOLOGIE DES DIODES IMPATT GaAs A BARRIERE</u> <u>METAL SEMICONDUCTEUR</u> 	
INTRODUCTION	29

II.1. TECHNOLOGIE DES DIODES IMPATT GaAs A BARRIERE METAL- SEMICONDUCTEUR EN STRUCTURE MESA NORMALE	33
II.1.1. STRUCTURE NORMALE	33
II.1.2. MATERIAUX D'ESSAIS.....	34
II.1.3. REALISATION DES MASQUES.....	34
II.1.4. ELABORATION DES COMPOSANTS	35
II.1.4.1. Barrière métal-semiconducteur	35
II.1.4.1.1. Rappel théorique	35
II.1.4.1.2. Réalisation pratique	40
II.1.4.2. Contacts ohmiques	41
II.1.4.2.1. Formation des contacts ohmiques..	43
II.1.4.2.2. Réalisation pratique	43
II.1.4.3. Gravure Mesa	44
II.1.4.4. Etapes de réalisation des composants..	44
 II.2. TECHNOLOGIE DES DIODES IMPATT GaAs A BARRIERE METAL SEMICONDUCTEUR EN STRUCTURE MESA INVERSEE	 50
II.2.1. STRUCTURE INVERSEE	50
II.2.2. MATERIAUX	51
II.2.3. MASQUES	52
II.2.4. ELABORATION DES COMPOSANTS	52
II.2.4.1. Implantation du radiateur intégré.....	53
II.2.4.2. Amincissement du substrat	54
II.2.4.2.1. Rodage mécanique.....	54
II.2.4.2.2. Polissage mécano-chimique.....	55
II.2.4.2.3. Attaque chimique	57
II.2.4.3. Découpe et montage des diodes	60
II.2.4.4. Etapes de réalisation des composants..	60

CONCLUSION	65
------------------	----

IIIEME PARTIE : CARACTERISATION DES DIODES IMPATT GaAs

A BARRIERE METAL SEMICONDUCTEUR

INTRODUCTION.....	68
III.1. CARACTERISATION DES DIODES IMPATT.....	68
III.1.1. HAUTEUR DE BARRIERE SCHOTTKY	68
- Méthode I (V)	68
- Méthode C (V).....	69
III.1.2. CARACTERISTIQUES C (V).....	70
- Cartes de champ électrique	70
- Profil de dopage	70
III.1.3. CARACTERISTIQUES I (V).....	70
- Courants de saturation	70
- Coefficient thermique	71
- Résistance thermique	71
III.1.4. MESURES D'IMPEDANCE	72
- Résistance de charge d'espace	72
- Impédance hyperfréquence	73
III.1.5. PUISSANCE ET RENDEMENT HYPERFREQUENCES	73
III.2. DIODES GaAs EN STRUCTURE NORMALE	73
III.2.1. PARAMETRES TECHNOLOGIQUES.....	74
III.2.1.1. Résistance et résistivité de contact	74
III.2.2.2. Hauteur de barrière	76
III.2.2. STRUCTURES SEMICONDUCTRICES	78
III.2.2.1. Courants de saturation	79

III.2.2.2. Tension d'avalanche	80
III.2.2.3. Résistance thermique	81
III.2.2.4. Résistance série	82
III.2.2.5. Mesure hyperfréquence	82
CONCLUSION	85
III.3. DIODES GaAs EN STRUCTURE INVERSEE	86
III.3.1. HAUTEUR DE BARRIERE	86
III.3.2. CARACTERISTIQUES C(V), E(x), N(x).....	87
III.3.3. CARACTERISTIQUES I(V) A DIFFERENTES TEMPERATURES.....	90
III.3.4. RESISTANCE DE CHARGE D'ESPACE.....	92
III.3.5. COEFFICIENT THERMIQUE, RESISTANCE THERMIQUE ..	95
III.3.6. RESISTANCE SERIE	97
III.3.7. IMPEDANCE HYPERFREQUENCE	98
III.3.8. PUISSANCE ET RENDEMENT HYPERFREQUENCES	100
CONCLUSION	103

IVEME PARTIE : TECHNOLOGIE DES DIODES IMPATT A HETEROSTRUCTURE

GaIn_{0,47}As_{0,53}/InP

INTRODUCTION.....	105
IV.1. TECHNOLOGIE DES DIODES IMPATT A HETEROSTRUCTURE GaIn_{0,47}As_{0,53}/InP EN STRUCTURE NORMALE	106
IV.1.1. STRUCTURE A REALISER	106
IV.1.2. ELABORATION DES COMPOSANTS	107
IV.1.2.1. Contacts ohmiques	107
IV.1.2.1.1. Réalisation de contacts ohmiques sur InP(N).....	107

IV.1.2.1.2. Réalisation de contacts ohmiques sur InP (P).....	108
IV.1.2.1.3. Réalisation de contacts ohmiques sur GaInAs (P).....	109
IV.1.2.2. Gravure Mesa de l'hétérostructure	110
IV.1.2.2.1. Gravure chimique	110
IV.1.2.2.2. Gravure ionique	111
IV.1.2.2.3. Réduction du courant de fuite superficiel	111
IV.1.2.4. Etapes de réalisation du composant ...	112
IV.2. TECHNOLOGIE DES DIODES IMPATT A HETEROSTRUCTURE	
Ga_{0,47}In_{0,53}As EN STRUCTURE MESA INVERSEE	117
IV.2.1. STRUCTURE INVERSEE	117
IV.2.2. ELABORATION DES COMPOSANTS	117
IV.2.2.1. Implantation du radiateur intégré.....	118
IV.2.2.2. Amincissement du substrat InP.....	118
IV.2.2.3. Etapes de réalisation du composant.....	119
CONCLUSION	124

VEME PARTIE : CARACTERISATION DES DIODES IMPATT

Ga_{0,47}In_{0,53}InP

INTRODUCTION.....	129
V.1. CARACTERISATION DES RESISTIVITES DE CONTACT SUR InP (N) InP (P) et GaInAs (P).....	129
V.2. CARACTERISATION DES HETEROSTRUCTURES	130
V.2.1. CARACTERISTIQUES C(V), E(x), N(x).....	130

- Série CHS.H22D.....	132
- Série CHS.H30D.....	133
- Série CHS.H32D.....	134
- Série CHS.H36D.....	135
- Série CHS.H39D.....	136
- Série CHS.H40D.....	137
V.2.2. CARACTERISTIQUES I (V).....	138
V.2.2.1. Courant de fuite	138
V.2.2.2. Dispersion des caractéristiques	140
V.2.2.3. Etude en fonction de la température	144
V.2.3. RESISTANCES SERIE ET THERMIQUE	148
CONCLUSION	148
CONCLUSION GENERALE	149

INTRODUCTION GENERALE

Les diodes IMPATT-dispositifs semiconducteurs à avalanche et à temps de transit sont pratiquement, parmi les nombreux générateurs et amplificateurs hyperfréquences proposés ces dernières années, les seules susceptibles de fortes puissances avec un bon rendement en ondes millimétriques. D'abord réalisés en silicium, ces dispositifs ont ensuite été conçus et réalisés en Arséniure de Gallium (GaAs) et en Phosphore d'Indium (InP).

Les progrès importants réalisés dans la technologie d'élaboration des matériaux semiconducteurs, en particulier en ce qui concerne la réalisation d'épitaxies associant des couches alternées de matériaux de nature différente permettent d'envisager, par la mise en oeuvre d'hétérostructures appropriées, des améliorations notables des performances attendues. L'idée de base consiste à utiliser les matériaux qui présentent les caractéristiques physiques les plus favorables pour la réalisation de chaque zone du dispositif et qui doivent être simultanément en bon accord cristallographique. L'hétérostructure GaInAs/InP répond à ces exigences (matériau à faible bande interdite pour la zone d'avalanche, matériau à large bande interdite pour la zone de transit) [1 à 8].

Mais si les prévisions théoriques sont encourageantes [9], [10], [11], il faut noter que l'amélioration effective des performances en puissance et en rendement est conditionnée par la technologie d'élaboration et de montage du composant proprement dit. En particulier, la gravure des matériaux, la façon dont le composant est monté, les techniques d'encapsulation jouent un rôle particulièrement important. C'est pourquoi nous nous proposons dans ce travail de mettre au point et de décrire la démarche technologique qui, partant de l'épitaxie, aboutit au composant encapsulé et pré-caractérisé.

Toutefois pour graduer et bien dégager les aspects spécifiques de l'étude, nous envisageons d'étudier dans un premier temps la réalisation de diodes IMPATT à barrière métal-semiconducteur en GaAs, susceptibles d'osciller en bande X, puis dans une seconde étape la réalisation de diodes IMPATT à hétérojonctions du type GaInAs/InP.

La première partie présente les résultats des études théoriques d'optimisation réalisées au laboratoire, pour les deux types de structure, leurs performances attendues en bande X ainsi que les possibilités potentielles en ondes millimétriques.

Dans la seconde partie, nous développons, en technologie "Mesa" l'élaboration de diodes IMPATT en GaAs dans une configuration dite "normale" pour préciser les problèmes technologiques, puis dans une configuration dite "inversée" pour améliorer les performances d'un point de vue thermique.

Les études expérimentales correspondantes et les caractérisations statiques et dynamiques des composants réalisés sont présentées dans la IIIème partie.

Les IV et V ème parties sont consacrées à l'étude technologique et à la réalisation de composants à partir d'hétéro-épitaxies GaInAs/InP.

Les problèmes spécifiques de ces matériaux sont largement abordés d'un point de vue technologique, et des conclusions sur la faisabilité des dispositifs sont esquissées à la lumière des résultats de caractérisation.

Ière PARTIE

- I.1. EXPRESSION SIMPLIFIEE DE LA PUISSANCE ET DU RENDEMENT
HYPERFREQUENCES D'UNE STRUCTURE IMPATT.....

 - I.2. STRUCTURES IMPATT GaAs A PROFIL DE CONCENTRATION EN IMPURETES
DIFFERENCIE POUR LA BANDE X.....

 - I.3. HETEROSTRUCTURES IMPATT $Ga_{0,47}In_{0,53}As/InP$ POUR LES
APPLICATIONS EN ONDES CENTIMETRIQUES ET MILLIMETRIQUES.....
-

Une structure IMPATT est caractérisée par l'existence dans un semiconducteur d'une zone d'émission où les porteurs sont créés par le mécanisme d'avalanche et d'une zone de transit où les porteurs injectés de la zone d'émission se déplacent à vitesse constante. L'association de ces deux phénomènes peut donner naissance à une résistance négative [12] et donc fournir de l'énergie au circuit associé. Une telle structure peut être réalisée dans la zone désertée d'une jonction PN [13] ou d'une barrière métal semiconducteur [14] polarisées à la tension d'avalanche (Fig. 1 et 2).

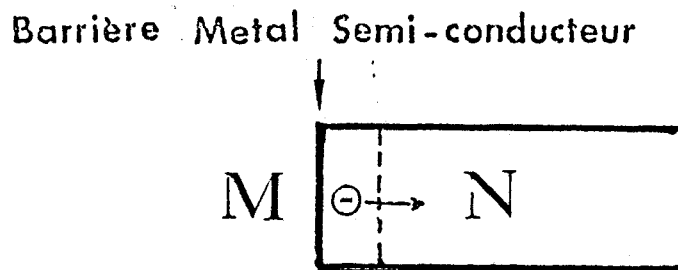


Fig.1 - Structure IMPATT à barrière M-SC

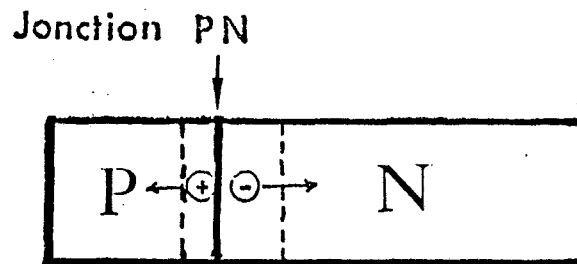


Fig.2 - Structure IMPATT à jonction PN

I.1. EXPRESSION SIMPLIFIEE DE LA PUISSANCE ET DU RENDEMENT HYPERFREQUENCES D'UNE STRUCTURE IMPATT

En utilisant le modèle théorique d'une structure unidimensionnelle de W.T. Read, on peut accéder à l'expression analytique de la puissance et du rendement.

Considérons le dispositif à semiconducteur à jonction P⁺N ou à barrière métal semiconducteur de la figure 3 soumise à une polarisation fixe V_0 à laquelle on superpose une tension hyperfréquence $V_1 \sin \omega t$.

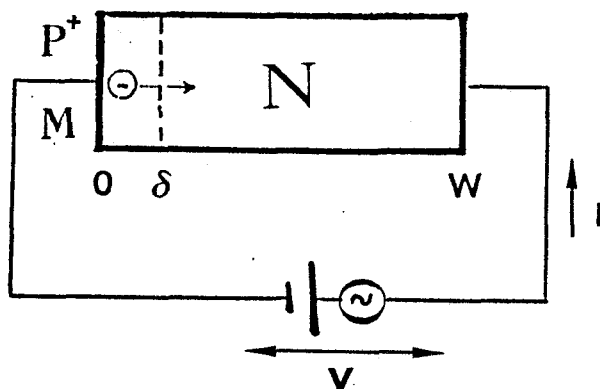


Fig.3 - Dispositif IMPATT soumis à une tension hyperfréquence.

Lorsque le champ électrique au niveau de la jonction ou de l'interface Métal-semiconducteur devient suffisamment élevé (Fig. 4), il apparaît dans une zone très localisée δ du semiconducteur un phénomène de multiplication de porteurs par ionisations par chocs. Les porteurs, sous l'action d'un champ électrique régnant dans le reste de la zone désertée ($W-\delta$), (Fig. 4) transitent à leur vitesse de saturation V_s (Fig. 5) pendant un temps $\tau = \frac{W-\delta}{V_s}$

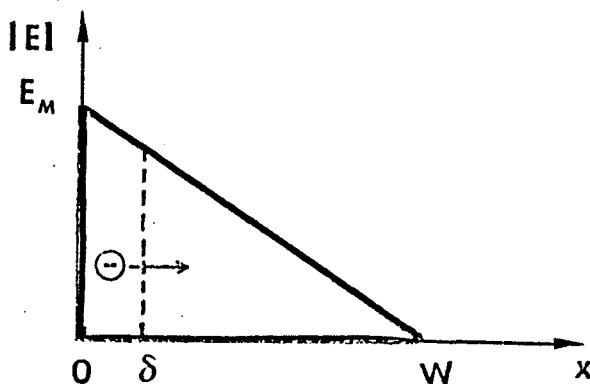


Fig.4 : Distribution du champ électrique dans la structure semiconductrice

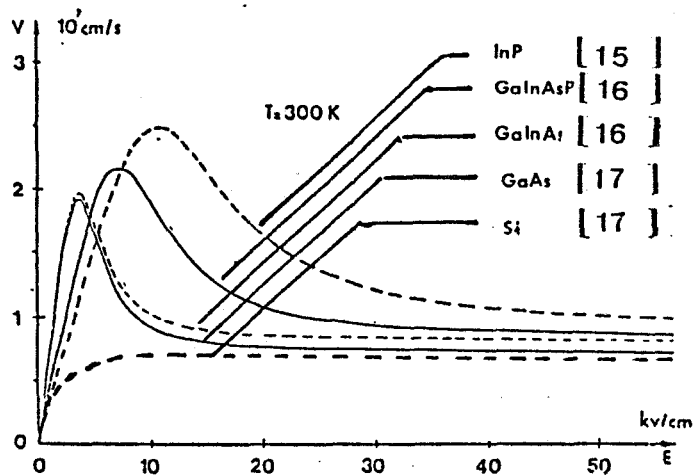


Fig. 5 - Evolution de la vitesse des électrons en fonction du champ électrique

Si l'on appelle τ_r le retard à l'émission par rapport à l'instant où le champ électrique est maximum, et τ le temps de transit des porteurs, ce qui correspond en régime sinusoïdal au déphasage à l'émission $\psi = -\omega\tau_r$ (Fig. 6) et à l'angle de transit $\theta = W\tau$, on peut remarquer, que pour certaines valeurs de τ_n et de τ , le courant et la tension peuvent être de signes opposés : le dispositif présente alors une résistance dynamique négative.

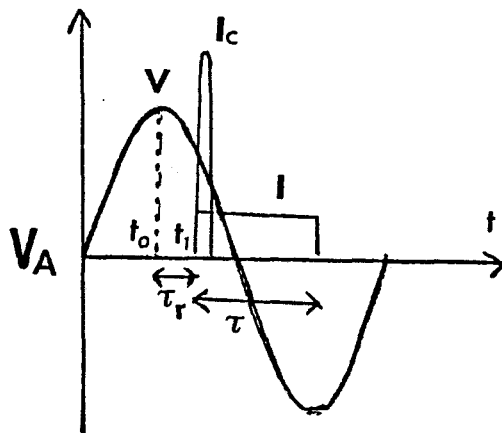


Fig.6 - Variation temporelle de la tension hyperfréquence et du courant

L'amplitude du courant hyperfréquence s'écrit :

$$I_1 = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1 + \tau} I_{Max} \sin \omega t dt$$

La puissance hyperfréquence émise vaut alors :

$$P_1 = -V_1 I_0 \left[\frac{\sin(\omega \tau_r) - \sin \omega (\tau + \tau_r)}{\omega \tau} \right]$$

$$\text{où } I_0 = I_{Max} \frac{\tau}{T}$$

On constate en effet que cette puissance peut être négative et le dispositif peut fournir de l'énergie à la fréquence $F = \frac{\omega}{2\pi}$. Si la puissance continue appliquée est $P_0 = V_0 I_0$, le rendement hyperfréquence vaut :

$$\eta = \frac{V_1}{V_0} \left[\underbrace{\frac{1 - \cos \theta}{\theta} \sin \psi + \frac{\sin \theta}{\theta} \cos \psi}_{\phi(\theta, \psi)} \right] \quad [18]$$

En appelant $M = \frac{V_1}{V_t}$ le taux de modulation, V_t étant la tension aux bornes de la zone de transit, et V_a la tension aux bornes de la zone d'avalanche, l'expression du rendement devient :

$$\eta = M \left(1 - \frac{V_a}{V_0} \right) \phi(\theta, \psi)$$

Ainsi, l'optimisation d'une structure IMPATT à haut rendement pour une fréquence de travail considérée passe par la recherche et la définition de structures rendant la fonction ϕ maximum, le rapport $\frac{V_a}{V_0}$ minimum et pouvant supporter un taux de modulation M plus important.

Plusieurs voies ont été explorées au laboratoire. Ce sont plus particulièrement :

- les structures IMPATT en GaAs étudiées par J. PRIBETICH [17]
- les hétérostructures en $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}/\text{InP}$ étudiées par J.C. DEJAEGER [9] et R. KOZLOWSKI [10], [11].

I.2. STRUCTURES IMPATT GaAs A PROFIL DE CONCENTRATION EN IMPURETES DIFFERENCIE POUR LA BANDE X.

Il s'agit de structures à profil de concentration en impuretés différencié de type :

- . High Low (HL) (Fig. 8)
- . ou Low High Low (LHL) à une ou deux zones de transit (SDR ou DDR) (Fig. 9 ou 10)

à jonction P+N ou à barrière métal-semiconducteur.

Par rapport aux structures à profil de concentration uniforme (Fig. 7), ces structures permettent :

- de bien localiser la zone d'avalanche. On peut donc diminuer le rapport $\frac{V_a}{V_0}$ dans l'expression du rendement en diminuant la tension V_a à ses bornes.
- d'obtenir un champ électrique sensiblement constant dans toute la zone de transit, ce qui permet d'augmenter le taux de modulation par application d'un champ hyperfréquence voisin du champ continu.

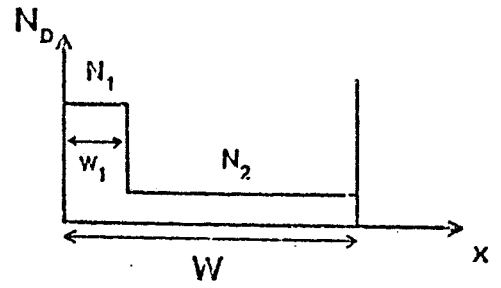
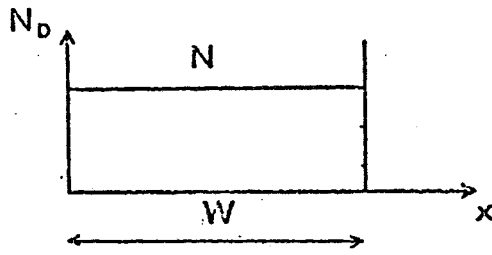


Fig.7 - Profil de dopage uniforme Fig.8 - Profil de dopage HL

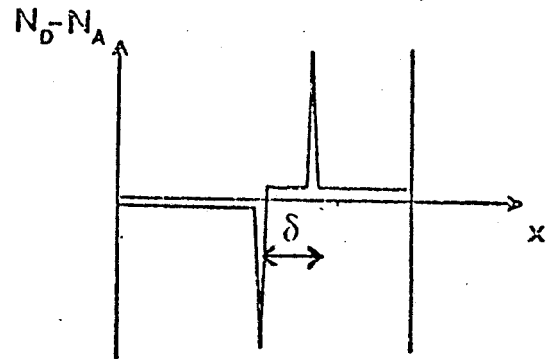
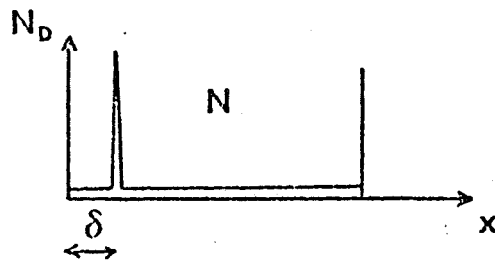


Fig.9 - Profil de dopage LHL
à 1 zone de transit.

Fig.10 - Profil de dopage LHL
à 2 zones de transit.

1.2.1. CHOIX D'UNE STRUCTURE

Pour le choix de la structure HL ou LHL, une étude comparative montre que pour les mêmes caractéristiques de zone de transit et le même champ électrique continu à l'entrée de cette zone, la structure LHL est plus intéressante puisqu'elle présente pour une largeur de zone d'avalanche δ égale, une tension V_a et un courant tunnel plus faibles (Fig. 11 et 12) [17].

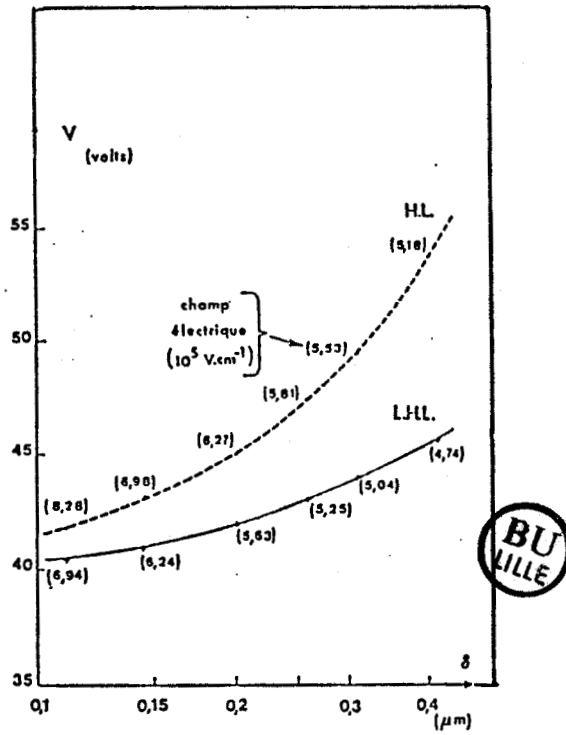


Fig. 11 - Comparaison de la tension de fonctionnement en fonction de la largeur de la zone d'avalanche entre les structures HL et LHL

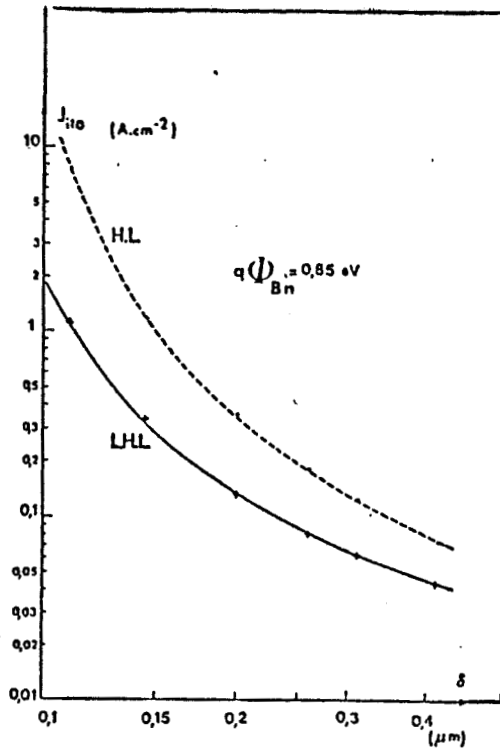


Fig.12 - Comparaison de la densité de courant tunnel en fonction de la largeur de la zone d'avalanche entre les structures HL et LHL

Une étude comparative entre une barrière métal-semiconducteur et une jonction P⁺N, montre que si la jonction est préférable du point de vue fiabilité [19] et courant tunnel (Fig. 13) [17], la barrière par contre présente une tension V_a plus réduite grâce à l'interface métal-semiconducteur plus abrupte ($\delta_{M-SC} < \delta_{P^+N}$) (Fig. 14).

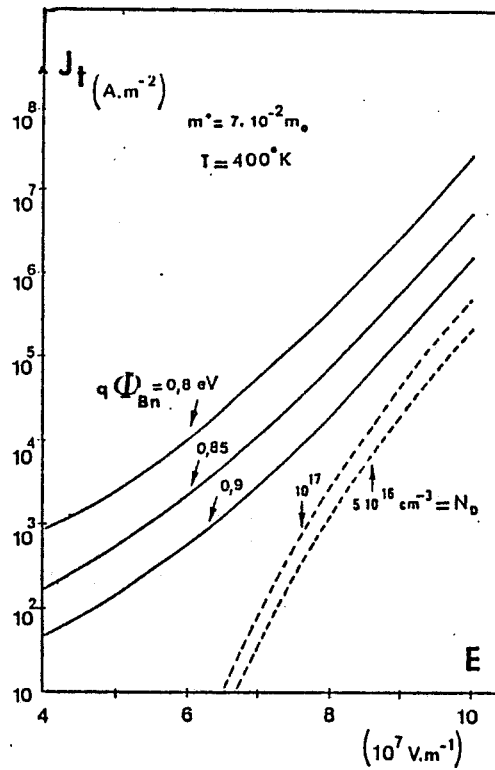


Fig.13 - Comparaison de la densité de courant tunnel en fonction du champ électrique entre une barrière M-SC et une jonction abrupte P⁺N.

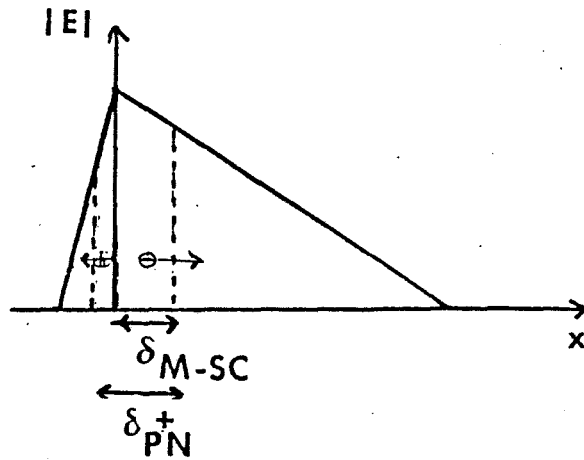


Fig.14 - Comparaison de la largeur de la zone d'avalanche entre une barrière M-SC et une jonction abrupte P+N

Finalement la structure retenue sera la structure LHL à barrière Métal Semiconducteur.

I.2.2. STRUCTURE OPTIMALISEE LHL A BARRIERE METAL SEMICONDUCTEUR

La zone d'avalanche et la zone de transit sont définies pour un composant fonctionnant en bande X vers 400°K et ayant une surface optimale de l'ordre de 10^{-4} cm^2 .

I.2.2.1. Zone d'avalanche

Il s'agit de définir pour cette zone (Fig. 9) la largeur δ et la charge intégrée Q_S dans le pic de dopage High.

Choix de δ

La diminution de la largeur δ a pour effet d'abaisser la tension V_a aux bornes de la zone d'avalanche, mais une diminution trop

importante entraîne un champ électrique élevé à l'interface métal-semiconducteur, donc un courant tunnel important. L'évolution du rendement maximal en fonction de la largeur δ , pour des paramètres optimums (N_2, W_2) de la zone de transit (Fig. 15) [17] donne une valeur optimale δ de l'ordre de $0.15\mu\text{m}$ pour des fréquences comprises entre 8 et 12 GHz.

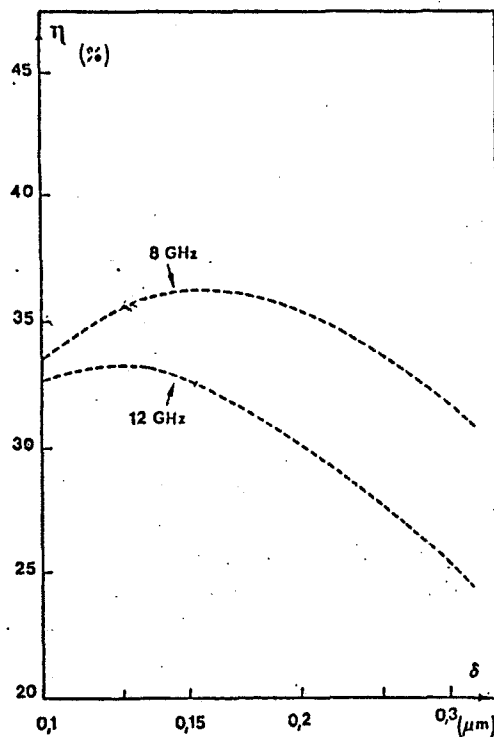


Fig.15 - Evolution du rendement maximal en fonction de la largeur de la zone d'avalanche pour 2 fréquences extrêmes (8-12 GHz) de la bande X

Choix de Q_S

Pour caractériser le pic de concentrations en impuretés, assimilé à un pic de Dirac, situé à $0,15\mu\text{m}$ de la barrière, on peut tenir compte de sa largeur et de son dopage en introduisant la grandeur Q_S qui représente la charge intégrée dans le pic. L'évolution du rendement maximal en fonction de Q_S (Fig. 16) [17] montre que la valeur optimale est voisine $3,2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ pour 8 et 12 GHz.

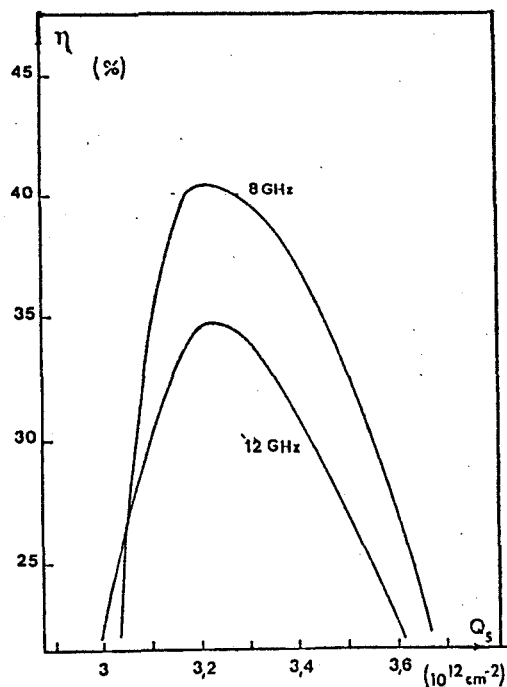


Fig.16 - Evolution du rendement maximal en fonction de la charge intégrée pour 8 et 12 GHz

I.2.2.2. Zone de transit

Pour la zone de transit on peut faire intervenir le produit ($N_2 \times W_2$) qui donne un rendement maximal à toute fréquence et la concentration N_2 optimale pour chaque fréquence.

Choix de N_2W_2

La valeur optimale de ce produit est obtenue sur la courbe de la figure 17 [17] pour $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

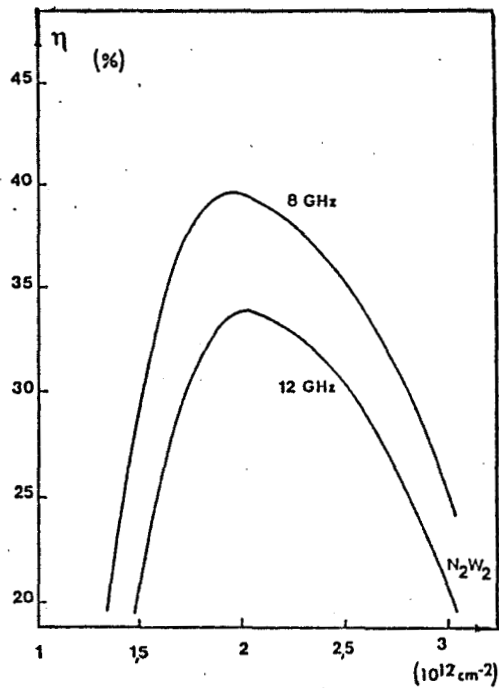


Fig.17 - Evolution du rendement maximal en fonction du produit dopage longueur de la zone de transit

Choix de N_2

La concentration en impuretés N_2 optimale pour chaque fréquence est donnée sur la courbe de la figure 18. Le produit N_2W_2 étant constant, on peut donc déduire pour chaque fréquence la longueur W_2 correspondante (Fig. 18) [17].

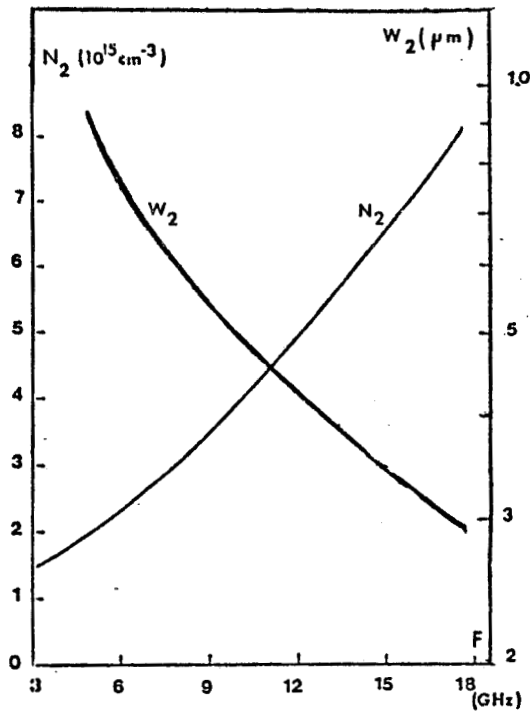


Fig.18 - Variation du dopage et de la longueur optimum de la zone de transit en fonction de la fréquence

Finalement le profil de dopage LHL est le suivant :

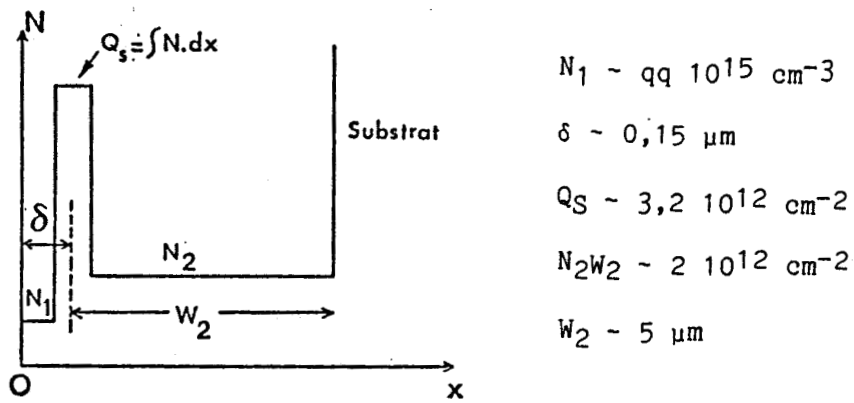


Fig.19 - Profil de dopage LHL optimal pour la bande X

I.2.2.3. Performances attendues

La figure 20 [17] donne les rendements maxima théoriques susceptibles d'être obtenus à chaque fréquence pour des diodes fonction-

nant à densité de courant optimal dont la variation avec la fréquence est également représentée.

On note que pour une résistance de perte $R_S = 1 \Omega$ en série avec le composant, on obtient un rendement théorique utile de plus de 30 % en bande X.

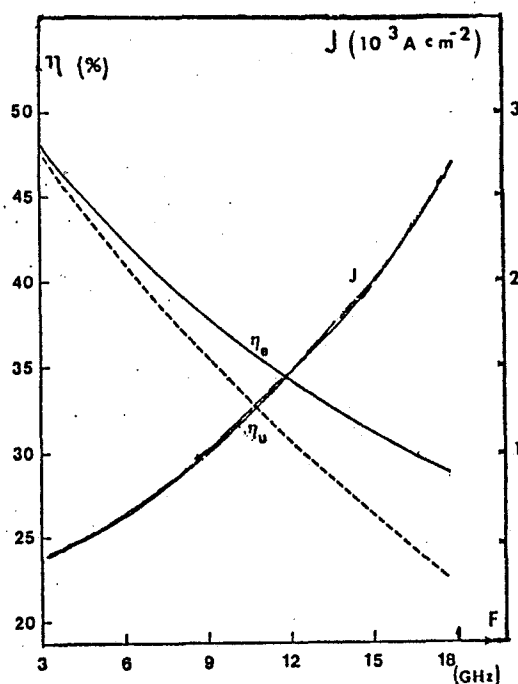


Fig.20 - Evolution du rendement maximal en fonction de la fréquence

Les puissances hyperfréquences utiles susceptibles d'être obtenues en impulsion ou en continu avec ces rendements maxima ainsi que les surfaces optimales correspondantes sont données sur la figure 21 [17].

A noter que les puissances théoriques recueillies sont remarquables surtout en régime impulsionnel. Par ailleurs, si les puissances et rendements hyperfréquences diminuent rapidement avec la fréquence, les diodes IMPATT GaAs restent des composants de choix pour les ondes centimétriques.

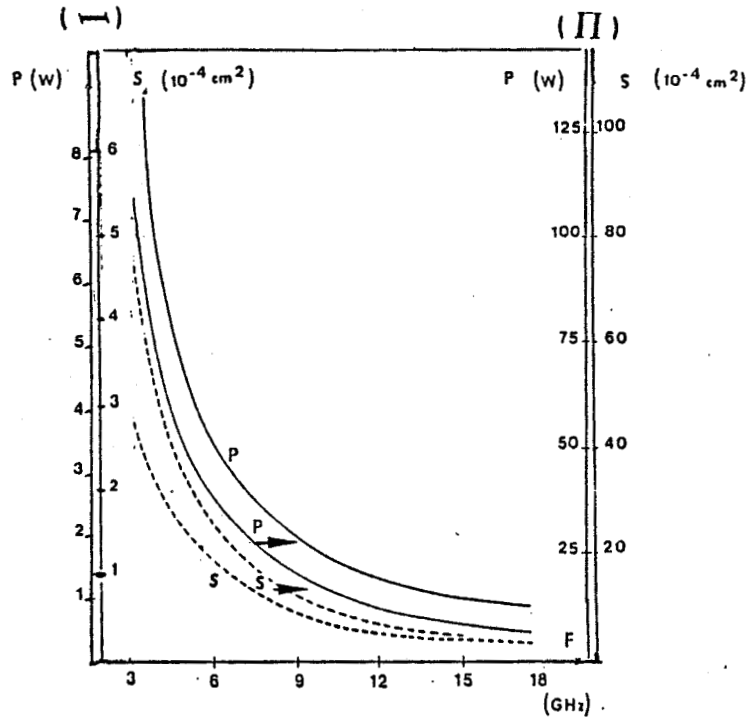


Fig.21 -Evolution des puissances utiles et des surfaces optimales correspondantes en fonction de la fréquence

I.3. HETEROSTRUCTURES IMPATT Ga_{0,47}In_{0,53}As/InP POUR LES APPLICATIONS EN ONDES CENTIMETRIQUES ET MILLIMETRIQUES

D'un point de vue pratique, le couple Ga_{0,47}In_{0,53}As/InP présente un bon accord de maille et est technologiquement réalisable [16], [20].

L'étude théorique effectuée au laboratoire montre que l'hétérostructure IMPATT Ga_{0,47}In_{0,53}As/InP peut constituer une solution nouvelle pour l'augmentation du rendement hyperfréquence.

En effet, pour minimiser le rapport $\frac{V_a}{V_o}$ dans l'expression du rendement, on peut diminuer la tension aux bornes de la zone d'avalanche V_a en lui associant un matériau à fort taux d'ionisation comme le GaInAs ($E_g = 0,73$ eV à 300°K) [1 à 7] et augmenter la tension aux

bornes de la zone de transit V_t en utilisant un matériau à taux d'ionisation faible comme l'InP ($E_g = 1,29$ eV à 300° K) [8].

Pour la zone d'avalanche, le taux d'ionisation élevé du $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$ par rapport au GaAs [21], [22] (Fig. 20) permet de limiter notablement la tension V_a à ses bornes. Pour la zone de transit, outre le taux d'ionisation faible de l'InP [23] (Fig. 22), la caractéristique $V(E)$ de ce matériau (Fig. 5) présente une vitesse de saturation V_S du même ordre de grandeur que le GaAs et comme celui-ci, une zone de mobilité différentielle négative mais avec un rapport $\frac{V_{pic}}{V_S}$ plus favorable.

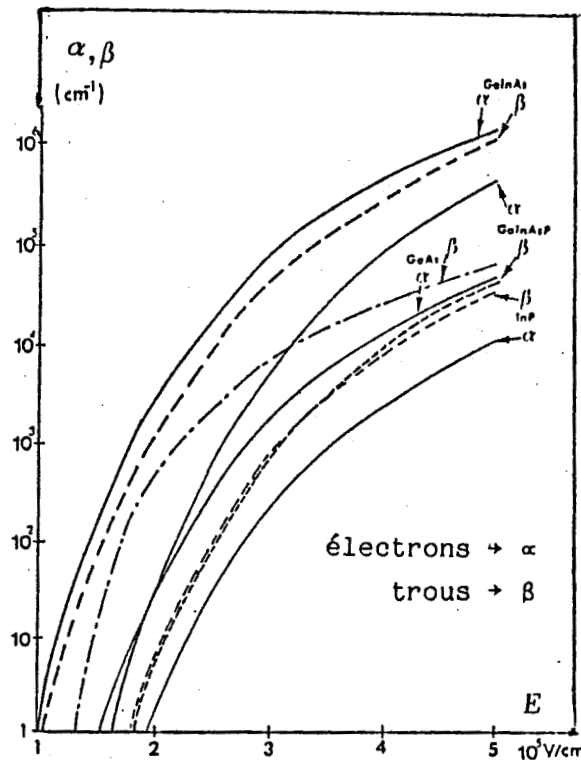


Fig.22 - Comparaison des taux d'ionisation des porteurs pour différents matériaux

Pour compléter la structure, différents cas de figure sont possibles pour réaliser la jonction P^+N . Nous avons plus particulièrement étudié au laboratoire différentes configurations dont nous allons essayer de dégager les avantages et les inconvénients.

L'hétérostructure la plus simple à imaginer est constituée d'une jonction P⁺N en GaInAs (structure GaInAs (P⁺)/GaInAs(N)/InP (N)).

Une autre structure envisageable consiste à utiliser une hétérojonction InP(P⁺)/GaInAs(N) (structure InP(P⁺)/GaInAs(N)/InP(N)). Mais pour des valeurs typiques de dopage-longueur, le diagramme de bande de cette hétérojonction montre d'après le modèle d'Anderson [24] qu'il existe une zone d'inversion à l'interface.

Pour éviter ce problème pouvant entraîner un processus de recombinaisons importantes dans la zone désertée, on peut envisager d'adjoindre une couche d'InP(N) à l'interface (Structure InP(P⁺)/InP(N)/GaInAs(N)/InP(N)).

Cette couche d'InP(N) doit être suffisamment épaisse pour éviter une couche d'inversion. Par contre, elle doit être suffisamment fine pour ne pas augmenter de façon notable la tension aux bornes de la zone d'avalanche composée maintenant d'InP et de GaInAs.

Cette solution est intéressante dans la mesure où la jonction se situe dans un matériau à bande interdite élevée, ce qui permet de réduire l'injection des porteurs par effet tunnel particulièrement importante, comme nous le verrons dans les études expérimentales au niveau du GaInAs.

I.3.1. HETEROSTRUCTURE GaInAs(P⁺)/GaInAs(N)/InP(N) OPTIMISEE POUR LA BANDE X

Les performances potentielles optimales de la structure optimisée à 10 GHz sont représentées sur la figure 24 [11]. Comme on peut constater, cette hétérostructure ne présente aucun intérêt pratique pour la bande X puisque le rendement potentiel est inférieur à celui des diodes GaAs LHL.

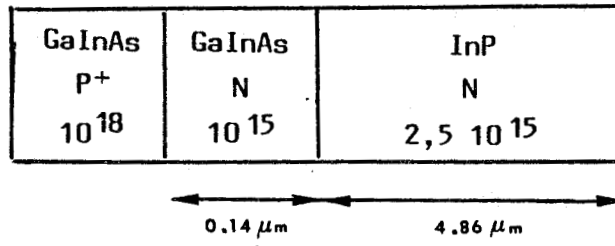


Fig.23 - Hétérostructure GaInAs(P⁺)/GaInAs(N)/InP(N)
pour la bande X

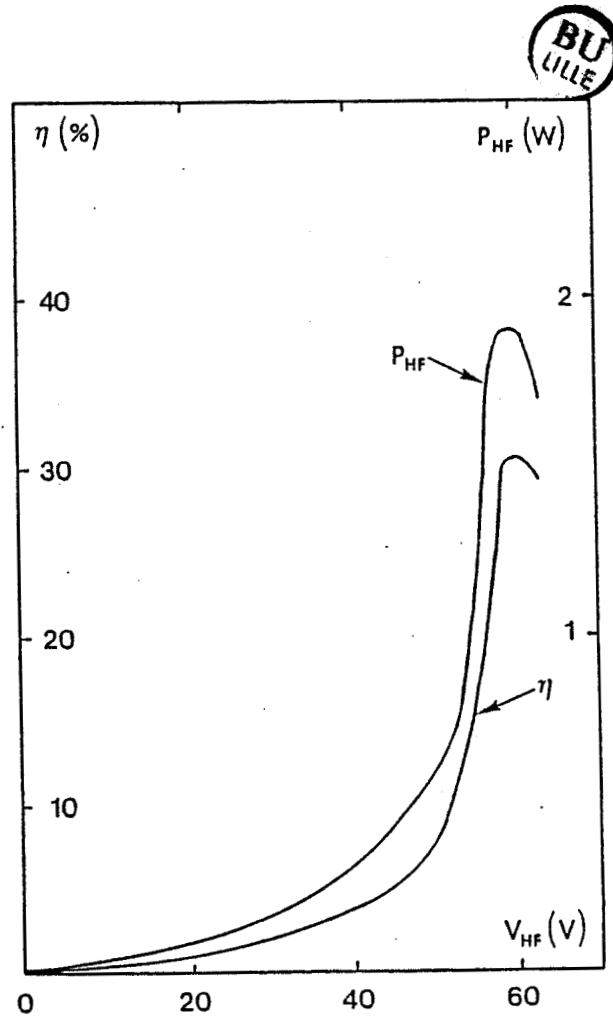


Fig.24 - Performances potentielles à 10 GHz à l'hétéro-
structure GaInAs(P⁺)/GaInAs(N)/InP(N)

I.3.2. OPTIMALISATION DE L'HETEROSTRUCTURE INP(P⁺)/INP(N)/
GaInAs(N)/INP(N) POUR LA BANDE X

Il s'agit de définir les paramètres caractéristiques : longueur et dopage pour différentes zones de la structure.

I.3.2.1. Zone d'avalanche : InP(N) + GaInAs(N)

* Le dopage de la zone d'InP(N) doit être le plus faible possible de manière à réduire le courant tunnel et le plus grand possible de manière à réduire la tension V_a . Une valeur N_{di} de l'ordre de 10^{16} at/cm³ semble être un bon compromis. La figure 25 [11] donne pour une fréquence de 10 GHz l'évolution du rendement maximal en fonction de l'épaisseur de cette zone dopée à 10^{16} at/cm³. Le rendement maximal est obtenu avec une épaisseur x_1 comprise entre 0,05 μ m et 0,2 μ m

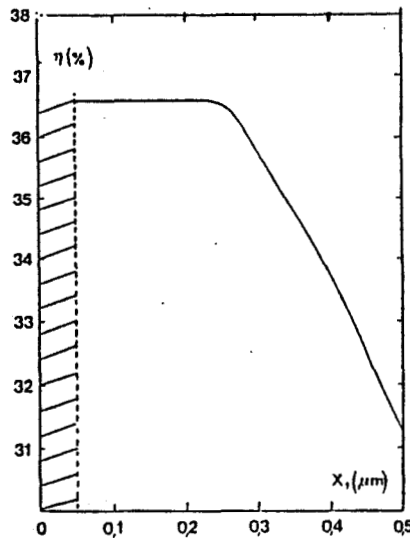


Fig.25 - Evolution du rendement maximal en fonction de la longueur de la zone d'avalanche InP(N)

* Le dopage de la zone GaInAs doit prendre en compte deux effets antagonistes : celui des courants de génération-recombinaison

et tunnel dans le cas de dopage élevé, et celui de l'augmentation de la tension V_a dans le cas de dopage faible. Le choix de ce dopage est guidé par le fait qu'en bande X la baisse de rendement est plus sensible à l'effet du courant de saturation que la variation de la tension $V_{\delta-X_1}$ aux bornes du GaInAs, étant donné le taux d'ionisation élevé de ce matériau.

Les valeurs des paramètres optimums : dopage et longueur du GaInAs à chaque fréquence sont données sur la figure 26 [11] où on note une valeur de 10^{15} at/cm³ et de l'ordre de $0,14\mu\text{m}$ à 10 GHz.

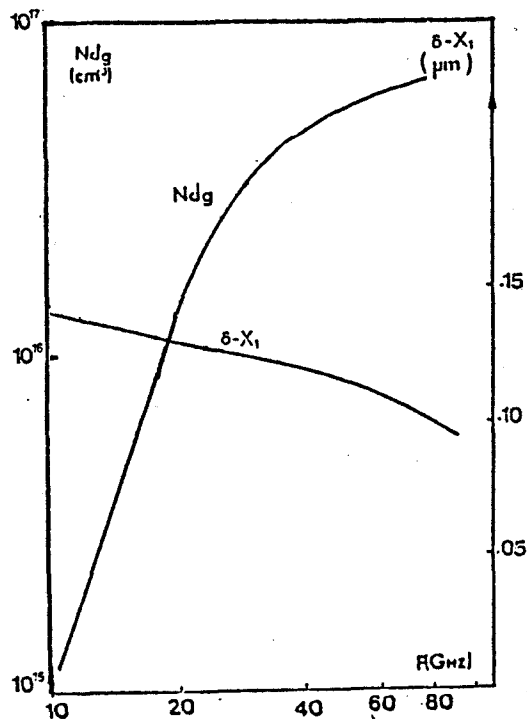


Fig.26 - Evolution des caractéristiques optimales dopage-longueur de la zone d'avalanche GaInAs

I.3.2.2. Zone de transit : InP (N)

Pour la zone de transit la longueur ($W-\delta$) et le dopage N_{dt} doivent permettre l'obtention d'une structure légèrement confinée.

L'évolution de ces deux paramètres en fonction de la fréquence est représentée sur la figure 27 [11].

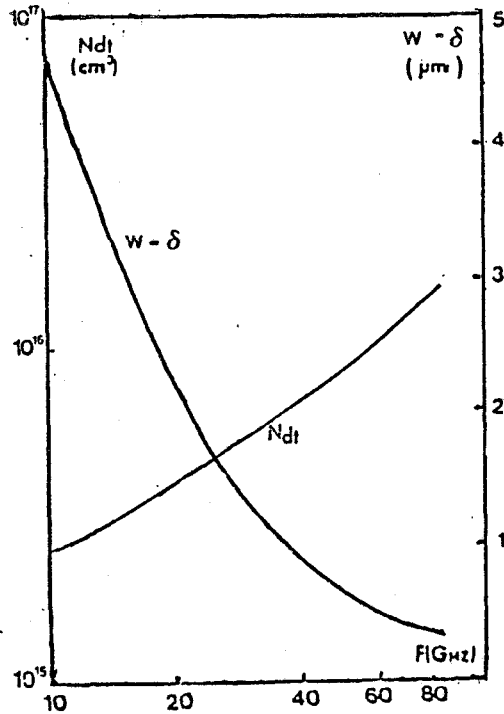


Fig.27 - Evolution des caractéristiques optimales dopage-longueur de la zone de transit

On note qu'à la fréquence de 10 GHz, les valeurs optimums pour N_{dt} et $W-\delta$ sont respectivement de 2×10^{15} at/cm³ et $4,81 \mu\text{m}$.

Finalement, l'hétérostructure optimisée pour la bande X a la configuration suivante (Fig. 28) [11] :

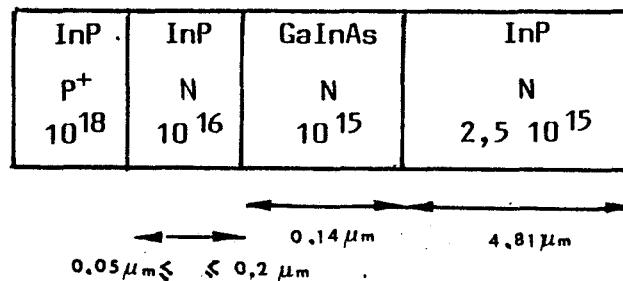


Fig.28 - Hétérostructure InP(P⁺)/InP(N)/GaInAs(N)/InP(N) optimisée pour la bande X

I.3.2.3. Section du composant et densité de courant

La section optimale du composant en fonction de la fréquence est donnée sur la figure 29 [11]. On note une valeur de l'ordre de 10^{-4} cm² pour la bande X comme pour les diodes GaAs

La densité de courant optimal en fonction de la fréquence est également représentée sur la même figure.

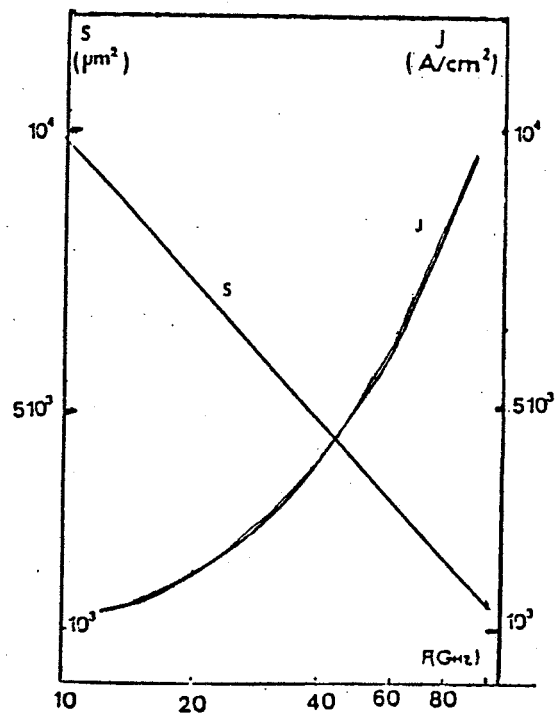


Fig. 29 - Variation de la surface et de la densité de courant optimales en fonction de la fréquence

I.3.2.4. Performances attendues

Les performances théoriques optimales à la fréquence de 10 GHz de l'hétérostructure InP (P⁺)/InP (N)/ GaInAs (N)/ InP (N) sont représentées sur la figure 30 [11].

On constate que ces performances en bande X sont quasiment équivalentes à celles des diodes GaAs LHL.

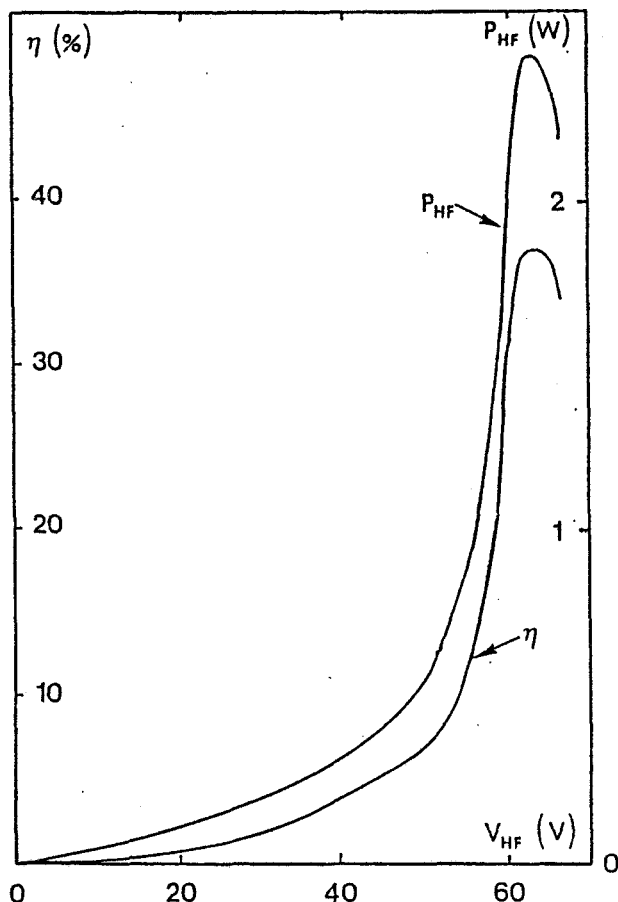


Fig. 30 - Performances potentielles à 10 GHz de l'hétérostructure InP(P⁺)/InP(N)/GaInAs(N)/InP(N)

1.3.3. PERSPECTIVES EN MILLIMETRIQUES

L'étude en fonction de la fréquence pour différentes structures IMPATT est donnée sur la figure 31 [11].

Une étude comparative avec l'hétérostructure initiale à jonction P⁺N en GaInAs montre qu'on peut s'attendre à un meilleur rendement lorsque la jonction P⁺N est en InP. De la même façon, on peut noter que l'hétérostructure GaInAs/InP est susceptible de donner un meilleur rendement dans les gammes millimétriques que l'homostucture GaAs LHL. Par contre, dans les gammes centimétriques (bande X) le rendement espéré est du même ordre de grandeur.

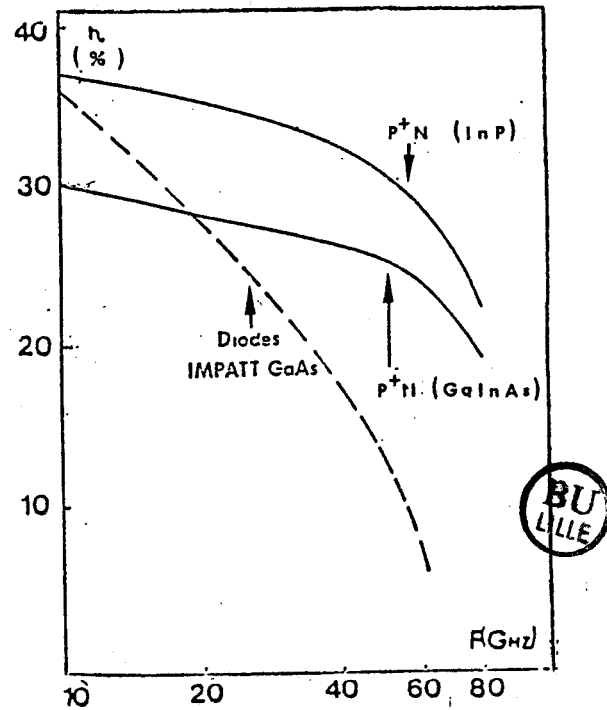


Fig. 31 - Comparaison de rendement optimal en fonction de la fréquence pour différentes structures IMPATT

IIème PARTIE

II.1. TECHNOLOGIE DES DIODES IMPATT GaAs A BARRIERE METAL
SEMICONDUCTEUR EN STRUCTURE MESA NORMALE

II.2. TECHNOLOGIE DES DIODES IMPATT GaAs A BARRIERE METAL
SEMICONDUCTEUR STRUCTURE MESA INVERSEE

INTRODUCTION

D'un point de vue pratique, les limitations fondamentales des diodes IMPATT pour un fonctionnement à haut rendement sont :

- les claquages non uniformes
- les problèmes de dissipation thermique.

En ce qui concerne les claquages non uniformes, il s'agit en général de claquages périphériques dans les parties moins chaudes de la jonction retardant ou empêchant l'avalanche au centre du composant: l'évolution de la densité de courant et de la température d'une jonction en fonction de l'éloignement par rapport au centre est donnée sur la figure 32 [25].

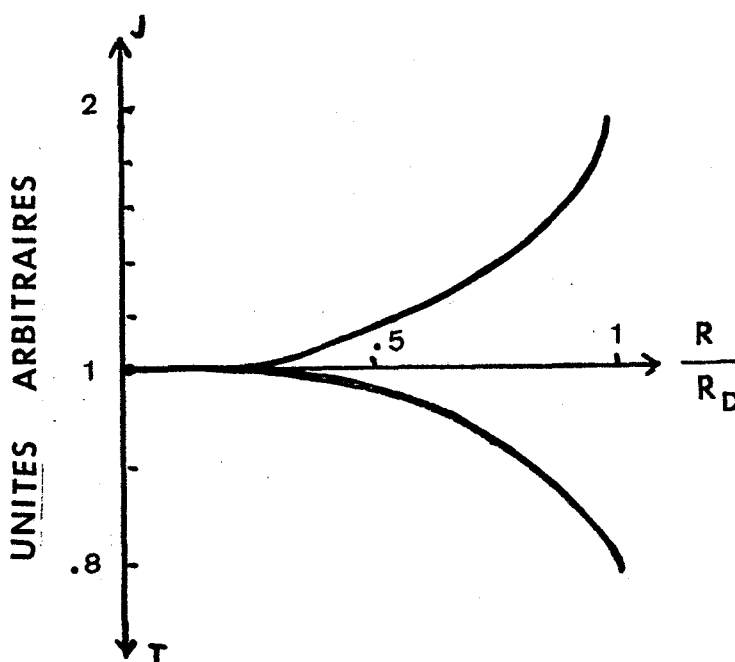


Fig.32 - Distribution radiale de la température et de la densité de courant pour une diode circulaire

Cette non-uniformité a pour effet de diminuer la tension d'avalanche. Par ailleurs, elle peut se traduire par un claquage destructif local de la jonction.

En ce qui concerne le problème thermique, la relation reliant la température de jonction à la puissance continue appliquée

$$T_j = T_a + R_{th} P_o$$

montre qu'une résistance thermique élevée ne permet pas un fonctionnement à densité de courant élevée (T_j max - 250 °C pour le GaAs).

Pour s'affranchir de ces problèmes de claquage non uniforme et de limitation thermique, il s'avère donc nécessaire de rechercher une géométrie et une technologie appropriées pour obtenir un meilleur rendement.

Parmi les diverses structures possibles :

- structure planar (Fig. 33)
- structure planar avec anneaux de garde (Fig. 34)
- structure Mesa (Fig. 35)

Nous avons retenu la troisième solution. En effet, la structure planar ne permet pas un contrôle précis de la tension d'avalanche, la structure avec anneaux de garde, outre les difficultés de réalisation présente des capacités parasites non négligeables. Par contre, une structure Mesa correctement réalisée permet d'obtenir une meilleure uniformité d'avalanche.

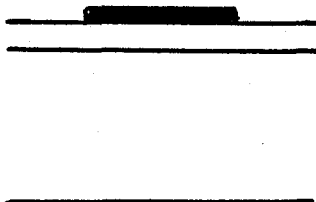


Fig.33

Structure planar

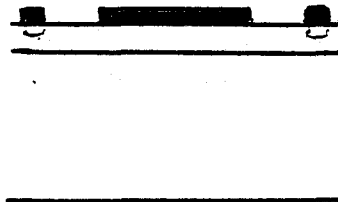


Fig.34

Structure planar avec
anneaux de garde

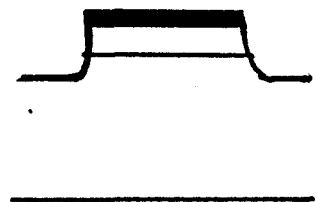


Fig.35

Structure Mesa

Pour favoriser l'évacuation thermique, il convient de minimiser la résistance thermique en plaçant un radiateur le plus près possible de la zone active du composant :

- soit en réalisant un montage dit inversé de la structure normale (Fig. 36),
- soit en associant un radiateur intégré et en inversant la gravure Mesa. Ce qui conduit à la structure dite "inversée" (Fig. 37).

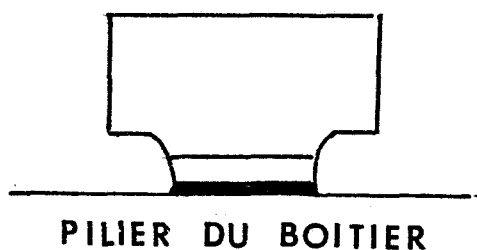


Fig. 36
Montage inversé

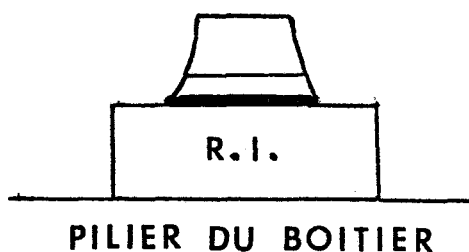


Fig. 37
Structure inversée
à radiateur intégré

Malheureusement la technique de montage inversé exige des opérations longues, difficiles et pas toujours reproductibles.

Par contre, la structure dite "inversée" conduit à des résultats intéressants comme nous le verrons par la suite. En particulier, la structure Mesa inversée conduit à un courant de fuite superficiel plus faible et améliore la fiabilité du composant grâce aux possibilités de traitement et de passivation en surface.

Les problèmes technologiques posés par l'élaboration de ces composants à barrière Métal Semiconducteur en structure Mesa inversée sont nombreux. Citons en particulier :

- l'obtention d'une hauteur de barrière élevée pour produire l'avalanche sans que le courant inverse ne devienne prohibitif,
- l'implantation d'un radiateur intégré pour assurer une bonne évacuation thermique tout en assurant un support mécanique stable,
- l'amincissement du substrat pour diminuer la résistance série et éventuellement permettre un écoulement thermique supplémentaire,
- la réalisation de bons contacts ohmiques pour obtenir une contribution minimale aux résistances série et thermique,
- la gravure Mesa profonde et homogène du semiconducteur, non génératrice d'un courant de fuite superficiel et favorable à un fonctionnement à densité de courant élevé,
- l'encapsulation du composant, en minimisant la résistance thermique.

Les difficultés technologiques énumérées nous ont amené à résoudre les problèmes par étapes successives.

Dans ce but, nous élaborons dans une première phase, les diodes IMPATT en structure Mesa normale pour une meilleure maîtrise des opérations technologiques de base.

Lorsque les résultats technologiques et électriques des composants élaborés s'avèrent satisfaisants, nous abordons alors dans une seconde phase l'élaboration des diodes en structure Mesa inversée.

Pour la clarté de la représentation, nous décrivons les réalisations technologiques dans la II^{ème} PARTIE, puis nous présentons les résultats de caractérisation dans la III^{ème}.

II.1. TECHNOLOGIE DES DIODES IMPATT GaAs A BARRIERE METAL SEMICONDUCTEUR EN STRUCTURE MESA NORMALE.

II.1.1. STRUCTURE NORMALE

La diode IMPATT GaAs à barrière métal semiconducteur (M-SC) en structure Mesa normale à réaliser est représentée sur la figure 38.

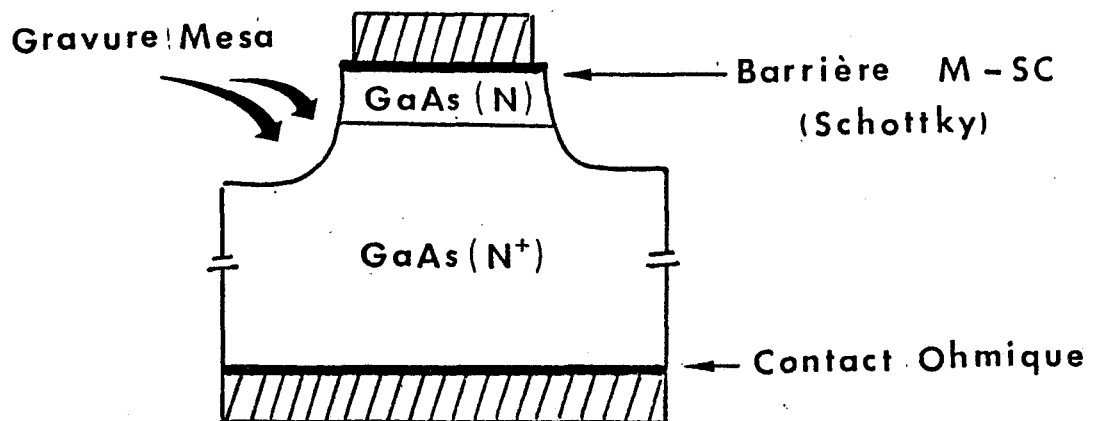


Fig.38 - Diode IMPATT GaAs en structure Mesa normale

Il s'agit de réaliser :

- un contact ohmique côté substrat N^+ sur semiconducteur
- une barrière M-SC (Schottky) sur la couche épitaxiée N
- une gravure Mesa suffisamment profonde du côté de la couche active
- une découpe et une encapsulation des composants.

Nous nous proposons de décrire chacune de ces opérations en précisant les conditions particulières de réalisations et les problèmes éventuellement rencontrés.

II.1.2. MATERIAUX UTILISES

Les épitaxies utilisées proviennent des laboratoires THOMSON de Corbeville. Il s'agit de couches NN^+ , d'essais N^+NN^+ (Fig. 39) dont les caractéristiques (dopage-longueur) ne sont pas optimales mais satisfaisantes toutefois pour définir les opérations technologiques.

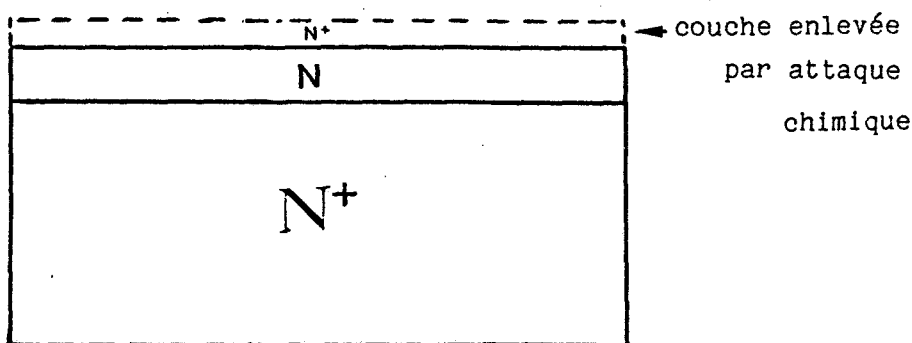


Fig.39 - Couche NN^+ ou d'essai N^+NN^+

II.1.3. REALISATION DE MASQUES

Tous les masques correspondants aux différentes opérations

technologiques (dépôts, gravures, passivation) sont réalisés au laboratoire. Trois phases distinctes sont nécessaires :

1ère phase : CAO sur microordinateur

2ème phase : Génération des motifs à l'échelle 10 sur support gélatine par photocomposeur (Pattern Generator GCA MANN).

3ème phase : Photoréduction à l'échelle 1 et répétition sur plaque à l'oxyde de fer (photorépéteur GCA MANN mod. 1795).

Nous utilisons 4 masques :

- 1 masque de diamètre 120 μm pour le dépôt du métal de barrière.
- 1 masque de diamètre 100 μm pour les dépôts de couches d'épaississement.
- 1 masque de diamètre 140 μm pour la gravure Mesa.
- 1 masque de diamètre 80 μm pour le dépôt éventuel d'une couche de passivation.

II.1.4. ELABORATION DES COMPOSANTS

Les réalisations des contacts et les procédures de gravure des semiconducteurs constituent les opérations fondamentales pour les dispositifs à semiconducteurs (diodes, Fet, circuits intégrés...). Nous nous proposons, après avoir rappelé les propriétés d'un contact métal-semiconducteur, de mettre au point les technologies adaptées à la réalisation des diodes IMPATT.

II.1.4.1. Barrière métal-semiconducteur

II.1.4.1.1. Rappel théorique

Lorsqu'un métal est en contact intime avec un semiconducteur, il s'établit à l'interface une barrière de potentiel électrostatique (Fig. 40) [26].

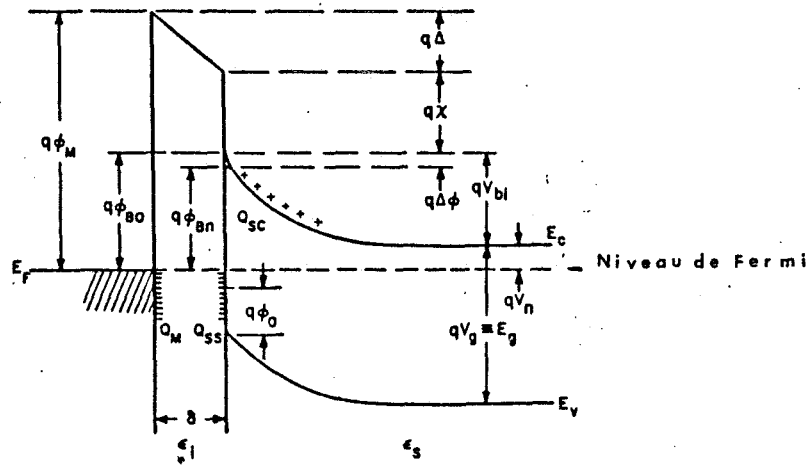


Fig.40 - Diagramme de bande d'énergie d'une barrière
Métal Semiconducteur

- ϕ_M = travail de sortie du métal
- θ_{Bn} = hauteur de barrière M-SC
- ϕ_{B0} = hauteur de barrière à champ nul
- ϕ_0 = niveau d'énergie en surface
- $\Delta\phi$ = diminution de la hauteur de barrière
- Δ = potentiel à travers la couche d'interface
- χ = affinité électronique du semiconducteur
- V_{bi} = potentiel de built-in
- Q_{SC} = densité de charge d'espace dans le semiconducteur
- Q_{SS} = densité d'états de surface du semiconducteur
- Q_M = densité de charge en surface du métal
- δ = épaisseur de la couche d'interface
- ϵ_s = permittivité du semiconducteur
- ϵ_i = permittivité de la couche d'interface

L'expression générale reliant la hauteur de barrière en fonction des grandeurs caractéristiques du métal et du semiconducteur est assez complexe. Cependant, si on se limite au cas usuel suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} N_D < 10^{18} \\ \epsilon_S = \epsilon_0 \\ \epsilon_i = \epsilon_0 \end{array} \right.$$

Cette expression se simplifie en :

$$\phi_{Bn} = \gamma(\phi_M - \chi) + (1-\gamma)\left(\frac{E_g}{q} - \phi_0\right) - \Delta\phi \quad [26]$$



où :

$$\gamma = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i + q^2 S D_S} \quad D_S : \text{densité d'états à la surface du semiconducteur}$$

$\Delta\phi$ = abaissement de la barrière due :

- à l'effet Schottky :

$$\Delta\phi_1 = \frac{q^3 N_D}{8\pi^2 \epsilon_S^3} (V_{bi} + V)^{1/4}$$

- et à l'effet tunnel :

$$\Delta\phi_2 = \frac{2qN_D}{\epsilon_S} (V_{bi} + V)^{1/2}$$

Considérons deux cas limites suivants :

* barrière sans état de surface

$$D_s \rightarrow 0 \quad \text{et} \quad \phi_{Bn} = \phi_M - \chi - \Delta\phi$$

On voit que la hauteur de barrière d'interface est étroitement liée au choix du métal par l'intermédiaire de son travail de sortie. C'est le cas des semiconducteurs ioniques tels que CdS, ZnO, ZnS... (Fig. 41) [26].

* barrière avec états de surface importants

$$D_s \rightarrow \infty \quad \text{et} \quad \phi_{Bn} = \frac{E_g}{q} - \phi_0 - \Delta\phi$$

Dans ce cas, on remarque que la hauteur de barrière est pratiquement quasi-indépendante du choix du métal. Elle dépend par contre fortement des propriétés du semiconducteur. C'est le cas des semiconducteurs covalents : Si, Ge, GaAs (Fig. 41) [26] InP. A l'exception de l'InP, la hauteur de barrière relevée expérimentalement se situe aux environs de $2/3 E_g$ pour les semiconducteurs de type N et $1/3 E_g$ pour les semiconducteurs de type P (Fig. 42) [26].

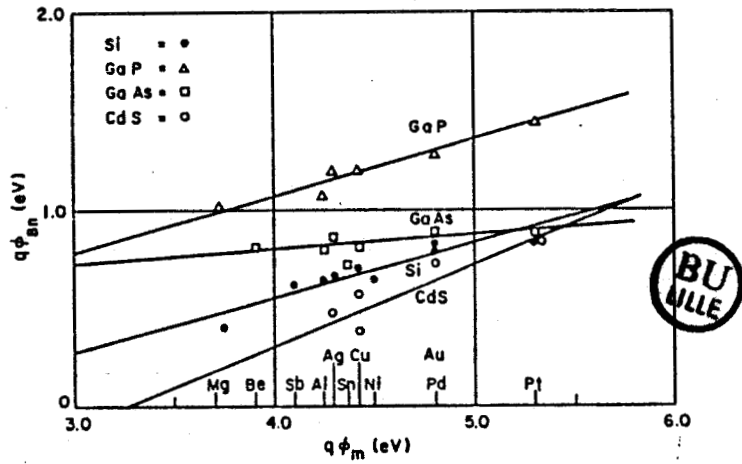


Fig.41 - Dépendance de la hauteur de barrière avec le métal pour différents semiconducteurs

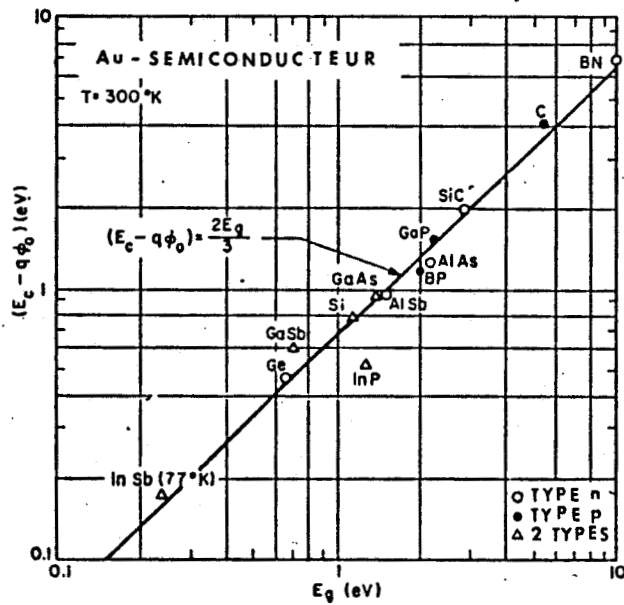


Fig.42 - Dépendance de la hauteur de barrière avec la largeur de la bande interdite pour différents semiconducteurs

II.1.4.1.2. Réalisation pratique

* Préparations de surface

Compte-tenu de l'importance de l'état de surface du semi-conducteur dans la formation de la barrière, il convient de trouver un système de nettoyage efficace et reproductible pour éliminer toutes les contaminations organiques ioniques ainsi que les traces d'oxyde. Pour cela, nos essais portent sur les systèmes de nettoyage suivants :

Solvants organiques + $\left\{ \begin{array}{l} \text{pulvérisation inverse avec Ar}^+ \\ \text{ou solutions acides} \\ \text{ou solutions basiques} \end{array} \right.$

Le nettoyage ionique n'est guère efficace pour des ions de faible énergie. Pour des ions plus énergétiques (>100 eV), il engendre des défauts et dislocations cristallines qui peuvent se propager bien en-dessous de la surface. Le nettoyage chimique avec des solutions acides ou basiques fournit d'excellents résultats comme nous le verrons par la suite.

* Choix et dépôt du métal

Pour réaliser le dépôt de métal de barrière, nous disposons des possibilités suivantes :

- évaporation par effet joule de : Ni, Al, Au
- évaporation au canon à électrons de : Ti, Al
- pulvérisation cathodique RF de : Ni, Al, Cr, Ti, Pt, Au.

Le Ni et l'Al sont exclus pour les applications envisagées à cause de leur perméabilité aux solutions de gravure à base d'acide H_2SO_4 , HCl ...). Le Pt est retenu de préférence aux Cr, Ti, Au, car il donne une barrière plus élevée avec le GaAs (n) (Fig. 41).

Le Pt étant un métal très réfractaire et pour des problèmes d'accrochage, le dépôt est réalisé par pulvérisation cathodique RF.

La métallisation de la barrière est ensuite suivie d'un traitement thermique et d'un épaissement pour assurer les prises de contact.

* Traitement thermique

Pour obtenir une barrière stable, nous opérons le recuit sous atmosphère réductrice ($N_2 + H_2$) à une température de l'ordre de $400^\circ C$ pendant quelques minutes.

* Epaississement de contact

Parmi différentes couches d'épaississement essayées :

- Ti Au
- Cr Au
- Pt Au
- Ti Pt Au
- Ti Pt Ti Au

nous avons retenu le système TiPtTiAu qui nous est apparu le mieux approprié du point de vue de l'adhérence des couches et de la protection du contact sous-jacent. Le Ti servant de couche d'accrochage et la Pt de barrière à une éventuelle diffusion d'Au. Les dépôts de Ti et Pt sont réalisés par pulvérisation cathodique, le dépôt d'Au par évaporation sous vide.

II.1.4.2. Contacts ohmiques

Un contact métal semiconducteur est considéré comme ohmique lorsqu'il présente une caractéristique $I(V)$ linéaire au voisinage de l'origine. Il sera de bonne qualité si la résistance de contact R_c est faible. En pratique, on définira la qualité d'un contact ohmique par

sa résistivité de contact ρ_c grandeur caractéristique qui ne dépend pas de la géométrie du contact.

$$\rho_c = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1}_{V \rightarrow 0} = \lim (R_c \Delta S)_{\Delta S \rightarrow 0}$$

S = surface de contact

Pour l'arséniure de gallium, la dépendance de la résistivité de contact en fonction du dopage et pour différentes valeurs de la hauteur de barrière est représentée sur la figure 43 [27].

On constate que les résistivités de contact diminuent lorsque

- les hauteurs de barrière diminuent
- les dopages du semiconducteur augmentent.

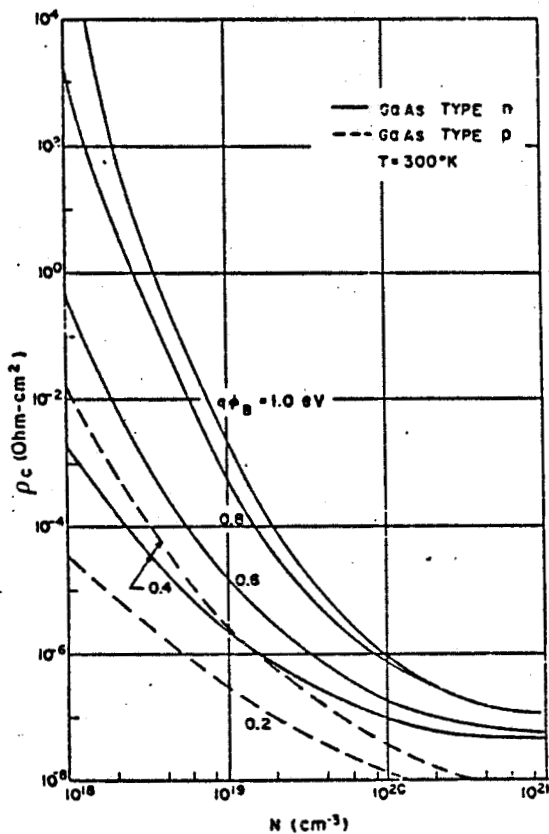


Fig.43 - Variation de la résistivité de contact pour différents dopages du GaAs

II.1.4.2.1. Formation des contacts ohmiques

A partir des éléments précédents, on peut imaginer différents procédés physiques pour les réalisations de contacts ohmiques. La méthode la plus employée consiste à surdoper le semiconducteur au voisinage de la surface. Cette couche surdopée peut être réalisée avant le dépôt du métal par épitaxie, implantation ionique, diffusion... ou après le dépôt en utilisant un alliage dopant du semiconducteur.

II.1.4.2.2. Réalisation pratique

Comme pour les barrières Schottky, les propriétés du contact ohmique dépendent de la préparation de surface, du choix des couches métalliques, de leur épaisseur, des conditions de dépôt et de recuit thermique.

* Choix et dépôt du métal

En général, on utilise comme dopants du semiconducteur (III-V) de type N, les métaux tels que le Te, Se, Ge, Si, Sn... en association avec l'Au ou l'Ag. L'alliage à base d'Au est le plus utilisé car il est moins sensible à l'environnement extérieur (O₂, H₂O...) Le système AuGe-Ni donne à notre connaissance les meilleurs résultats.

Dans la formation du contact ohmique sur GaAs, tous les composés métalliques Au, Ge, Ni jouent un rôle actif et complémentaire. Alors que l'Au agit comme getter du Ga, le Ge agit comme dopant, lorsqu'il occupe le site du Ga. Le Ni quant à lui assure l'homogénéité du contact.

En pratique le dépôt est effectué par évaporation sous vide de l'alliage AuGe (proportions 88 %, 12%) suivi d'une pulvérisation cathodique RF de Ni.

* Traitement thermique

Le recuit de contact permet la formation de l'eutectique AuGe. Nous opérons sous atmosphère réductrice ($N_2 + H_2$) à $470^\circ C$ pendant 1 mn.

Ces paramètres sont choisis de façon à minimiser l'évaporation sélective d'As durant le traitement.

II.1.4.3. Gravure Mesa

Pour obtenir un Mesa homogène, présentant un profil favorable (voir structure inversée) et un état de surface non générateur de courant de fuite superficiel, il convient de choisir judicieusement les techniques de gravure et des couches de protection appropriées pour la phase de gravure proprement dite soit ultérieurement lors de la passivation du composant. Compte tenu de la profondeur relativement importante du Mesa ($> 10\mu m$), nous avons opté pour une attaque chimique. Les solutions acides du type : $H_2 SO_4 - H_2 O_2 - H_2 O$ donnent des résultats satisfaisants.

Pour assurer une protection suffisante des plots métalliques durant la gravure, nous avons dans un premier temps utilisé des couches de SiO_2 déposées par centrifugation. La non reproductibilité et les problèmes de sous-gravures irrégulières nous ont conduit à utiliser les résines positives classiques.

II.1.4.4. Etapes de réalisation des composants

1 - Réalisation de contact ohmique

* Préparation de surface

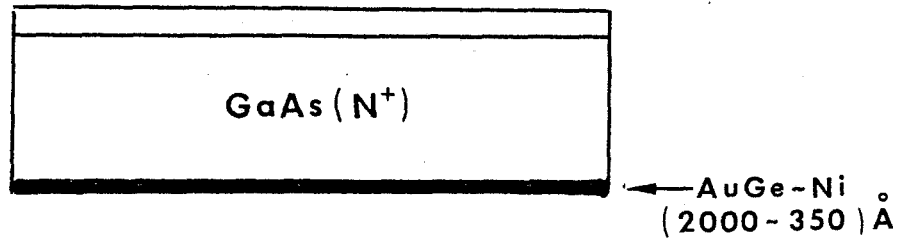
- Tetrachlorure de carbone, Toluène, Acétone, Eau désionnisée (DI)
- Solution HCl

* Métallisations

- Evaporation sous vide d'Au : Ge (88 :12) = 2000Å
- Pulvérisation cathodique RF de Ni = 350 Å

* Recuit eutectique

- T°-470°C pendant 1' sous N₂ = H₂ (90=10)



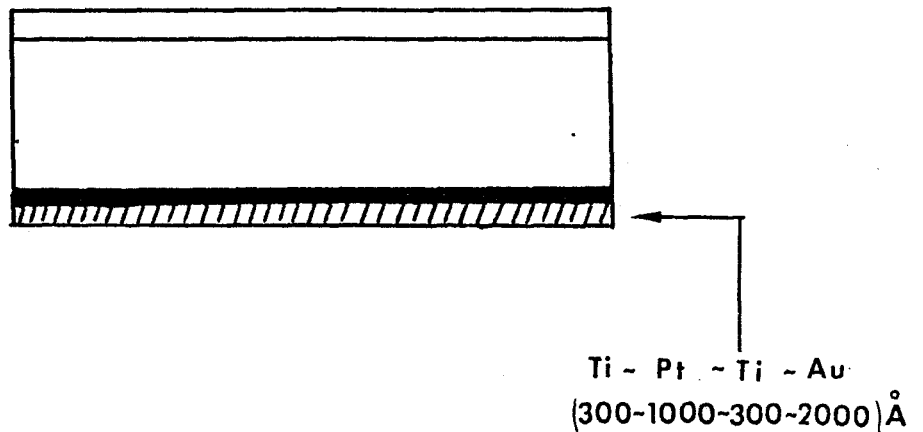
2 - Epaississement du contact ohmique

* Métallisations

- pulvé de Ti = 300 Å
- Pulvé de Pt = 1000 Å
- Pulvé de Ti = 300 Å
- Evap. d'Au = 2000 Å

* Recuit thermique

- T°-200 °C pendant 15' sous N₂ + H₂



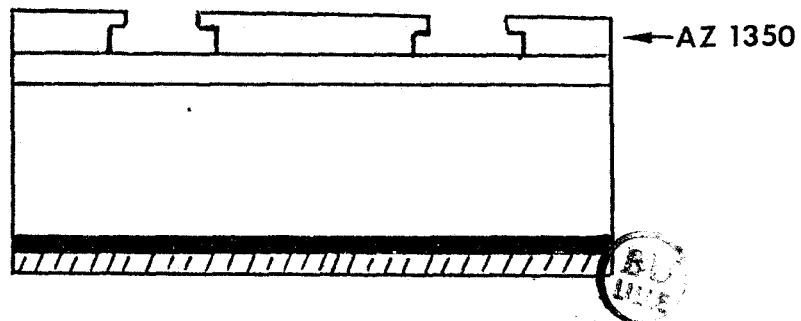
3 - Réalisation de la barrière métal semiconducteur

* Préparation de surface

- Tétrachlorure de carbone, Toluène, Acétone, eau D.I.
- solution HCl ou NH_4OH

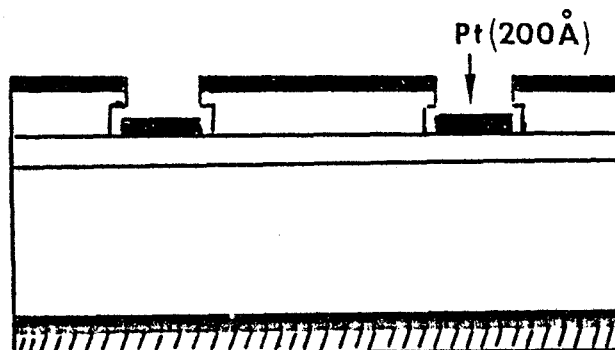
* photogravure des motifs

- résine AZ 1350, séchage 70°C pendant 20'
- traitement au Chlorobenzène : 5'
- insolation : UV 25 "
- révélation : AZ développer 50 %, 40 "
- solution HCl ou NH_4OH diluée



* Métallisation

- Pulvé de Pt : 200 \AA

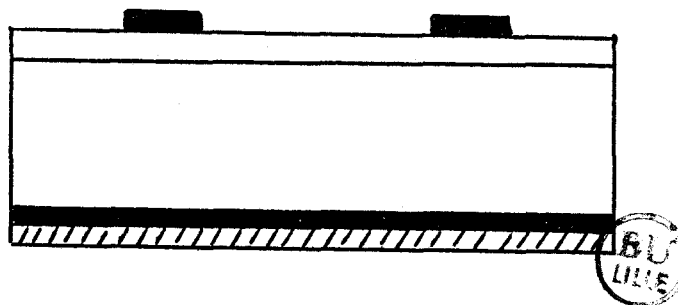


* Lift-off

- acétone + agitation ultrasonique (US)

* Traitement thermique

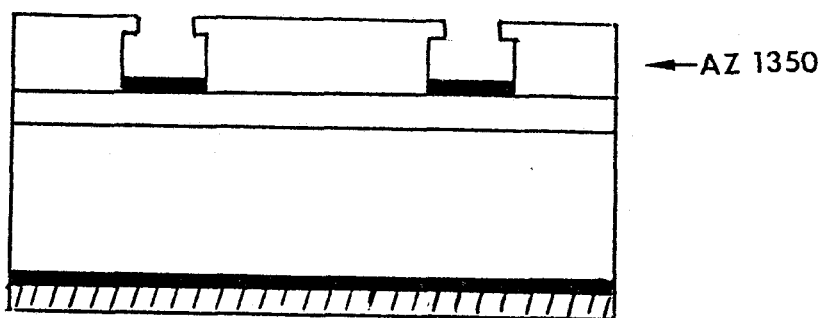
- T° ~ 400 °C pendant qq mn sous N₂ + H₂



4 - Epaississement de la barrière

* Photogravure de motifs

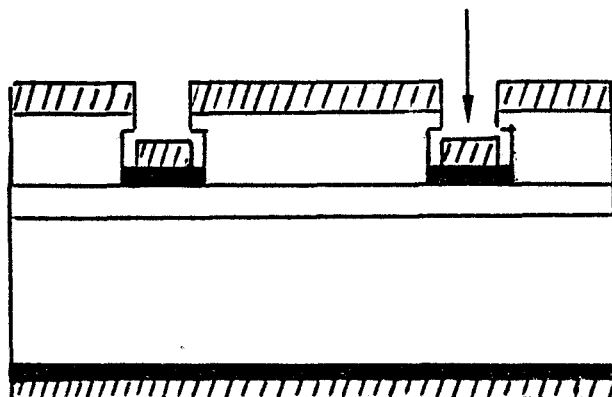
- idem



* Métallisation

- idem

Ti - Pt - Ti - Au
(300-1000-300-2000) Å

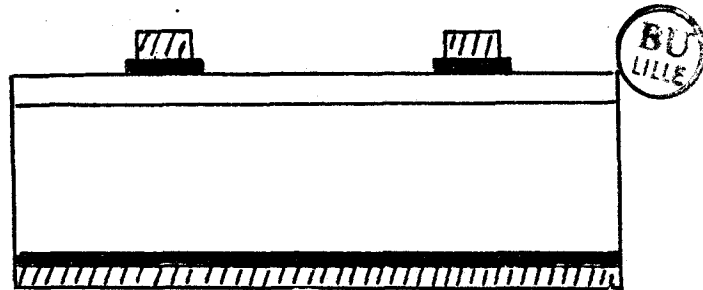


* Lift-off

- idem

* recuit thermique

- idem

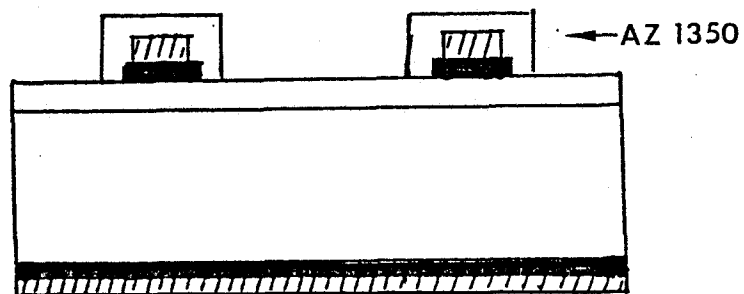


5 - Gravure Mesa

* photogravure des masques de protection

- idem (pas de traitement au chlorobenzène)

- cuisson de la résine : 120°C, 30'

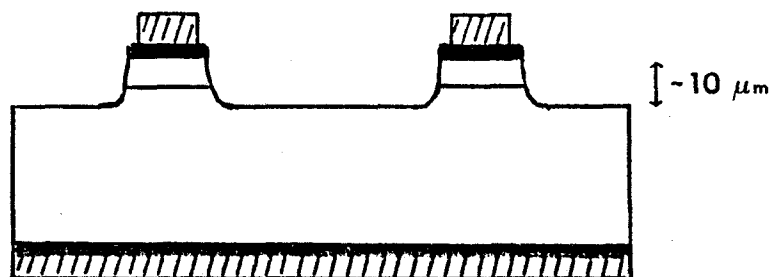


* Gravure Mesa

- solution $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$ (5:1:1) à 50°C

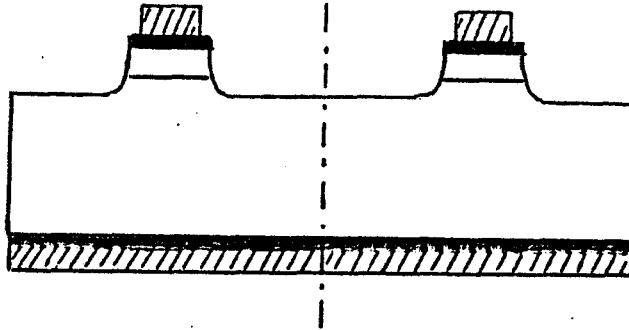
$v = 1,1 \mu\text{m}/\text{mn}$

- profondeur de gravure - 10 μm



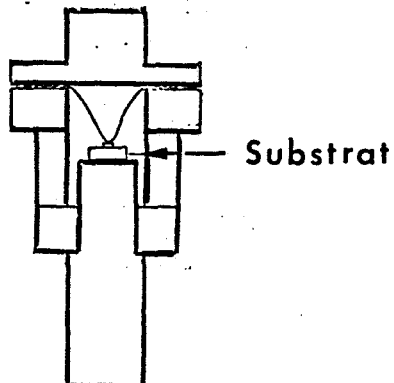
6 - Découpe des échantillons

- scie à disque diamanté
- dimension (500 x 500) μm



7 - Encapsulation des échantillons

- boîtier S_4
- montage non inversé
- soudure colle conductrice à Ag ou préform AuSn
US = 2 fils d'Au de $25\mu\text{m}$
- passivation : SiO_2



II.2. TECHNOLOGIE DES DIODES IMPATT GaAs A BARRIERE METAL SEMICONDUCTEUR EN STRUCTURE MESA INVERSEE

II.2.1. STRUCTURE INVERSEE

En structure Mesa inversée, la diode IMPATT GaAs à barrière Métal Semiconducteur à réaliser, est représentée à la figure 44. Par rapport à la structure normale, on remarque :

- l'existence d'un radiateur intégré
- une gravure Mesa à partir du substrat N⁺
- une épaisseur du substrat beaucoup plus faible.

La technologie d'élaboration du composant comporte les étapes suivantes :

- réalisation d'une barrière sur toute la face active du semiconducteur
- implantation d'un radiateur intégré
- amincissement du substrat massif
- réalisation de contacts ohmiques sur le substrat aminci
- gravure mesa du semiconducteur jusqu'au radiateur
- découpe et montage des diodes.

Il est à remarquer que l'amincissement du substrat peut être réalisé avant ou après l'intégration du radiateur. Lorsque l'amincissement est effectué avant l'intégration, les contraintes mécaniques sont minimisées. Par contre, les difficultés de manipulation liées à la fragilité du substrat sont notablement augmentées. Dans la seconde hypothèse, les problèmes se trouvent inversés. Nous avons pour notre part essayé les deux méthodes. Les résultats obtenus sont tout à fait équivalents. Toutefois, les techniques utilisant l'amincissement après mise en place du radiateur s'avèrent plus simples.

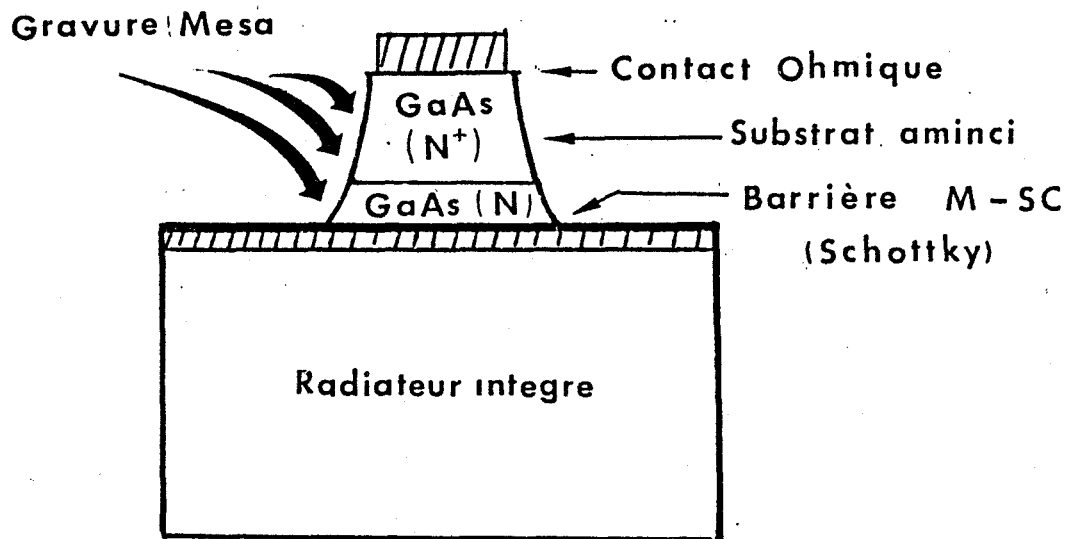


Fig.44 - Diode IMPATT GaAs à radiateur intégré en structure Mesa inversée

I.2.2. MATERIAUX

Les épitaxies utilisées ont été fournies par les laboratoires de recherche de THOMSON de CORBEVILLE. Pour la couche R 7893, le profil de dopage différencié LHL (Fig. 45) présente les caractéristiques suivantes :

- dopage Low (en surface)
- profondeur du pic
- dopage High (pic)
- dopage Low (transit)

$$\begin{aligned} N_{1\text{LOW}} &= ? \\ \delta &= 1500 \text{ \AA} \\ N_{\text{HIGH}} &= 5 \cdot 10^{17} \text{ at/cm}^3 \\ N_{2\text{LOW}} &= \sim 10^{16} \text{ at/cm}^3 \end{aligned}$$

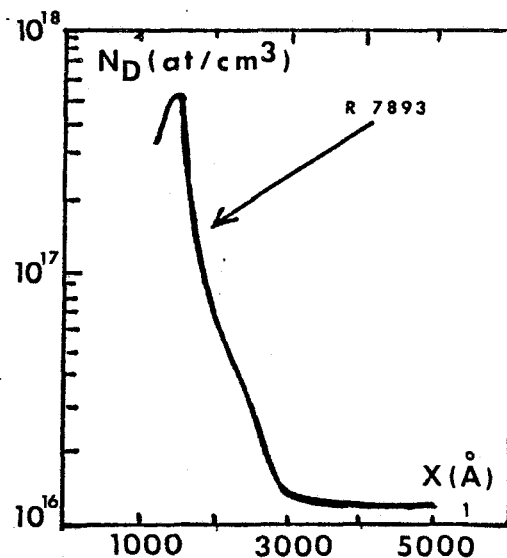


Fig.45 - Profil du pic de dopage

II.2.3. MASQUES

Pour cette partie, nous avons prévu des masques permettant de réaliser simultanément des diodes de diamètres différents.

Les diamètres pour les plots de contacts ohmiques et pour les masquages Mesa sont respectivement :

- $\phi_1 = 70 \mu\text{m}$ et $\phi_2 = 150 \mu\text{m}$
- $\phi_1 = 120 \mu\text{m}$ et $\phi_2 = 190 \mu\text{m}$
- $\phi_1 = 180 \mu\text{m}$ et $\phi_2 = 250 \mu\text{m}$
- $\phi_1 = 230 \mu\text{m}$ et $\phi_2 = 300 \mu\text{m}$

II.2.4. ELABORATION DES COMPOSANTS

Outre les opérations technologiques évoquées pour l'élaboration des diodes IMPATT en structure normale, les problèmes liés à l'inversion sont les suivants :

- implantation du radiateur intégré

- amincissement du substrat GaAs
- modification du process de réalisation du contact ohmique.

II.2.4.1. Implantation du radiateur intégré

Le radiateur intégré doit être réalisé de manière, d'une part, à minimiser la résistance thermique et, d'autre part, à assurer une rigidité mécanique suffisante pour permettre les opérations technologiques. Le métal utilisé doit être bon conducteur car il assure l'évacuation de la chaleur de la zone active du composant vers le radiateur principal (pilier du boîtier). Différents matériaux peuvent être envisagés (Tableau I).

TABLEAU I

Métaux/ S.C.	K (W/cm°C) 300°K
Diamant	
II A	22
II B	13
Ag	4,27
Cu	4
Au	3,16
GaAs (n ⁺)	0,5

Nous utilisons pour notre part un radiateur en Au. L'implantation est faite par dépôt électrolytique dans un bain de cyanure double d'Au et de K. L'épaisseur est fixée à 60µm.

Pour obtenir un dépôt homogène, ce qui est indispensable pour les opérations ultérieures, nous devons pendant la croissance :

- maintenir le bain constamment agité
- maintenir la plaquette bien parallèle aux grilles d'anode et de cathode.

II.2.4.2. Amincissement du substrat

Cette étape est particulièrement importante pour un fonctionnement correct du composant. Du point de vue électrique, elle permet de diminuer notablement la contribution du substrat aux résistances série et thermique de la diode. Du point de vue technologique, plus le substrat est aminci, plus la séparation des diodes par gravure Mesa est rapide.

On ne peut toutefois pousser la phase d'amincissement trop loin. Lorsque l'épaisseur du substrat devient inférieure à une trentaine de microns, de nouvelles difficultés apparaissent à la gravure des plots de contact et à la soudure des fils d'or au cours du montage. L'amincissement du substrat peut être effectué :

- soit par rodage mécanique,
- soit par polissage mécano-chimique.

II.2.4.2.1. Rodage mécanique

Les plaquettes sont collées sur un support métallique qui est entraîné par un mouvement de translation et de rotation sur un disque de polissage alimenté en poudre de carborundum mouillée (Fig. 46). La disposition des plaquettes ainsi que la coplanéité de différentes surfaces à roder conditionnent l'uniformité de l'érosion. Pour une meilleure répartition de pression, la plaquette GaAs est collée au centre du support. Trois plaquettes de Si de dimensions analogues sont collées sur la périphérie et angulairement distantes de 120° (Fig.46). Le contraste de dureté Si/GaAs permet d'adoucir l'usinage du GaAs.

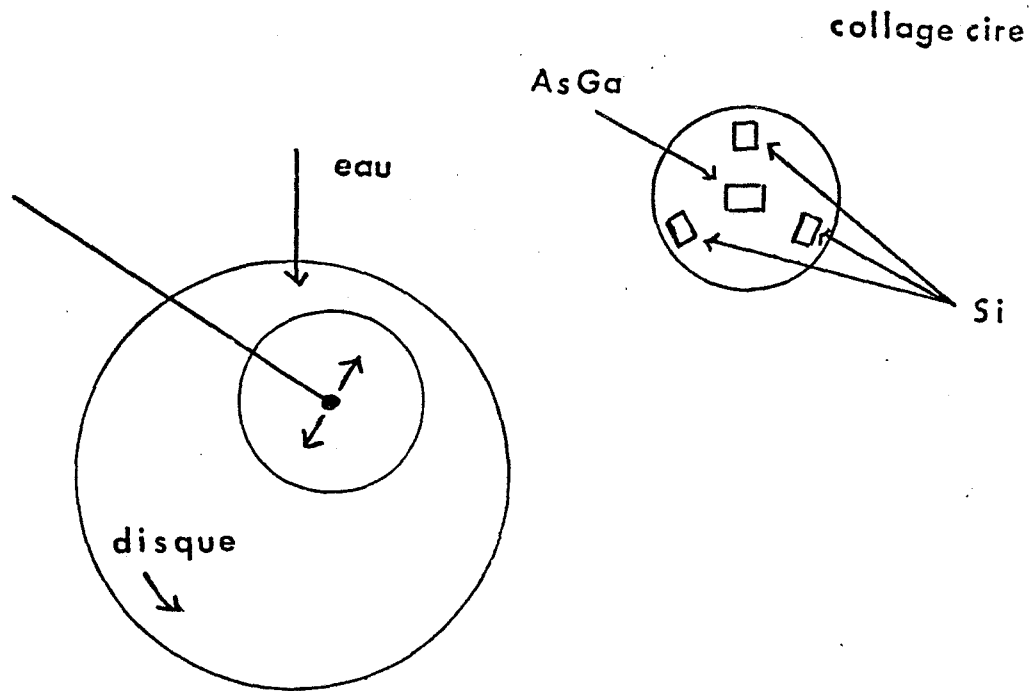


Fig.46 - Rodage mécanique.

Pour les opérations de rodage, nous procédons par étapes successives. Le diamètre des grains de carborundum est diminué au fur et à mesure du rodage afin de l'accélérer en début d'opération et d'obtenir le meilleur état de surface possible en fin d'opération. L'épaisseur finale de la plaquette est de $100 \pm 8 \mu\text{m}$.

Le rodage mécanique est en général rapide. Cependant, l'état de surface est médiocre et les écarts de planéité sont assez importants.

II.2.4.2.2. Polissage mécano-chimique

Cette technique de polissage repose sur une double action [28] :

- action mécanique par un mouvement de double rotation,

sur du gel de silice, du porte substrat par rapport au disque de polissage,

- action chimique en présence d'hypochlorite de soude.

Le schéma de principe est représenté à la figure 47.

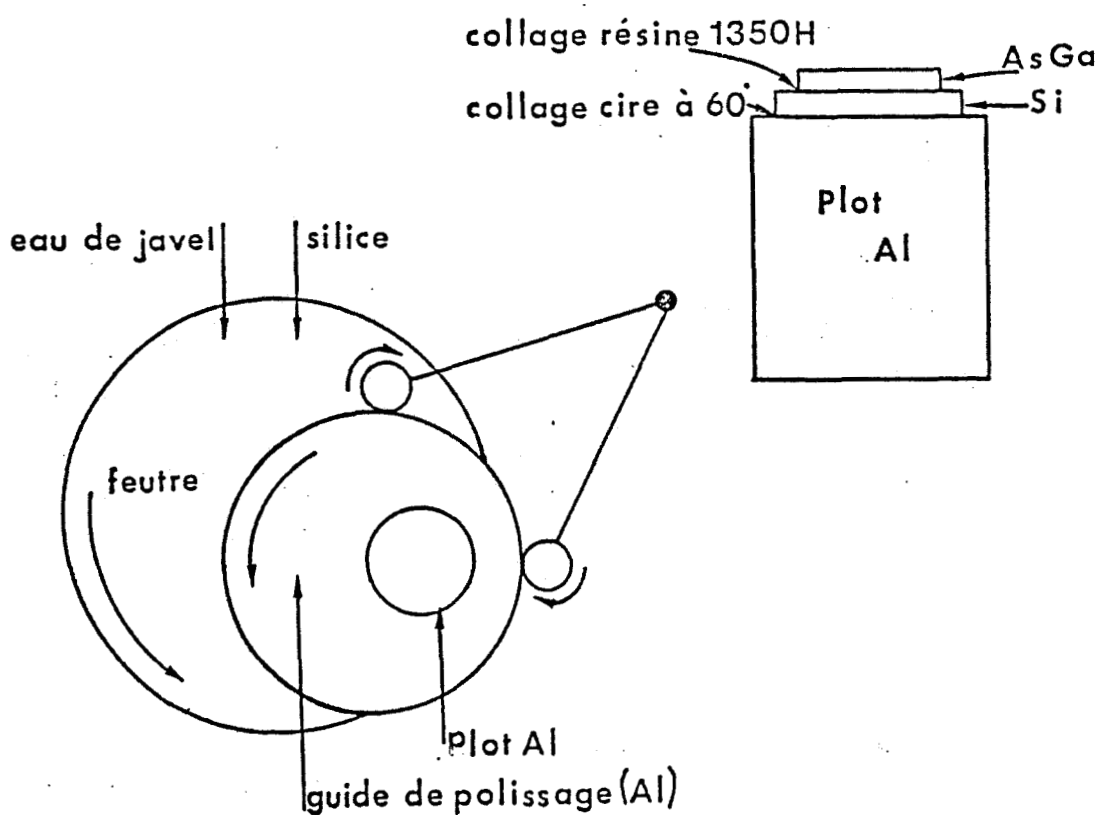


Fig.47 - Polissage mécano-chimique

Le disque de polissage reçoit goutte à goutte la solution d'hypochlorite de soude et de gel de silice dilués. La vitesse du polissage dépend pour une solution donnée de la nature du disque et de la vitesse d'entraînement du plateau. Nous commençons en général avec une vitesse assez grande (120 t/mn) et nous terminons avec une vitesse plus faible (40 t/mn).

Par ce procédé, la plaquette peut être amincie jusqu'à une épaisseur de $20 \pm 3\mu\text{m}$. En général, nous nous limitons à environ $30\mu\text{m}$ pour éviter de trop fragiliser l'échantillon.

Par rapport au rodage mécanique, le polissage mécano-chimique est nettement moins rapide. Mais, en contrepartie, il donne d'excellents résultats concernant l'état de surface, la planéité et l'épaisseur finale.

A signaler enfin que la reproductibilité du polissage mécano-chimique pour obtenir une épaisseur du substrat GaAs de $30\mu\text{m}$ avec une planéité de $\pm 3\mu\text{m}$ est excellente.

II.2.4.2.3. Attaque chimique

Quel que soit le mode d'amincissement, la mise à épaisseur finale est effectuée par attaque chimique, afin d'éliminer les défauts créés par les contraintes mécaniques. Il convient de noter que l'écart de planéité après amincissement final ne doit pas excéder $\pm 3\mu\text{m}$.

REMARQUES

1 - Contact ohmique

En structure inversée, on note que la réalisation du contact ohmique est postérieure à la réalisation de la barrière Schottky. Or, la température de formation de l'eutectique AuGe est largement supérieure à la température de recuit de la barrière. Pour éviter la détérioration de celle-ci, trois solutions sont possibles :

- effectuer un recuit à basse température pendant une durée plus longue

- utiliser un autre alliage à température eutectique plus basse (Ex : AuSn)
- réaliser une barrière métal semiconducteur de faible hauteur.

En pratique, la troisième solution est la plus simple à mettre en oeuvre, compte tenu du dopage élevé du substrat ($N_D > 10^{18}$ at/cm³). Dans ces conditions, la barrière ainsi obtenue est quasiment transparente pour le transport des charges.

2 - Gravure Mesa

A la différence de la structure normale, la gravure Mesa est ici plus profonde, ce qui se traduit par un temps de gravure plus long nécessitant une meilleure tenue du masque de résine. Pour cela, nous choisissons les concentrations de la solution $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O_2$ donnant une homogénéité de gravure la meilleure possible et préservant suffisamment la résine durant les opérations de gravure.

Il faut par ailleurs tenir compte que la vitesse de gravure est toujours supérieure sur les bords de la plaquette et compte tenu des dimensions réduites des échantillons traités (~ 1 cm²), il faut utiliser une procédure qui tend à minimiser cet effet (Fig. 48).



Fig.48 - Effet de bord

Enfin, on peut noter que la vitesse de gravure devient excessive à l'approche du radiateur. Aussi il est nécessaire d'achever l'opération par une solution plus douce. Sinon on risque une sous-gravure importante et les diodes peuvent être coupées en l'espace de quelques secondes (Fig.49).

Avec toutes ces précautions , le rendement de fabrication est de l'ordre de 85% .

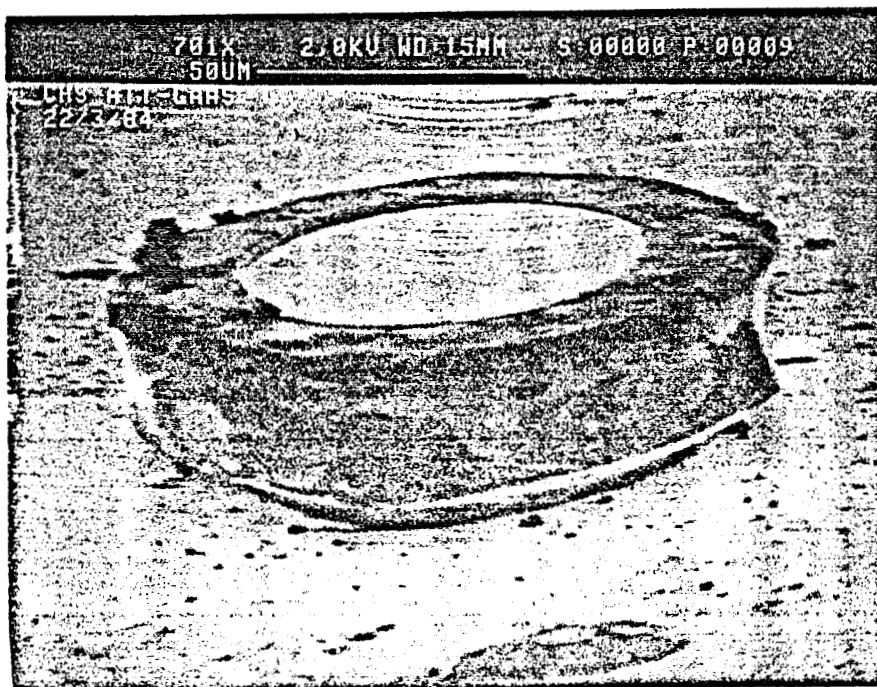


Fig.49 - Vue de la diode légèrement sous gravée

II.2.4.3. Découpe et montage des diodes

La séparation finale des diodes par découpe du radiateur se fait à l'aide d'un massicot réalisé au laboratoire.

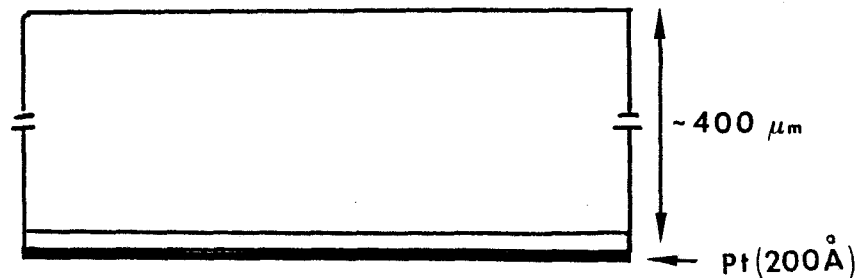
Le montage des diodes s'effectue dans un boîtier hyperfréquence S_4 . La diode est soudée côté radiateur au pilier central du boîtier avec une préforme Au Sn sous atmosphère d'azote. Le contact supérieur est assuré par soudure ultrasonique de 2 fils d'or de 25 μm . Le composant peut ensuite être passivé par un dépôt de diélectrique (SiO_2 , polyimide).

Durant cette phase de montage, il faut veiller à ne pas introduire d'éléments parasites (selfs, capacités, résistances) susceptibles de réduire les performances en hyperfréquences.

II.2.4.4. Etapes de réalisation des composants

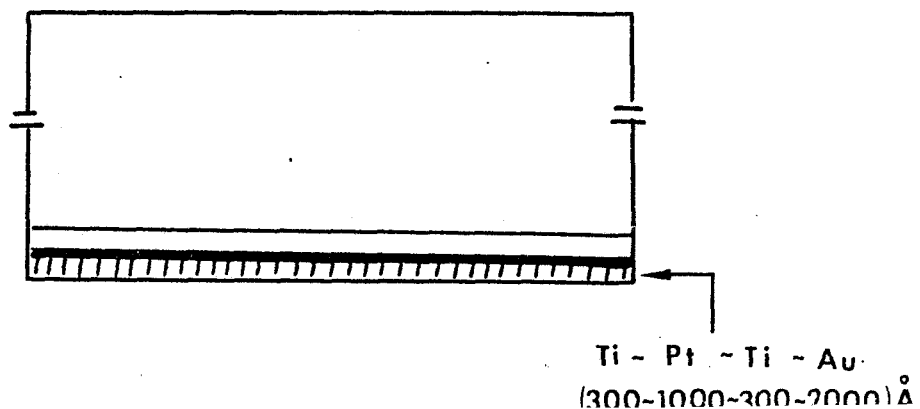
1 - Réalisation de la barrière Schottky

Voir structure normale



2 - Epaisseur de la barrière

Voir structure normale



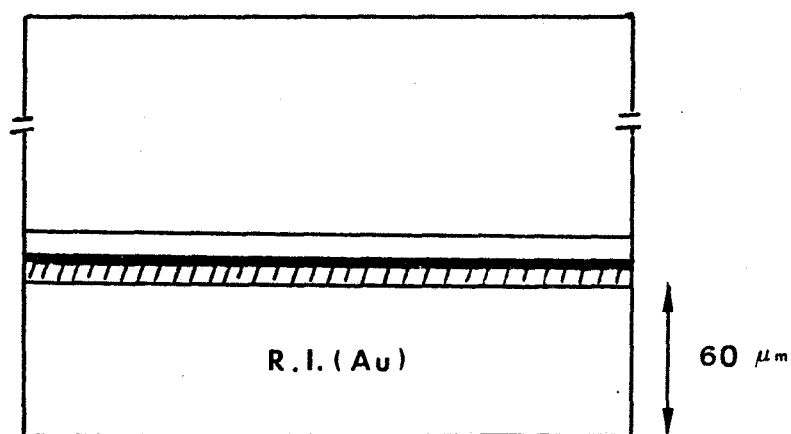
3 - Implantation du radiateur intégré

* dépôt électrolytique

- bain de cyanure double d'Au et de K

- $J = 2 \text{ mA/cm}^2$, $v = 8 \mu\text{m/h}$

- $e = 60 \mu\text{m}$



4 - Amincissement du substrat

* polissage mécano-chimique

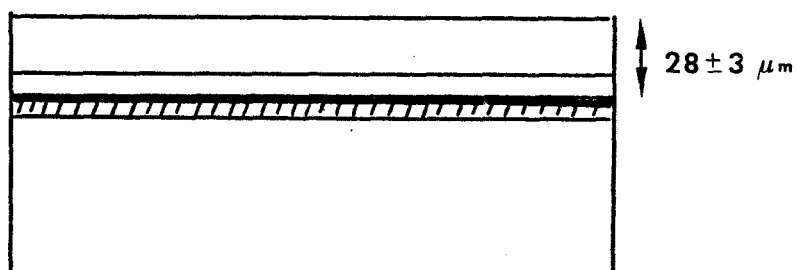
- bains { hypochlorite de soude 50%
gel de silice 50 %

- $e = 30 \pm 3 \mu\text{m}$

* attaque chimique

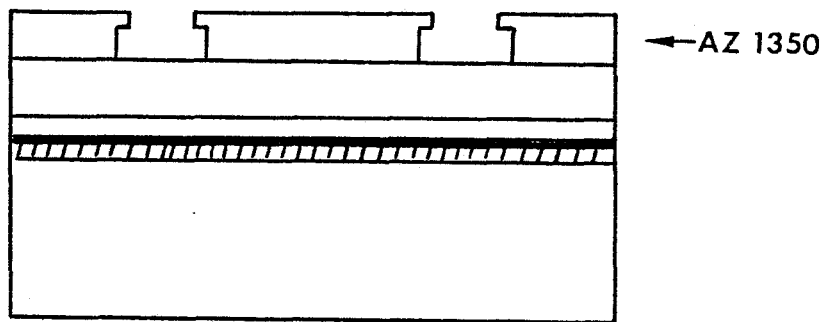
- solution : $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} (5:1:1)$ à 50°C .

- $e = 28 \pm 3 \mu\text{m}$

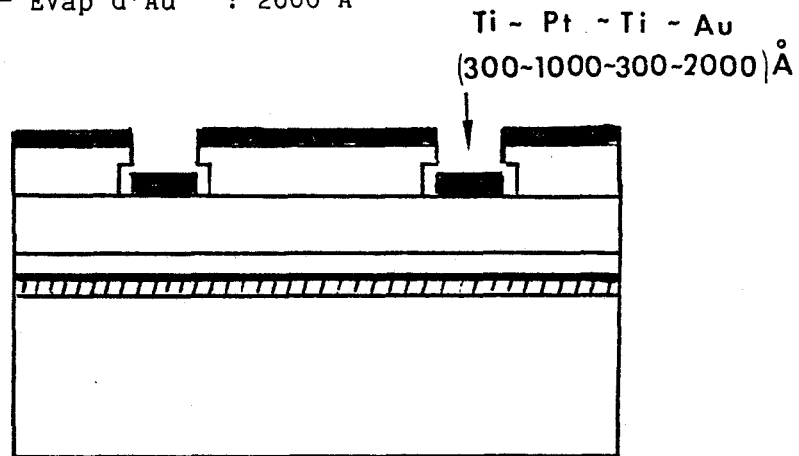


5 - Réalisation de contacts ohmiques

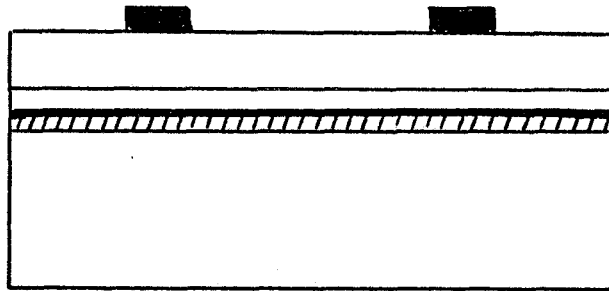
- * préparation de surface
 - voir structure normale
- * photogravure des motifs
 - voir structure normale



- * métallisations
 - pulvé de Pt : 1000 Å
 - pulvé de Ti : 300 Å
 - Evap d' Au : 2000 Å

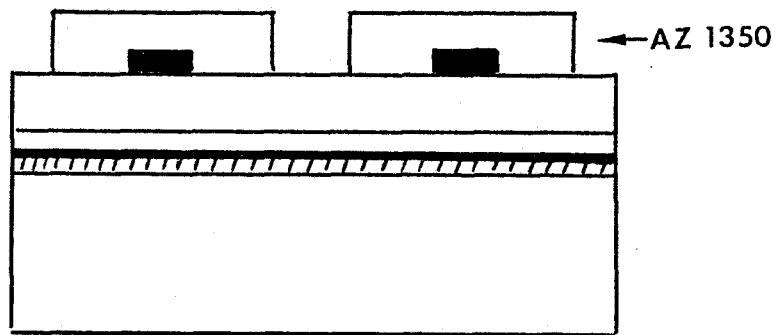


- * Lift-off
 - acétone + agitation ultrasonique (US)



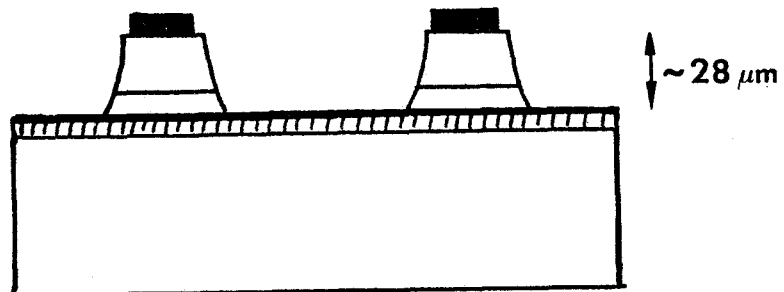
6 - Gravure Mesa

- * photogravure des masques de protection
- voir structure normale



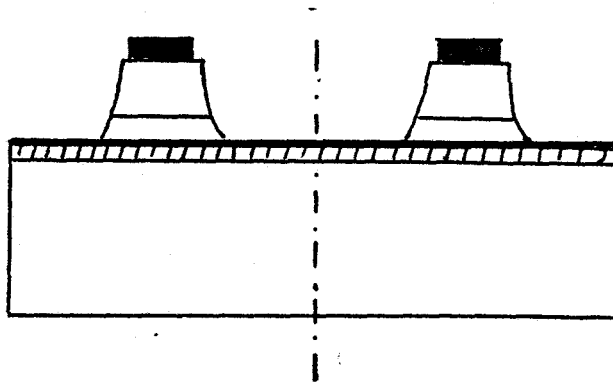
* Gravure Mesa

- solution H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O (3:1:1) à $50^\circ C$
- v - $2 \mu m/mn$
- attaque jusqu'au radiateur : - $28 \mu m$



7 - Découpe du radiateur

- massicot de laboratoire
- dimension (500 x 500) μm

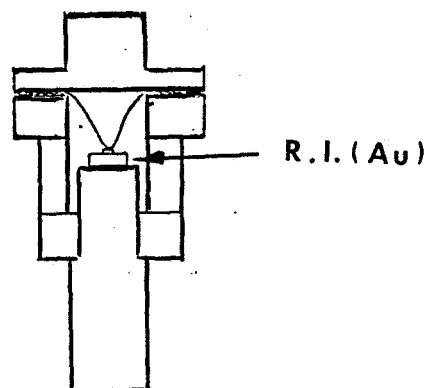


8 - Traitement thermique des contacts ohmiques

- $T^\circ \sim 300^\circ\text{C}$ pendant 15' sous $\text{N}_2 + \text{H}_2$

9 - Montage des diodes

- boîtier S_4
- soudures {
 - Preforme AuSn
 - US de 2 fils d'or de 25 μm
- passivation (SiO_2 , Polyimide)



CONCLUSION

L'étude préliminaire d'une diode IMPATT GaAs a permis la mise au point des opérations technologiques de base.

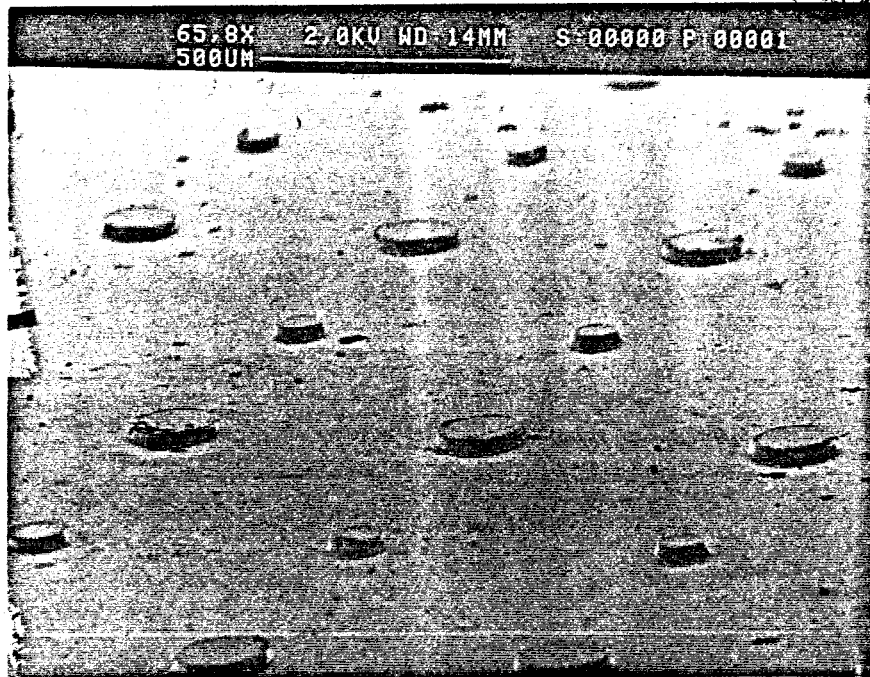
Si dans leur principe ces opérations sont simples, la réalisation pratique a soulevé plusieurs problèmes délicats, en particulier en ce qui concerne :

- la barrière Métal-Semiconducteur (hauteur suffisante, facteur d'idéalité ~ 1),
- l'implantation d'un radiateur intégré (amincissement et planéité du substrat, métallisations épaisses),
- la gravure "Mesa" (uniformité de la vitesse de gravure, non uniformité des Mesa profonds).

Les réalisations de nombreuses séries de diodes ont permis de résoudre ces différents problèmes et de maîtriser la technologie de faisabilité du composant.

Vue des diodes IMPATT GaAs
en technologie Mesa à radiateur intégré

BU
LILLE



IIIème PARTIE

III.1. CARACTERISATION DES DIODES IMPATT

III.2. DIODES GaAs EN STRUCTURE NORMALE

III.3. DIODES GaAs EN STRUCTURE INVERSEE

INTRODUCTION

La caractérisation des composants est effectuée à partir des paramètres suivants :

- 1 - hauteur de barrière Schottky
- 2 - variation de la capacité avec la tension inverse
- 3 - caractéristique courant-tension
- 4 - impédance en fonction de la fréquence et du courant de polarisation
- 5 - puissance et rendement en fonction du courant de polarisation.

Dans un premier temps, nous rappelons les méthodes de caractérisation, puis nous présentons les résultats obtenus.

III.1. CARACTERISATION DES DIODES IMPATT

III.1.1. HAUTEUR DE BARRIERE SCHOTTKY

- Méthode I(v)

Dans le cas d'une barrière Schottky où le transport des charges est du type thermoionique, la caractéristique courant tension directe théorique a pour expression :

$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad \text{pour } V > \frac{kT}{q}$$
$$\text{où } I_s = A^* S T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right)$$

La caractéristique expérimentale est représentée par une relation empirique du type :

$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{n kT}\right)$$

où n est le facteur d'idéalité traduisant l'écart par rapport à la loi théorique.

- . La pente de la caractéristique $\text{Log } I (v)$ permet d'évaluer n
- . l'extrapolation à l'origine donne I_s
- . la hauteur de barrière de potentiel est donnée par :

$$\phi_{Bn} = \frac{kT}{q} \text{Log}\left(\frac{I_s}{A^* S T^2}\right)$$

- Méthode C(V)

Lorsqu'une barrière métal-semiconducteur est soumise à une polarisation inverse, la capacité dynamique de la zone désertée varie suivant la relation :

$$C(v) = \frac{\epsilon S}{W(v)} = S \left(\frac{q \epsilon N_D}{2(V_{bi} + V)} \right)^{1/2}$$

Pour les diodes à profil de dopage uniforme, on peut déduire la tension V_{bi} à partir de la courbe $\frac{1}{C^2} (V)$. Lorsqu'on connaît le dopage du semiconducteur, la hauteur de barrière sera connue.

III.1.2. CARACTERISTIQUE C(V)

La carte de champ électrique au seuil de l'avalanche ainsi que le profil de dopage de la structure semiconductrice peuvent être déduits à partir de la mesure C(V) :

- Carte de champ électrique

$$E(x) = \frac{1}{\epsilon S} \int_{V_{\max}}^{V(x)} C(V) dV$$

- Profil de dopage

$$N_D(x) = \frac{1}{S^2} \frac{C^3}{q\epsilon \left(\frac{dC}{dV}\right)}$$

III.1.3. CARACTERISTIQUES I(V)

- Courants de saturation

Avec une sensibilité de mesure de courant suffisante, le tracé de la caractéristique I(V) en fonction de la température, en coordonnée semilogarithmique, permet de déceler les éventuels courants de fuite et de mettre en évidence différentes composantes du courant.

- Coefficient thermique

La mesure effectuée à haut courant donne par extrapolation à courant nul la tension d'avalanche V_a et sa variation avec les températures donne la valeur du coefficient thermique :

$$\beta = \left(\frac{\partial V_a}{\partial T} \right)_{I_0}$$

- Résistance thermique

La résistance thermique peut être évaluée en faisant des mesures $I(V)$ en continu et en impulsions à différentes températures. Si V_0 et I_0 représentent la tension et le courant à l'intersection de la caractéristique $I(V)$ en continu, à la température T_1 , et en impulsion à la température T_2 , la résistance thermique est :

$$R_{th} = \frac{T_2 - T_1}{V_0 I_0}$$

Remarque :

On peut également déduire la valeur de R_{th} à partir de la relation :

$$R_{th} = \frac{R_d - R_c}{\beta V_a}$$

où :

- R_d est la résistance différentielle totale obtenue à partir de la caractéristique $I(v)$ en continu
- R_c est la résistance de charge d'espace obtenu à partir de la caractéristique $I(v)$ en impulsions courtes.

III.1.4. MESURES D'IMPEDANCE

- Résistance de charge d'espace

Pour des fréquences suffisamment élevées, la résistance dynamique de la diode se réduit à la résistance de charge d'espace :

$$R_c = \frac{(W - \delta)^2}{2 \epsilon V_s k S}$$

$$\text{où } k = \frac{S_a}{S} \quad \begin{array}{l} S_a \text{ Surface en avalanche} \\ S \text{ surface totale} \end{array}$$

La courbe représentant la variation de R_c en fonction du courant de polarisation permet d'apprécier l'uniformité de l'avalanche. L'avalanche est uniforme lorsque R_c tend vers une valeur constante ($k = 1$).

- Impédance hyperfréquence.

L'évolution de l'impédance en fonction de la fréquence et pour différents courants de polarisation permet de prévoir si la diode peut osciller et à quelle fréquence. Pour des tensions de polarisation inférieures à la tension d'avalanche, cette mesure renseigne également sur la résistance série de la diode.

III.1.5. PUISSANCE ET RENDEMENT HYPERFREQUENCE

Pour le fonctionnement en oscillateur, la diode IMPATT doit être associée à un circuit hyperfréquence. Nous utilisons un circuit en guide d'onde, bande X. L'adaptation d'impédance est réalisée avec un jeu de "caps" de différents diamètres. L'accord parallèle est assuré par un court-circuit à piston mobile.

La mesure de puissance hyperfréquence est effectuée en régime continu (CW) à courants de polarisation variables. Nous en déduisons le rendement hyperfréquence :

$$\eta = \frac{P_{\text{hyper}}}{P_0}$$

III.2. DIODES GaAs EN STRUCTURE NORMALE

L'objet de la caractérisation n'est pas dans cette étude la recherche des performances mais plutôt d'obtenir le maximum d'informations sur la technologie mise en oeuvre et ses imperfections.

III.2.1. PARAMETRES TECHNOLOGIQUES

III.2.1.1. Résistance et résistivité de contact

Pour évaluer la résistance du contact, nous utilisons une échelle de résistance (Fig. 50). La résistivité de contact est déterminée à partir du modèle TLM ($L > 2\left(\frac{\rho_B}{\rho_C}\right)^{1/2}$ [29]).

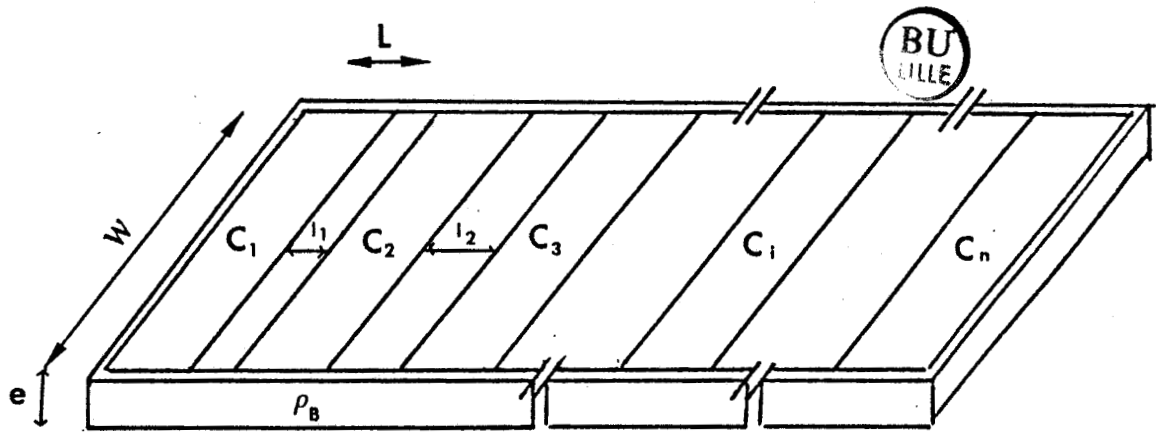


Fig.50 - Echelle de résistance

$$\left. \begin{aligned}
 R_c &= \frac{1}{2} R_{C_1 C_2} - \rho_B \frac{l_1}{eW} \\
 \text{(2 contacts)} & \\
 R_c &= \frac{R_{C_2 C_3} l_1 - R_{C_1 C_2} l_2}{2(l_1 - l_2)} \\
 \text{(3 contacts)} &
 \end{aligned} \right\} \rho_c = \frac{e}{\rho_B} R_c^2 W^2$$

$$R_c \text{ (extrapolation)} = R_{c_i c_{i+1}} (l_i) \Big|_{l_i=0}$$

$$\rho_c = R_c^2 W R'_{c_i c_{i+1}} (l_i)$$

* Résultats expérimentaux.

Nous donnons dans le tableau II [30] quelques résultats de R_c et de ρ_c obtenus au laboratoire sur différentes couches épitaxiées.

TABLEAU II

Matériaux	$N_D (Dt/cm^3)$	$e (\mu m)$	$R_c (\Omega) W = 250 \mu m$	$\rho_c (\Omega cm^2)$
THOMSON P 911 A	$1,5 \cdot 10^{17}$	0,2	1,6 (extrapolation)	$3 \cdot 10^{-6}$
THOMSON 20236	$1,2 \cdot 10^{17}$	0,4	0,55 (extrapolation)	$5 \cdot 10^{-7}$
LEP 1164	$1,5 \cdot 10^{17}$	0,7	~ 1 (2 contacts)	~ 10^{-6}

On peut noter que pour un dopage de l'ordre de $1,5 \cdot 10^{17}$ at/cm³, les valeurs typiques de ρ_c se situent entre quelque 10^{-6} et quelque $10^{-7} \Omega cm^2$. Les valeurs sont tout à fait comparables aux meilleures valeurs publiées dans la littérature [30], [32].

III.2.1.2. Hauteur de barrière

Pour déterminer la hauteur de barrière, deux exemples d'exploitation des caractéristiques I(V) et C(V) sont donnés sur les figures 51 et 52. Les mesures à faible courant sont effectuées sur un banc I(V) automatique. Les mesures C(V) sont effectuées à l'analyseur de réseau à la fréquence de 100 ou 500 MHz.

L'ensemble des résultats pour différentes séries de diodes est rassemblé dans le Tableau III. Les conditions de réalisation de la barrière y sont également mentionnées.

On peut remarquer que pour les séries CHS.G1D, CHS.G2D et CHS.G3D, les hauteurs de barrière restent faibles. Ceci est probablement dû à une température de recuit trop élevée. Pour la série CHS.G4D dont la température de recuit est plus faible, la hauteur de barrière est égale à 0,8 eV, valeur habituellement obtenue pour le titane. Les meilleurs résultats sont toutefois obtenus avec une barrière de platine ($0,85 \text{ V} \leq \phi_{Bn} < 0,93 \text{ V}$, $n \sim 1,1$) pour les séries CHS.G5D et CHS.G6D.

A noter que les hauteurs de barrière ainsi obtenues ($0,80 \text{ V} < \phi_{Bn} < 0,9 \text{ V}$) sont excellentes et comparables à celles habituellement rencontrées dans la littérature (Tableau III).

EXPLOITATION DE LA PARTIE LIN.

T= 300 K S= 8000 μm^2

V_{min}= .500 V

V_{max}= .700 V

Correlation dans la partie lin.

$\sigma^2 = .99989$ (sur 50 Pts)

Cour. Lim. I_{iso}= 6.1153E-002 pA

Fact. Qual. n= 1.2262E+000

Tens. Bar. $\phi_{Bn} = .899 \text{ V}$

(eta * V_b) n* $\phi_{Bn} = 1.102 \text{ V}$

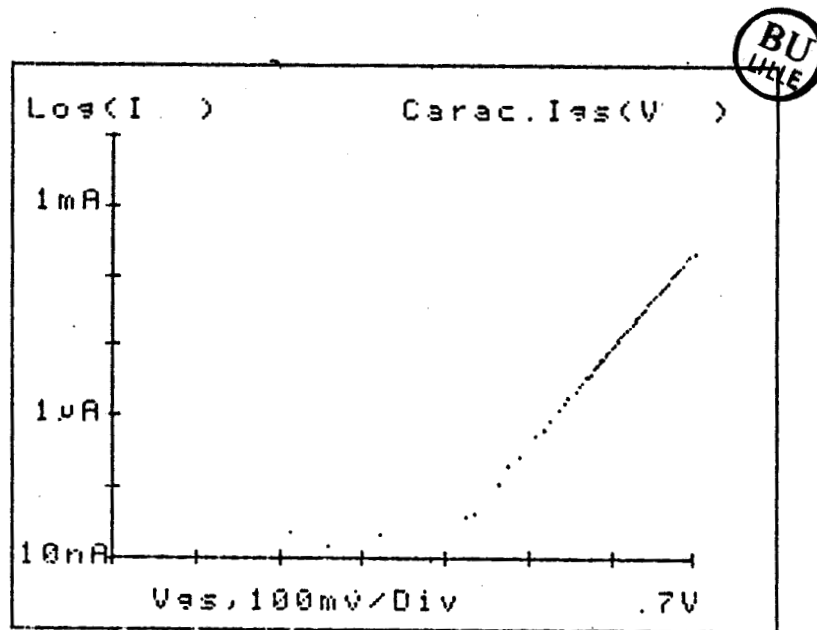


Fig.51 - Exploitation de la caractéristique I(v)

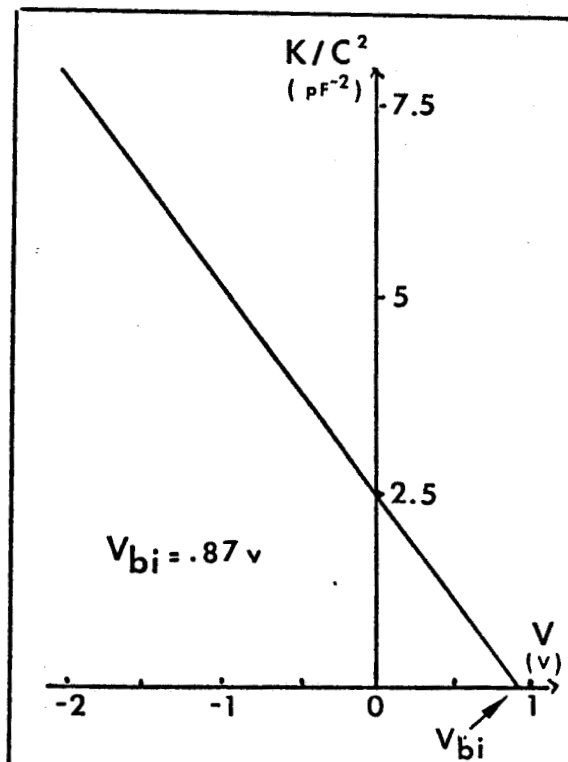


Fig.52 - Exploitation de la caractéristique C(v)

TABLEAU III



Série/Référence	Métal	T° recuit (°C)	I (v)		C (V)
			$\emptyset_{Bn}(V)$	n	$\emptyset_{Bn}(V)$
CHS.G1D	Ti	460	0,70	1,11	0,73
CHS.G2D	Ti	460	0,71	1,12	0,71
CHS.G3D	Ti	460	0,70	1,08	0,74
CHS.G4D	Ti	300	0,80	1,13	0,82
CHS.G5D	Pt	400	0,89 < 0,93	1,10	0,90
CHS.G6D	Pt	400	0,85	1,19	-
[25]	Pt		0,86		0,94
	Au		0,90		0,95
	Be		0,81		0,82
	Ag		0,88		0,93
	Cu		0,82		0,87
	Al		0,80		0,80

III.2.2. STRUCTURES SEMICONDUCTRICES

Dans un premier temps, nous procédons à l'étude expérimentale de différentes séries de diodes en structure normale essentiellement sur les paramètres les plus caractéristiques tels que le courant de fuite, l'uniformité de l'avalanche, les résistances série et thermique. Dans un deuxième temps, nous présentons les structures semiconductrices de la série la plus représentative pour la bande X.

III.2.2.1. Courants de saturation

Pour les séries CHS.G4D et CHS.G5D, à hauteur de barrière élevée, les mesures à faible courant inverse en fonction de la température à des tensions inférieures à 60 v (limite de l'appareil) montrent que (Fig. 53) :

- à température ambiante, les courants de saturation mesurés sont inférieurs au courant de fuite de l'appareil ($I_S < 10^{-8}$ A). Les valeurs théoriques, tenant compte des effets Schottky et Tunnel (IIIème partie) sont de l'ordre du picoampère,

- à 150°C, ces courants sont de 10^{-7} A environ. Les écarts observés avec les tracés théoriques peuvent provenir de la présence d'un courant de fuite, pas nécessairement superficiel (courant de génération-recombinaison).

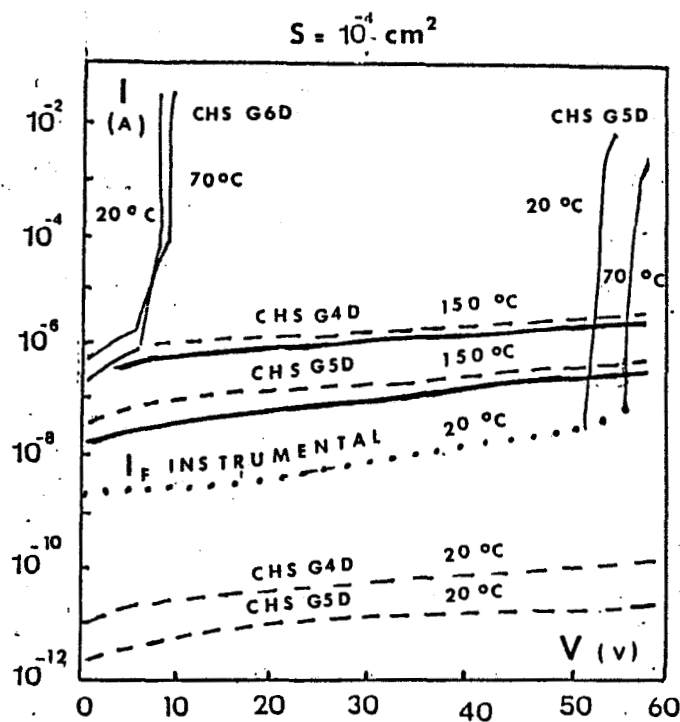


Fig.53 - Caractéristiques $I(v)$ pour différentes séries
(---) : théorie ; (—) expérience

Pour la série CHS.G6D dont l'épitaxie est de type LHL à structure submicronique ($W_2 < 1 \mu\text{m}$) les courants de saturation, surtout tunnel, sont importants et sont dus à un dopage trop étalé et trop élevé du pic (Fig. 54).

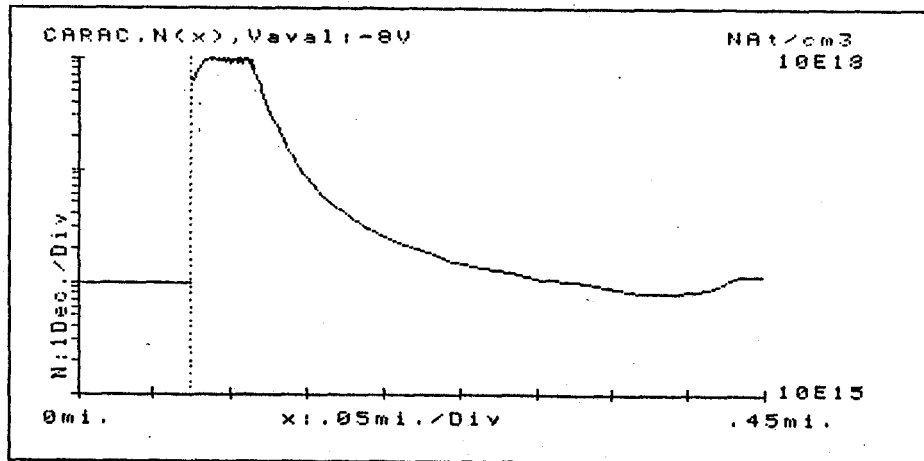


Fig.54 - Profil de dopage pour la série CHS.G6D

III.2.2.2. Tension d'avalanche

Les relevés de V_a pour différentes séries de diodes sont rassemblés dans le tableau IV :

TABLEAU IV

Séries	CHS.G1D	CHS.G2D	CHS.G3D	CHS.G4D	CHS.G5D	CHS.G6D
gravure	20°C	20°C	20°C	20°C	50°C	50°C
V_a (V)	10	80	80	45	53	8
V_a (V) théorique	13	110	110	90	55	9

On constate pour les séries CHS.G1D, CHS.G2D, CHS.G3D et CHS.G4D que les tensions V_a sont nettement inférieures aux valeurs théoriques. Ceci est dû comme nous l'avons signalé en début de la II^e Partie aux claquages périphériques résultant d'un profil non homogène du mesa. Par contre, pour les séries CHS.G5D et CHS.G6D pour lesquelles les valeurs expérimentales sont proches des valeurs théoriques, on peut déduire que les claquages sont plus uniformes.

III.2.2.3. Résistance thermique

Nous avons tenté de mesurer la résistance thermique (Tableau V) par extrapolation de la caractéristique $I(V)$ en continu à 20°C pour les séries CHS.G4D et CHS.G5D. Cette extrapolation est nécessaire car ces diodes présentent un claquage destructif à des puissances relativement faibles (300 à 700 mW).

TABLEAU V

Séries	CHS.G4D	CHS.G5D	CHS.G6D
S(cm ⁻²)	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴
Rth(°C/W)	92	102	95
Rth(°C/W) max calculée	~ 1 2 0		

Comme on s'y attendait, les résistances thermiques sont élevées, compte tenu des épaisseurs importantes du substrat et de la faible conductivité thermique du GaAs (N⁺). Toutefois, ces valeurs ne permettent pas d'attribuer les claquages destructifs à des effets thermiques mais plutôt à un effet de champ à la transition N N⁺. On note en effet qu'à part les séries CHS.G4D et CHS.G6D qui présentent une meilleure tenue en courant inverse, toutes les autres séries présentent une structure assez fortement confinée (Tableau VI).

TABLEAU VI

	CHS.G1D	CHS.G2D	CHS.G3D
E (x)			
	CHS.G4D	CHS.G5D	CHS.G6D
E (x)			

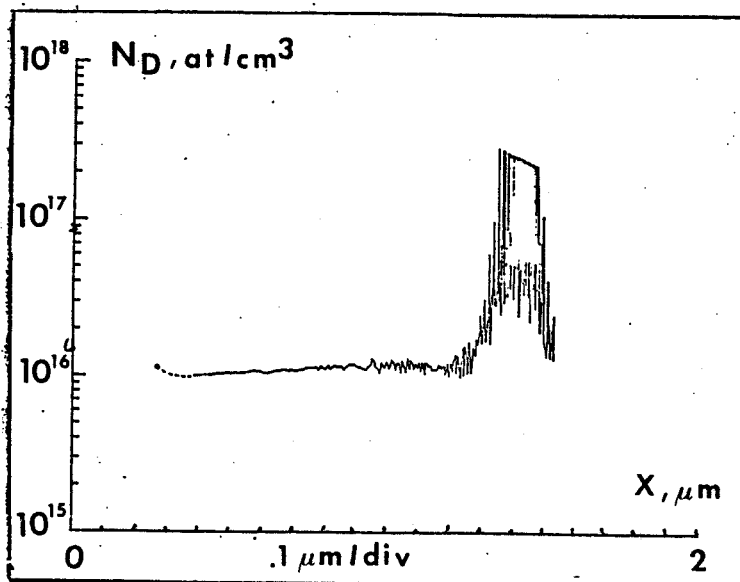
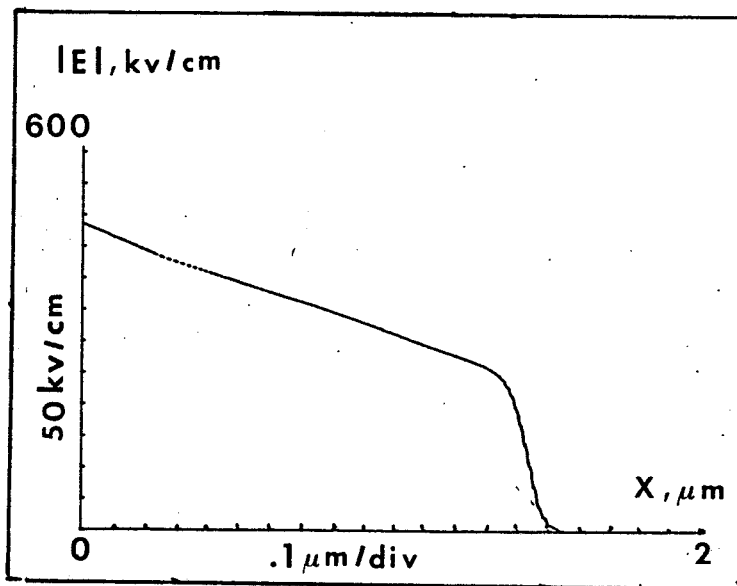
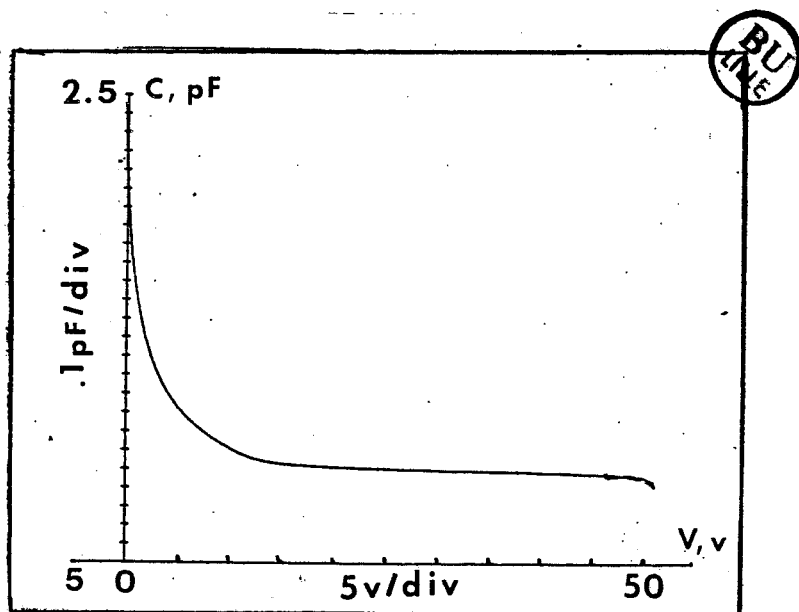
III.2.2.4. Résistance série

Les mesures de R_s avant l'avalanche donnent respectivement des valeurs de 1Ω pour les séries CHS.G1D, G2D, G3D, G4D, G5D et 1,2 Ω pour la série CHS.G6D. Compte tenu de l'épaisseur du substrat (200 à 300 μm), ceci confirme une excellente qualité de contacts ohmiques.

III.2.2.5. Mesure hyperfréquence

Seules les séries CHS.G5D et CHS.G6D présentant un claquage uniforme sont susceptibles de donner des résultats significatifs en hyperfréquence : nous présentons plus particulièrement la caractérisation hyperfréquence de la série CHS.G5D dont le domaine de travail se situe en bande X.

SERIE CHS.G5D



La figure 55 donne l'évolution de la résistance dynamique entre 2 et 18 GHz pour deux valeurs de courant de polarisation 1 et 5,5 mA.

On constate pour cette série un phénomène de résonance à la fréquence de 10,76 GHz pour un courant de 5,5 mA : la diode présente donc à cette fréquence une résistance négative externe et est susceptible de fournir de l'énergie hyperfréquence.

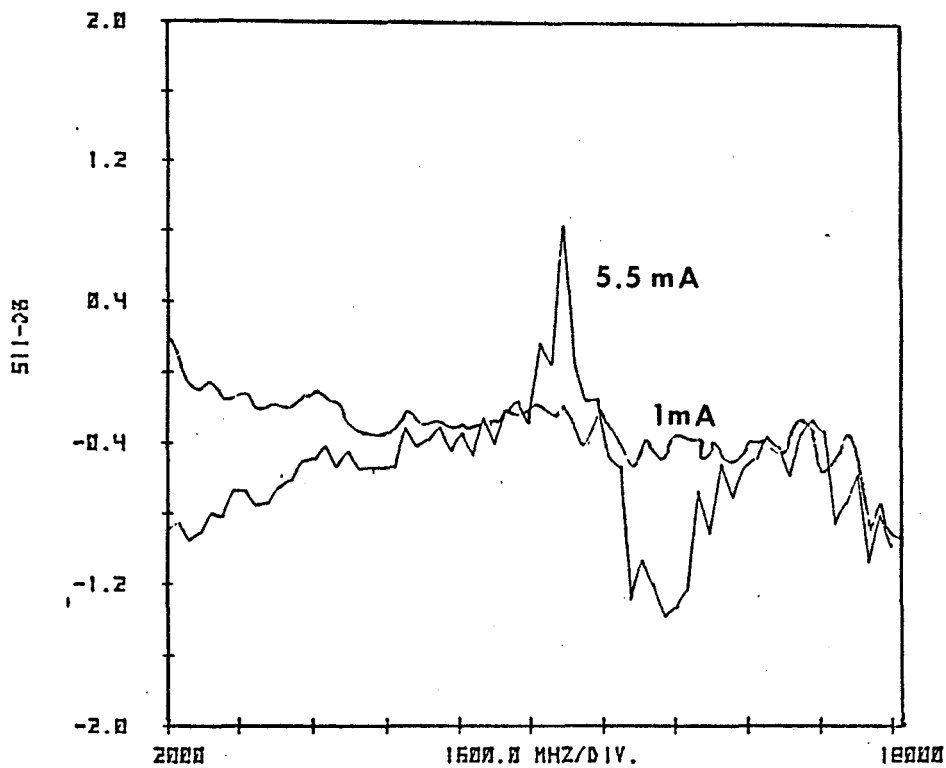


Fig.55 - Evolution de la résistance dynamique en fonction de la fréquence

CONCLUSION

Cette première démarche nous a permis de mettre au point la technologie des contacts ohmiques, Schottky et des gravures Mesa sur Arséniure de Gallium.

Les caractérisations fréquentielles des composants réalisés ont mis en évidence l'existence d'une résistance négative. Mais les claquages destructifs à faible niveau ne nous ont pas permis d'obtenir de la puissance hyperfréquence.

Nous allons voir que la réalisation de diodes en structure inversée sur de bonnes épitaxies permet de s'affranchir de ces problèmes et d'aboutir à des résultats plus intéressants.

III.3. DIODES GaAs EN STRUCTURE INVERSEE

Les épitaxies provenant des Laboratoires de THOMSON CORBEVILLE nous ont permis de réaliser différentes séries de diodes en structure inversée.

La première série CHS.G1I a présenté un défaut d'accrochage entre les couches métalliques barrière-radiateur et seules les caractéristiques directes ainsi que les résistances séries des diodes encapsulées ont pu être mesurées. Par contre, la série CHS.G2I réalisée sur le même matériau (R.7893) nous a permis une caractérisation plus complète. La série CHS.G3I réalisée à partir d'une couche "d'essai" a été caractérisée dans le but de confirmer l'efficacité de la technologie retenue.

III.3.1. HAUTEUR DE BARRIERE

Pour les séries CHS.G1I et CHS.G2I d'une part et CHS.G3I d'autre part, nous obtenons respectivement pour des barrières de Pt des hauteurs de 0,8 V et 0,9 V et des facteurs d'idéalité de 1,3 et 1,1 (Tableau VII).

Ces différences 0,8 V et 0,9 V proviennent probablement des niveaux de dopage différents en surface. On note que la qualité des barrières réalisées est excellente et confirme les résultats obtenus lors de l'étude précédente.

TABLEAU VII

Série	Barrière	I (V)	
		$\phi_{Bn}(V)$	n
CHS.G1I	Pt	0,80	1,3
CHS.G2I	Pt	0,80	1,3
CHS.G3I	Pt	0,90	1,1

III.3.2. CARACTERISTIQUES C(V), E(x), N (x)

La variation de la capacité avec la tension inverse ainsi que les profils de champ électrique et de dopage les plus typiques sont représentés sur les figures 56 à 61. Les valeurs caractéristiques du profil de dopage sont relevées dans le tableau VIII.

Pour la série CHS.G2I, les caractéristiques $N_D(x)$ obtenues expérimentalement à partir des mesures de C(V) ne permettent pas de situer le pic de dopage "high" et le dopage d'entrée. A noter que le dopage en tête doit être plus élevé que prévu : ceci pourrait provenir d'une désoxydation trop poussée de la surface.

Pour la série CHS.G3I le profil du pic a été bien mis en évidence. On peut constater que cette couche "d'essai" présente une structure courte et un pic de dopage fort étalé.

TABLEAU VIII

Profil du dopage		CHS.G2I	CHS.G3I
- dopage "Low" (en surface)	N_{1LOW}	$qq \cdot 10^{16} \text{ at/cm}^3$	$< 10^{16} \text{ at/cm}^3$
- profondeur du pic	δ	1000 \AA	1500 \AA
- dopage "High" (pic)	N_{HIGH}	$qq \cdot 10^{17} \text{ at/cm}^3$	$8 \cdot 10^7 \text{ at/cm}^3$
- dopage "Low" (transit)	N_{2LOW}	$\sim 10^{16} \text{ at/cm}^3$	$2 \cdot 10^{16} \text{ at/cm}^3$

SERIE CHS.G2I

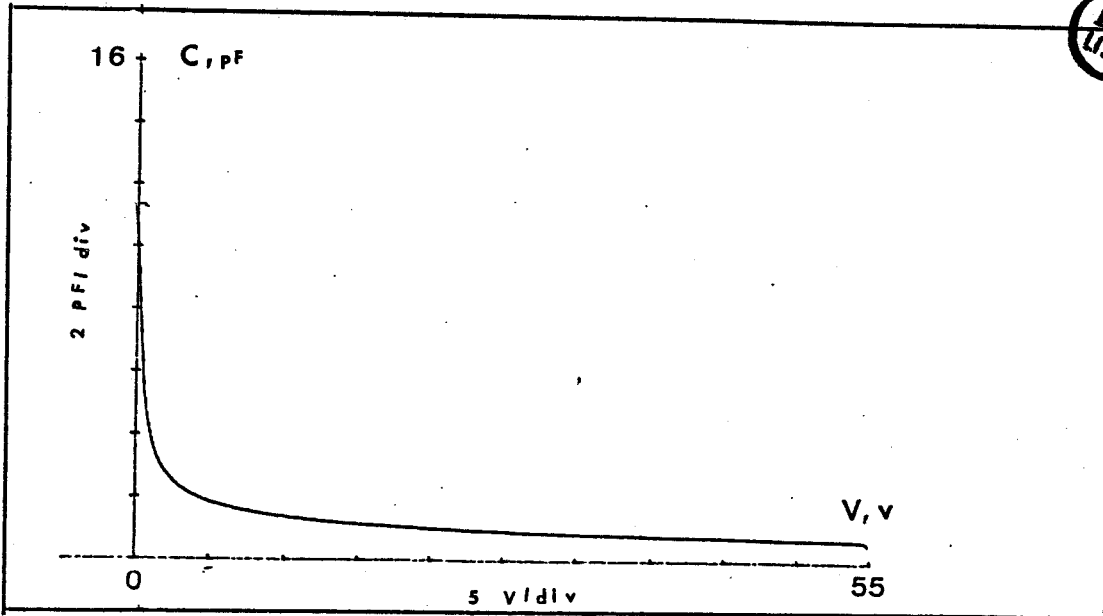


Fig.56

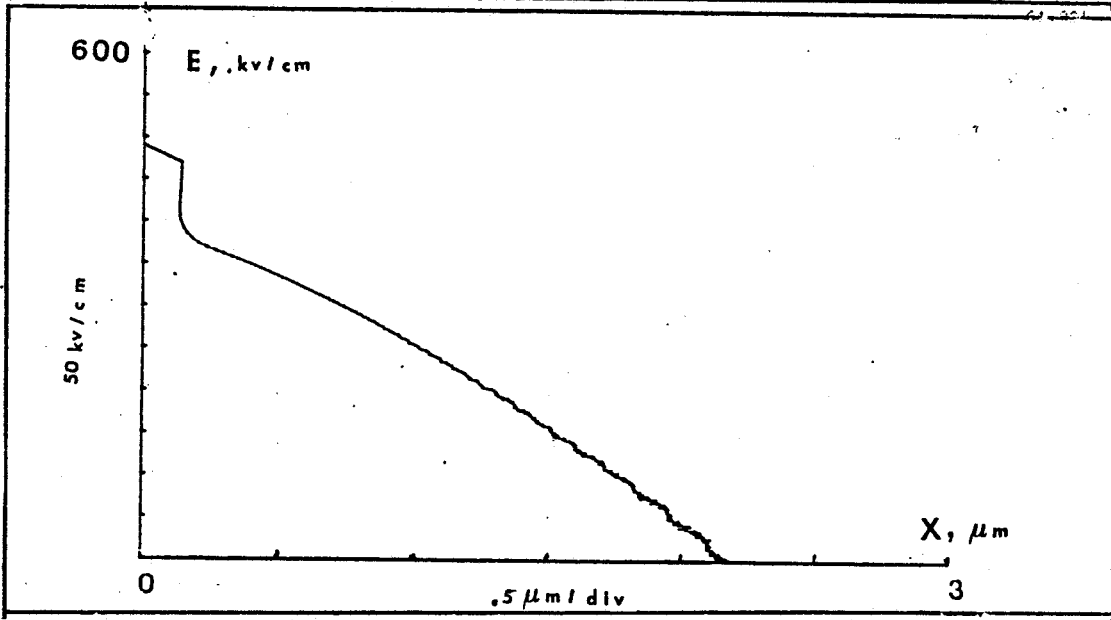


Fig.57

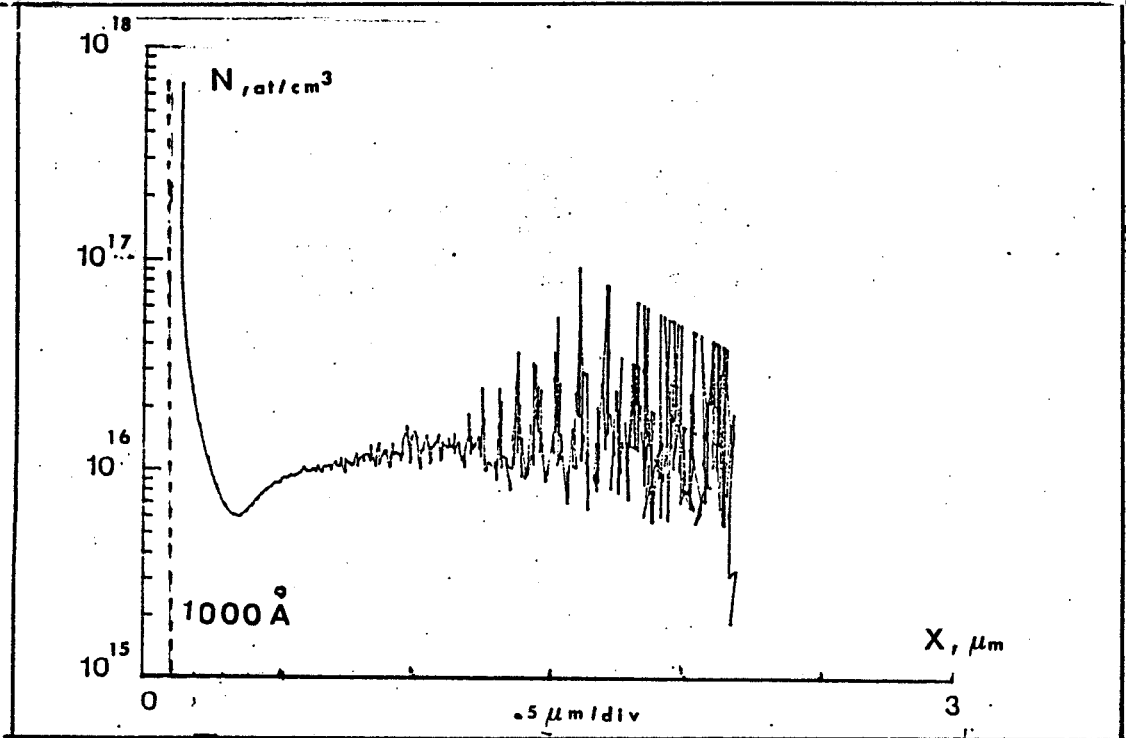


Fig.58

SERIE CHS.G3I

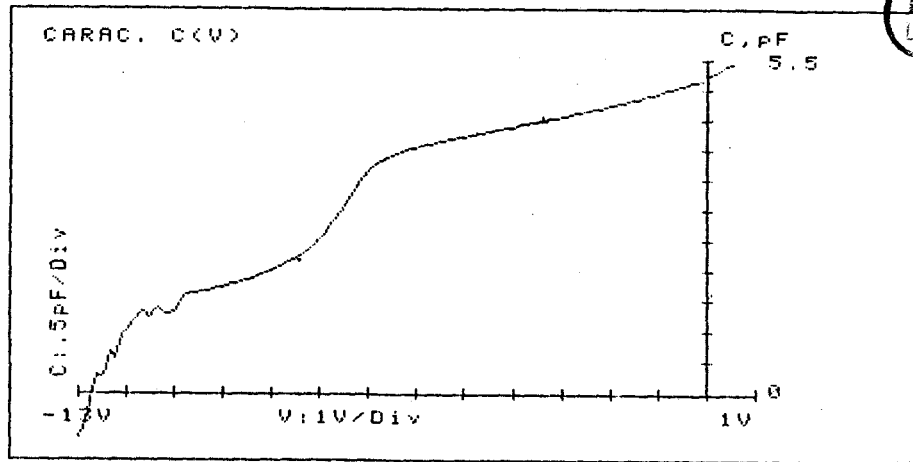


Fig.59

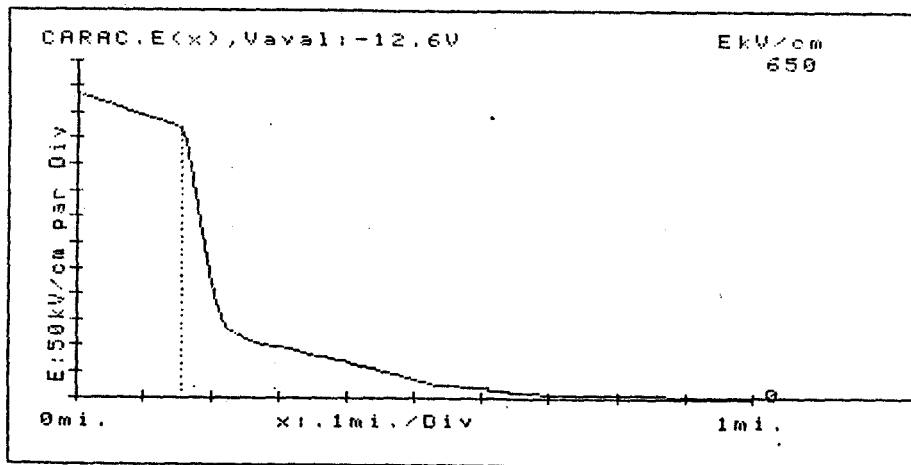


Fig.60

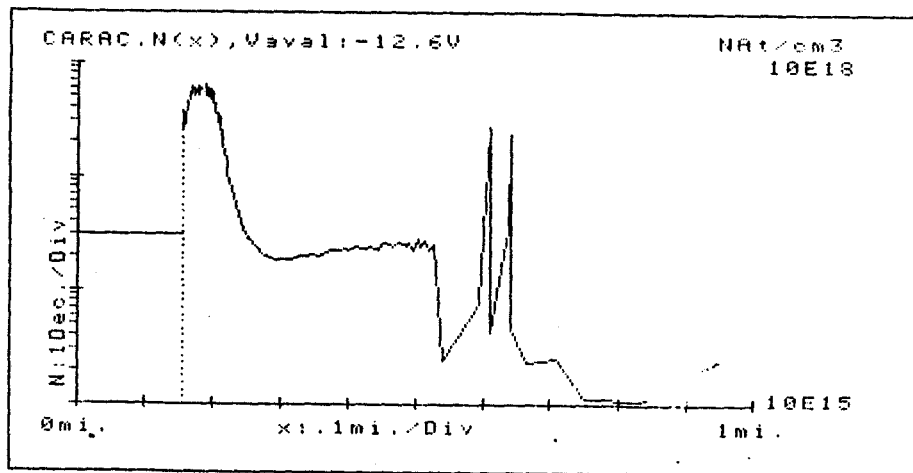


Fig.61

III.3.3. CARACTERISTIQUES I(V) A DIFFERENTES TEMPERATURES

Les tracés du courant avec la tension inverse à température ambiante sont donnés à la figure 62 pour deux évolutions extrêmes I(v) de chacune des deux séries CHS.G2I et CHS.G3I.

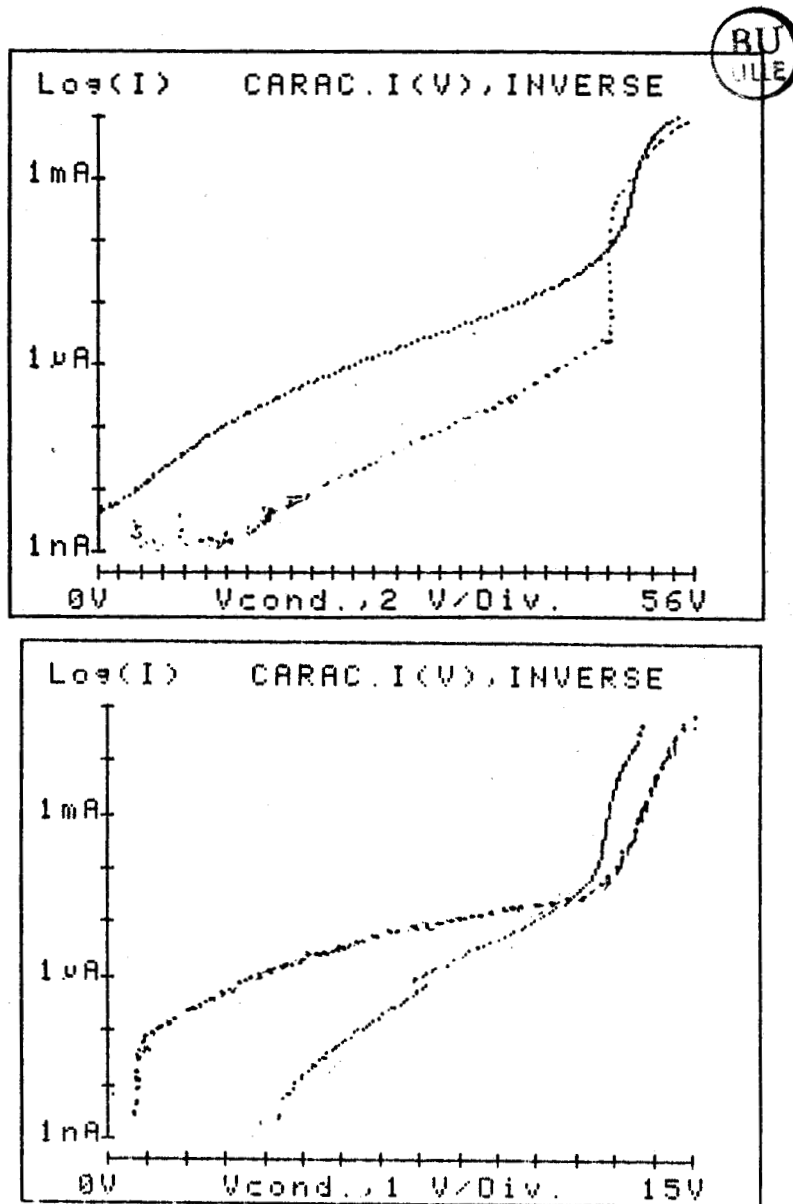


Fig.62 - Caractéristiques I(V) pour deux évolutions extrêmes des séries CHS.G2I et CHS.G3I

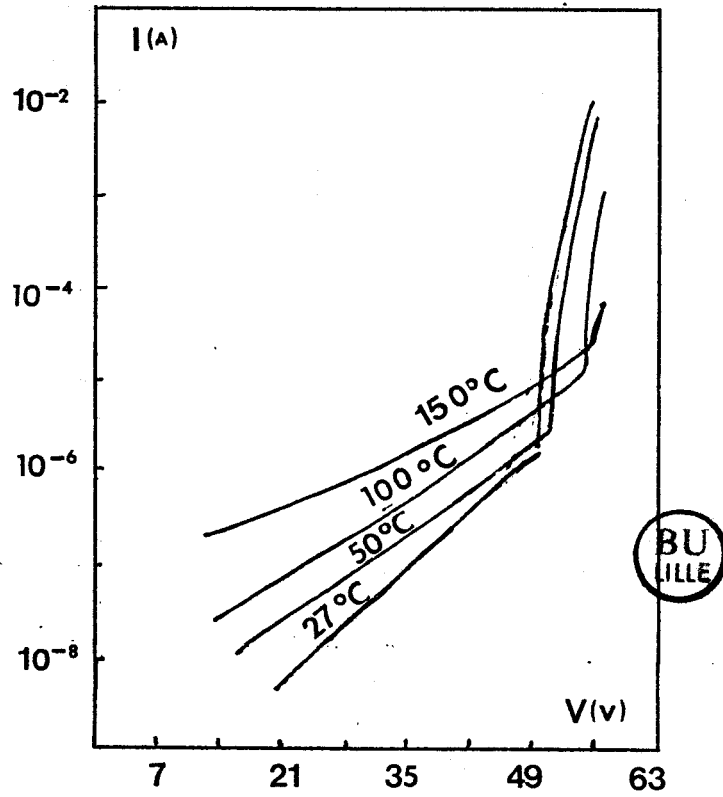


Fig.63 - Caractéristique $I(v)$ en fonction de la température pour la série CHS.G2I

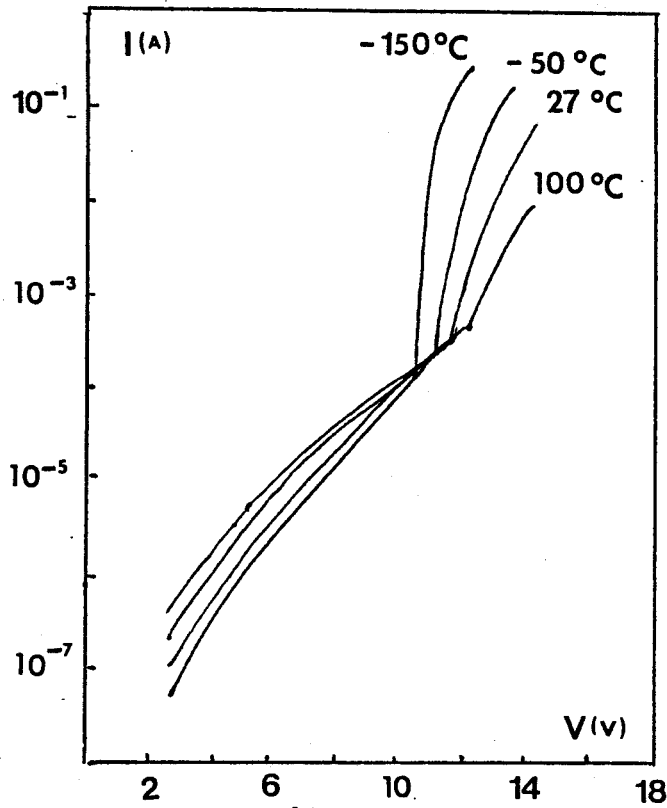


Fig.64 - Caractéristique $I(v)$ en fonction de la température pour la série CHS.G3I

L'étude en fonction de la température est représentée sur les figures 63 et 64. A partir de ces courbes, on peut distinguer :

- pour la série CHS.G2I un courant de saturation inférieur à 10^{-6} A (300°K) et un courant d'avalanche à partir de 46 V (300 °K),
- pour la série CHS.G3I, un courant purement tunnel jusqu'à 10^{-4} A, puis un courant d'avalanche à partir de 10 V (300°K).

III.3.4. RESISTANCE DE CHARGE D'ESPACE

Les résistances de charges d'espace obtenues à partir des mesures $R_d(f)$ sont représentées à la figure 65 pour la série CHS.G2I.

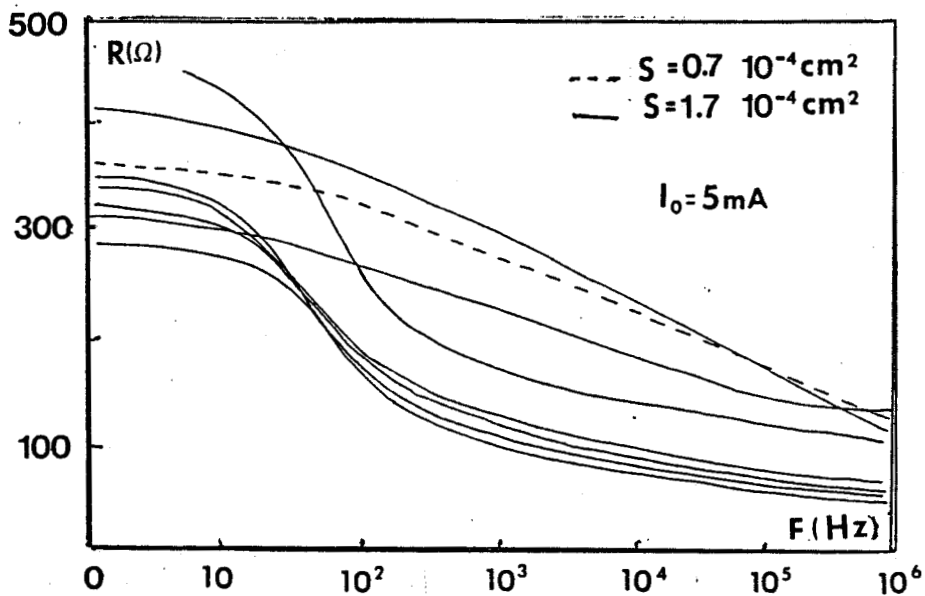


Fig.65 - Tracés $R_d(f)$ pour différentes diodes

Leurs évolutions avec le courant de polarisation à la fréquence de 100 MHz sont illustrées sur les figures 66 et 67 pour les deux séries.

On peut noter que l'avalanche devient uniforme à partir d'un courant de 10 mA pour la série CHS.G2I. Par contre, pour la série CHS.G3I, l'uniformité de l'avalanche n'est observée qu'au-delà d'un courant de 80mA.

Les valeurs de R_C pour différentes surfaces et différentes séries sont données Tableau IX.

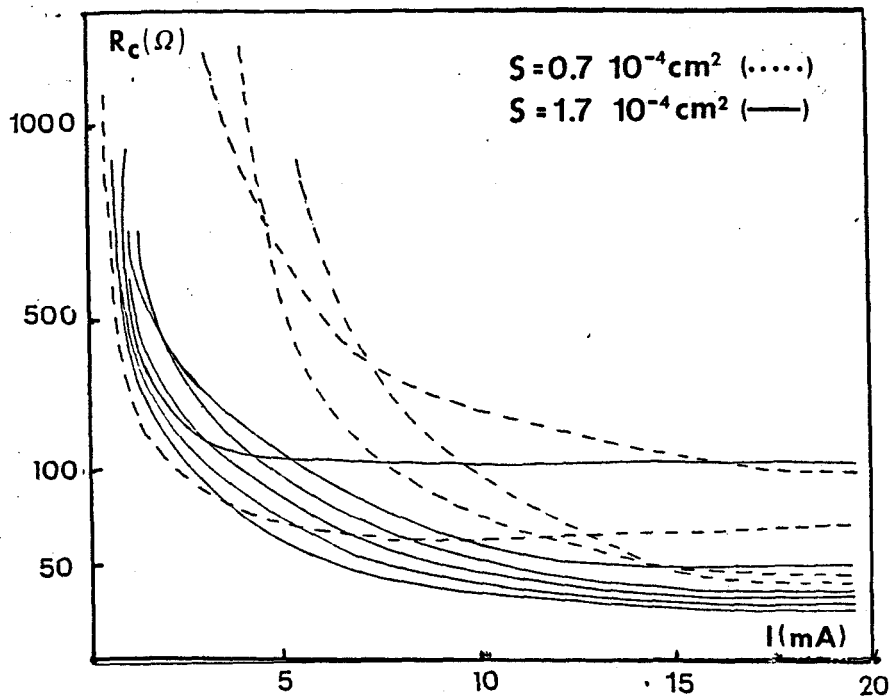


Fig.66 - Courbes $R_C(I_0)$ pour différentes diodes de la série CHS.G2I

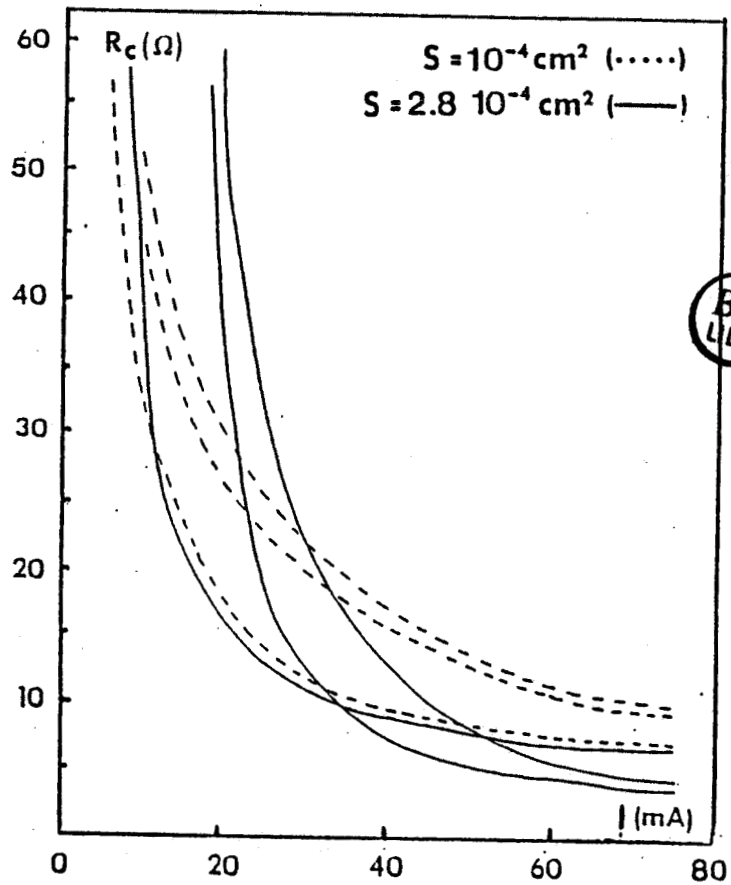


Fig.67 - Courbes $R_c(I_0)$ pour différentes diodes de la série CHS.G3I

TABLEAU IX

Série	CHS.G2I		CHS.G3I	
	$S(\mu\text{m}^2)$	6500	17.000	10.000
$I_0(\text{mA})$	20	20	80	80
$R_c(\Omega)$	105	40	15	5

III.3.5. COEFFICIENT THERMIQUE, RESISTANCE THERMIQUE

Les variations de la tension d'avalanche avec les températures pour différentes séries sont reportées sur les figures 68. Les coefficients thermiques sont groupés dans le tableau X.

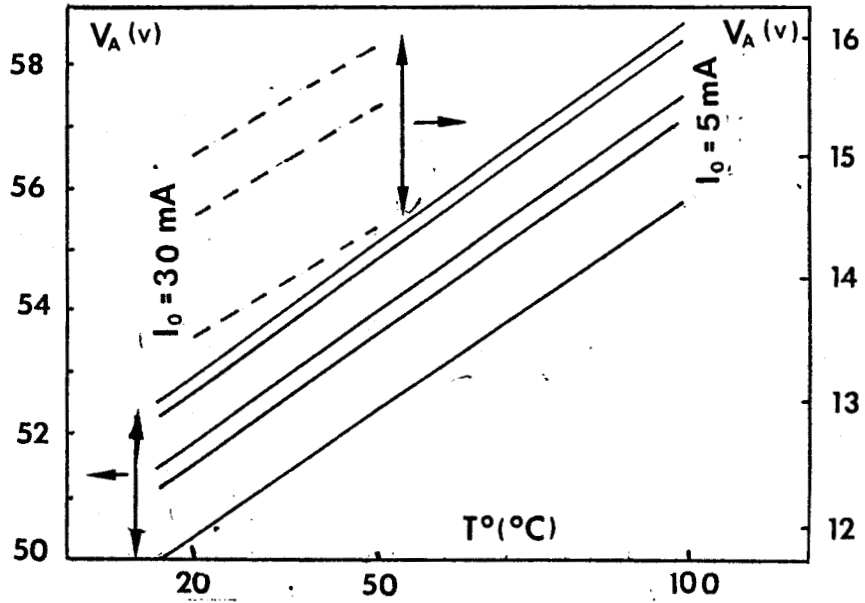


Fig.68 - Coefficients thermiques pour les deux séries

TABLEAU X

Série	CHS.G2I	CHS.G3I
β (m V/°C)	70	30

Nous donnons dans le tableau XI les valeurs des résistances thermiques obtenues à partir des mesures I(V) (Fig. 69 et 70) ou calculées à partir de la relation $\frac{R_d - R_c}{\beta V_a}$.

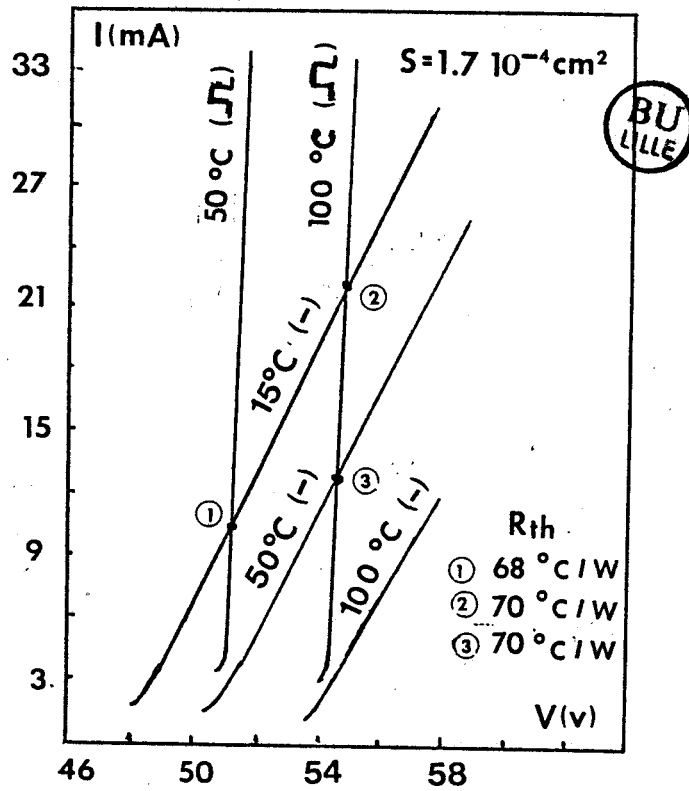


Fig.69 - Résistance thermique de la série CHS.G2I

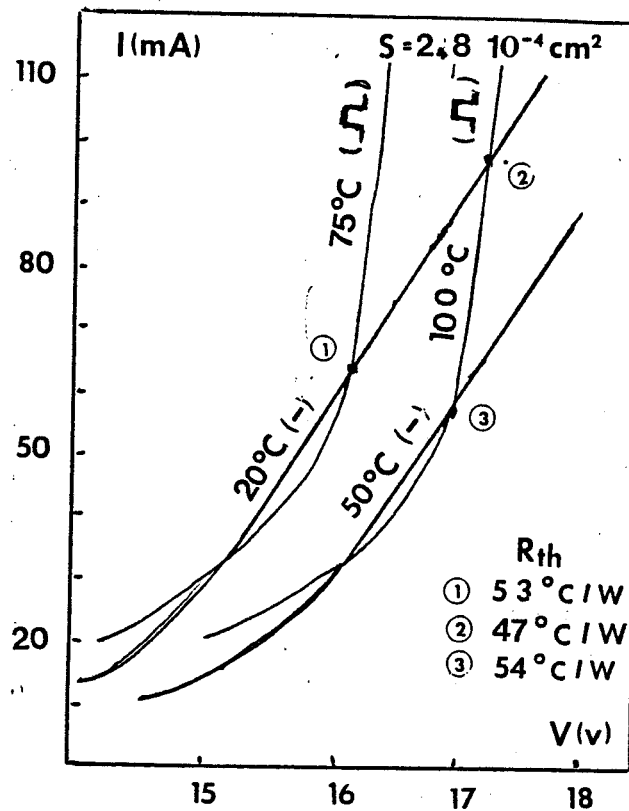


Fig.70 - Résistance thermique de la série CHS.G3I

TABLEAU XI

Série	CHS.G2I		CHS.G3I	
S(μm ²)	6500	17000	10000	28000
R _{th} (°C/W)	80 ≤ ≤100	60 ≤ ≤80	70	54
R _{th} (°C/W) calculée	48	31	40	21

Les valeurs obtenues pour les résistances thermiques sont encore élevées par rapport aux valeurs calculées. Ceci pourrait provenir de la mauvaise soudure radiateur-pilier du boîtier à l'aide d'une préforme AuSn de forte épaisseur ou de la colle conductrice à l'argent.

On peut espérer diminuer de manière notable cette résistance en utilisant un radiateur diamant de faible épaisseur (conductivité thermique élevée), en amincissant encore plus le substrat (épaisseur finale < 20 μm) et en améliorant le montage du composant dans le boîtier (soudure directe radiateur-pilier, avec de larges rubans d'or pour le contact supérieur).

III.3.6. RESISTANCE SERIE

Les mesures de la résistance série en fonction de la fréquence et de la tension inverse sont illustrées sur les figures 71.

Les valeurs de R_s sont respectivement de 1Ω pour la série CHS.G1I et - 0,65 Ω pour la série CHS.G2I.

Remarque : Les résistivités de contact du couple Pt-GaAs déduites de ces mesures sont de l'ordre de $10^{-5} \Omega \text{cm}^2$: le contact ohmique ainsi réalisé est donc de bonne qualité.

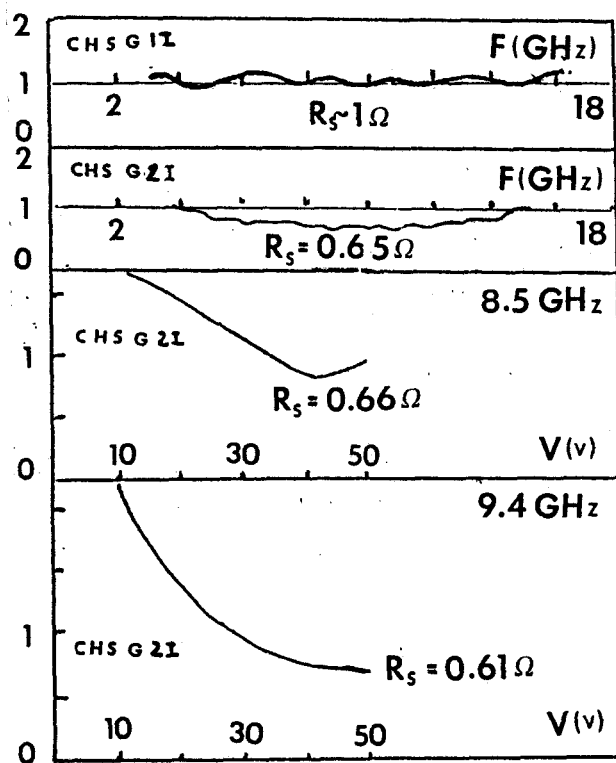


Fig.71 - Variations de la résistance série en fonction de la fréquence et de la tension appliquée pour les séries CHS.G1I, et CHS.G2I

III.3.7. IMPEDANCE HYPERFREQUENCE

Sur les figures 72 et 73 sont représentées les évolutions de l'impédance hyperfréquence en fonction de la fréquence de 2 à 18 GHz pour un courant de 20 mA pour la série CHS.G2I (Fig. 72) et 150 mA pour la série CHS.G3I (Fig. 73).

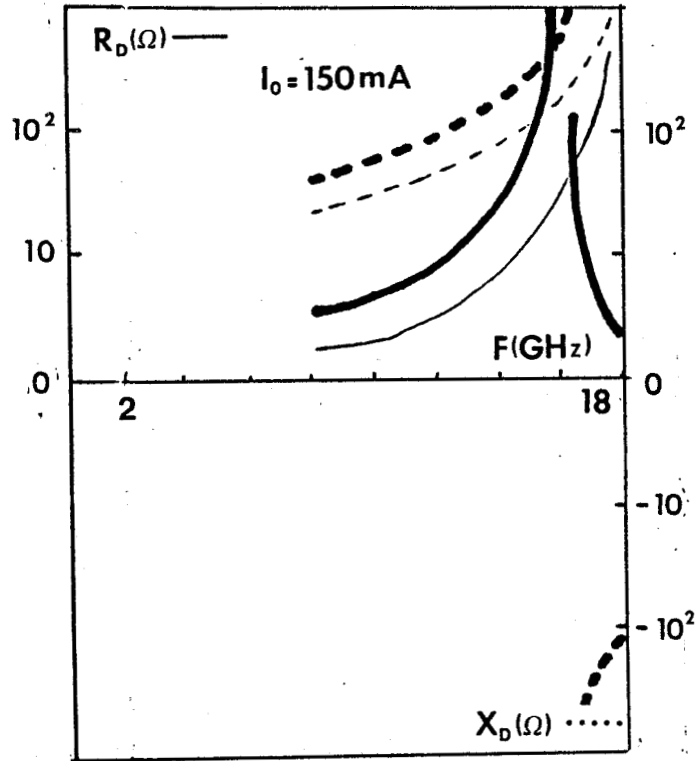


Fig.72 - Impédance hyperfréquence de la série CHS.G3I

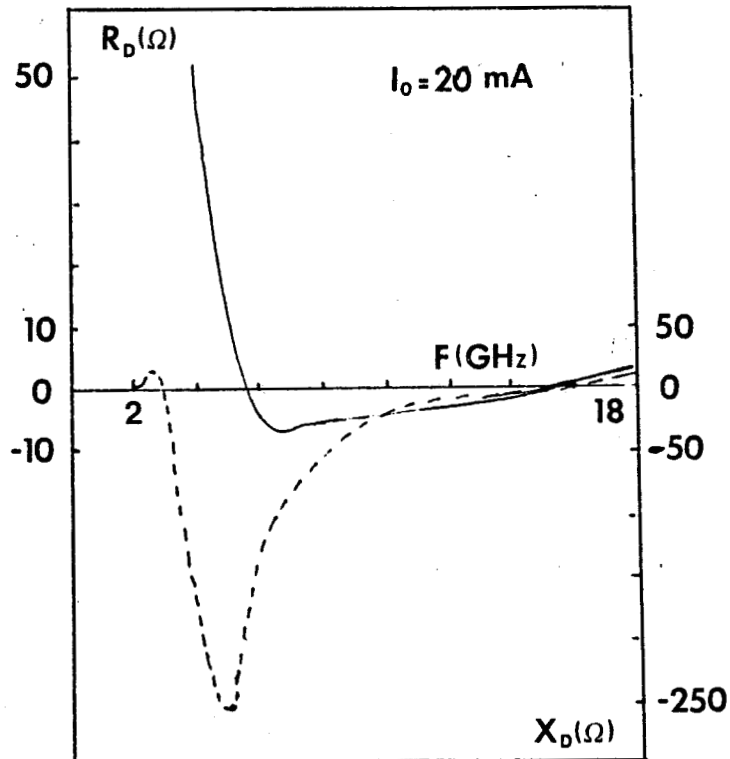


Fig.73 - Impédance hyperfréquence de la série CHS.G2I

Comme on pouvait le prévoir la fréquence d'oscillation pour la série CHS.G3I se situe au-delà de 18 GHz. Par contre, pour la série CHS.G2I, on constate la présence d'une résistance dynamique négative en bande X.

III.3.8. PUISSANCE ET RENDEMENT HYPERFREQUENCES

Les diodes de la série CHS.G2I oscillent autour de 9 GHz (Fig. 74 et 75) pour des courants I_{start} assez faibles (Tableau XII).

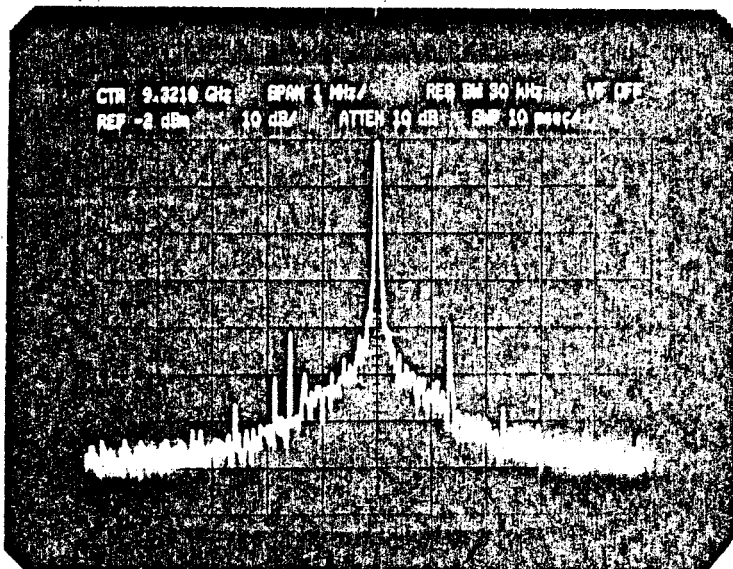
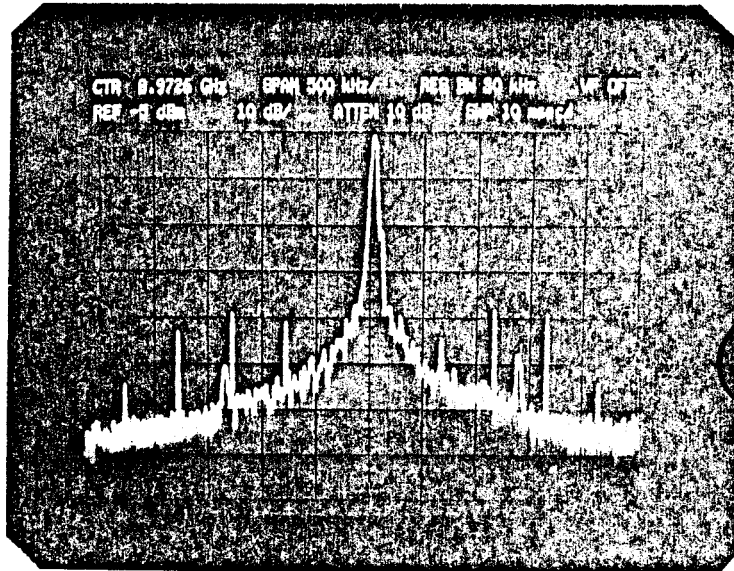


TABLEAU XII

Série	CHS.G2I	
S(μm^2)	6500	17000
I _{start} (mA)	5,1	6,4



Les évolutions de la puissance et du rendement hyperfréquences en fonction de la puissance continue appliquée sont représentées sur la figure 76.

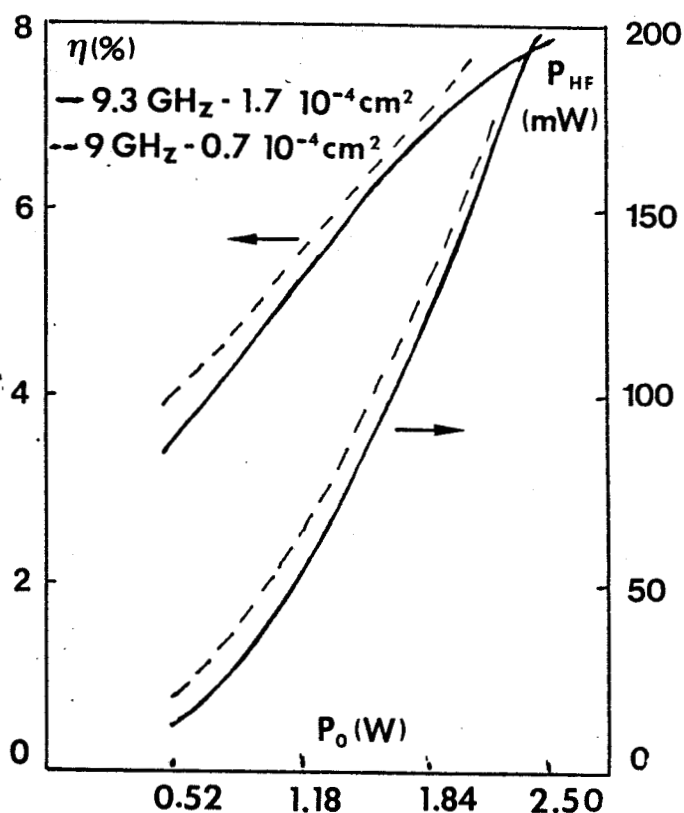


Fig.76 - Evolution de la puissance et du rendement hyperfréquences en fonction de la puissance continue appliquée pour deux diodes représentatives

On constate que la puissance et le rendement hyperfréquences augmentent de façon monotone avec la puissance continue appliquée. Les rendements obtenus sont de l'ordre de 8% à 9 GHz pour une puissance utile de 200 mW.

A noter que ces mesures sont effectuées sans refroidissement extérieur (air, eau ...) et que les limitations dues aux effets thermiques ne permettent pas d'atteindre les performances maximales.

CONCLUSION

Les diverses méthodes de caractérisation mises en oeuvre dans cette partie et les nombreuses mesures effectuées ont permis d'une part de confirmer la validité de nos choix technologiques et d'autre part de comparer nos résultats aux valeurs de référence publiées dans la littérature.

Les résistivités de contact, les caractéristiques de barrière Schottky supportent la comparaison avec les données actuellement admises.

Par contre les études dynamiques, bien que confirmant notre maîtrise de la technologie, donnent des résultats relativement modestes par rapport aux composants industriels.

Mais il faut noter que les quelques épitaxies dont nous disposions n'étaient pas optimales pour espérer obtenir des performances maximales en bande X.

IV ème PARTIE

IV.1. TECHNOLOGIE DES DIODES IMPATT A HETEROSTRUCTURE

$\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$ EN STRUCTURE MESA NORMALE

IV.2. TECHNOLOGIE DES DIODES IMPATT A HETEROSTRUCTURE

$\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$ EN STRUCTURE MESA INVERSEE.....

INTRODUCTION

La structure $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}/\text{InP}$ est, comme nous l'avons vu dans la première partie, intéressante pour les applications en ondes centimétriques et surtout en ondes millimétriques.

Mais la filière GaInAs/InP pose des problèmes spécifiques. L'existence d'une barrière de surface pour l' InP ($d_{\text{Bn}} = 0,48 \text{ V}$ et $\phi_{\text{Bp}} 0,75 \text{ V}$) [33] ne permet pas l'emploi d'une barrière sur InP (N) (Structure InP (N)/ GaInAs (N)/ InP (N)) et rend difficile la réalisation de bons contacts sur InP (P⁺) (Structure InP (P⁺)/ InP (N)/ GaInAs (N)/ InP (N)).

La complexité de l'hétérostructure effectivement étudiée (GaInAs (P⁺) ou InP (P⁺)/ InP (N)/ GaInAs (N)/ InP (N)) entraîne des difficultés technologiques supplémentaires notamment pour la gravure Mesa. D'autre part, le courant de fuite est apparemment très important avec ces matériaux.

Comme pour le GaAs , notre démarche comporte deux étapes :

- 1 - Réalisation des diodes à hétérostructure en structure Mesa normale pour mettre au point les opérations technologiques de base.
- 2 - Mise au point d'une technologie GaInAs/InP en structure Mesa inversée pour la réalisation finale du composant.

Pour l'étude expérimentale des hétérostructures $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}/\text{InP}$ et $\text{GaInAsP}/\text{InP}$, différentes épitaxies nous ont été fournies par THOMSON CSF. Ces hétéroépitaxies sont élaborées soit par la méthode des organométalliques sous pression réduite (LP MOCVD), soit par la méthode des hydrures (VPE).

IV.1. TECHNOLOGIE DE DIODE IMPATT A HETEROSTRUCTURE GaInAs/InP
EN STRUCTURE MESA NORMALE.

IV.1.1. STRUCTURE A REALISER

L'hétéro IMPATT en structure Mesa normale est représentée à la figure 77.

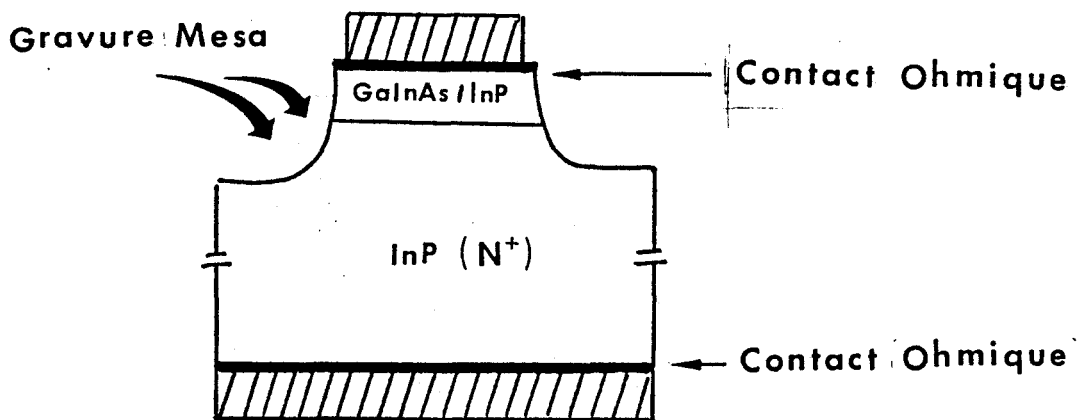


Fig.77 - Composant hétéro IMPATT en structure Mesa normale

L'élaboration des composants comporte essentiellement les phases suivantes :

- réalisation d'un contact ohmique sur le substrat InP(N⁺)
- réalisation d'un contact ohmique sur InP(P⁺) ou GaInAs (P⁺), côté épitaxie.
- gravure Mesa des semiconducteurs GaInAs et InP.

IV.1.2. ELABORATION DES COMPOSANTS

IV.1.2.1. Contacts ohmiques

Si le GaAs obéit à la règle du MEAD ($\phi_{Bn} \sim 2/3 E_g$, $\phi_{Bp} \sim 1/3 E_g$), l'InP fait l'exception de cette règle. En effet, on observe une hauteur de barrière de l'ordre de 0,48 V pour une barrière de Ti, Au, Al sur InP(N) et 0,75 V pour une barrière d'Au sur InP(P) [33]. A titre indicatif, nous donnons tableau XIII [33] les valeurs de la hauteur de la barrière et de la résistivité de contact pour différents dopages.

TABLEAU XIII

InP(N)	N_D (cm ⁻³)	N ⁻	5 10 ¹⁷	7 10 ¹⁸	N ⁺⁺
	ϕ_{Bn} (eV)	0,48	0,425	0,370	
	ρ_c (Ωcm ²)	3,5	2.0 10 ⁻²	1,5 10 ⁻⁶	<10 ⁻⁸
InP(P)	N_A (cm ⁻³)	P ⁻	5,4 10 ¹⁷	8,6 10 ¹⁸	P ⁺⁺
	ϕ_{Bp} (eV)	0,75	0,689	0,625	
	ρ_c (Ωcm ²)	1,1 10 ⁵	2,3 10 ⁻²	5,9 10 ⁻⁴	<10 ⁻⁴

Il en résulte qu'en pratique il est plus facile de réaliser un contact de faible résistance pour l'InP de type N et qu'à l'inverse il est plus difficile de l'obtenir pour l'InP de type P.

IV.1.2.1.1. Réalisation de contacts ohmiques sur InP(N)

Après nettoyage de la surface, le contact ohmique est réalisé comme pour le GaAs, par dépôt du système AuGe-Ni, suivi d'un recuit pour former l'eutectique.

IV.1.2.1.2. Réalisation de contacts ohmiques sur
InP (P)

Les solutions pour la préparation de surface sont celles utilisées pour l'InP(N). Parmi les alliages dopants de type P : AuBe, AuZn, AuMg, AuCd... nous employons l'AuZn (90 :10) pour le coefficient de diffusion élevé du Zn.

Les contacts sont réalisés par évaporation d'une charge AuZn suivie d'un recuit sous atmosphère réductrice. Plusieurs températures de recuit ont été testées (400°C, 415°C, 430°C, 450°C...). La valeur optimale de la résistance de contact est obtenue pour une température de 400°C pendant 5'. Elle reste toutefois élevée (voir Vème partie) et la caractéristique I(V) n'est pas linéaire (Fig.78). Ceci est probablement dû au problème de barrière de surface.

Pour améliorer la qualité du contact ohmique sur un matériau de type P, nous avons suggéré d'ajouter une couche de GaInAs (P⁺) à la surface de l'épitaxie précédente .

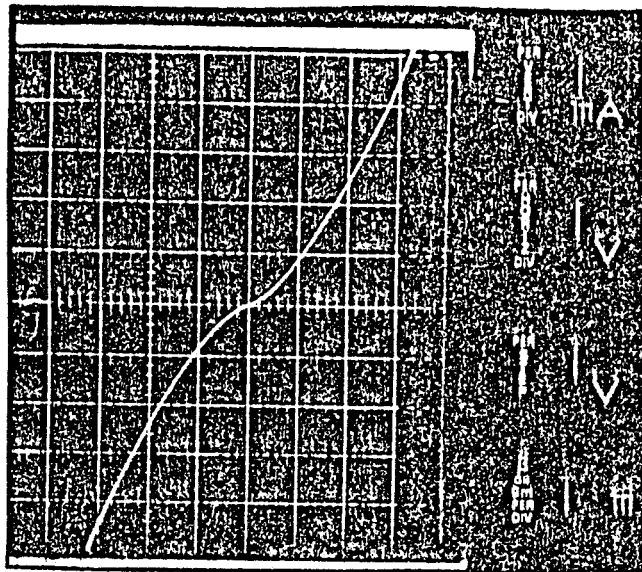


Fig.78 - Caractéristique I(V) entre deux plots eutectiques

IV.1.2.1.3. Réalisation de contacts ohmiques sur GaInAs (P)

La préparation de surface du GaInAs est effectuée avec le système : $H_2SO_4 - HCl - HF$

L'évaporation d'AuZn est suivie d'un recuit à une température comprise entre $400^\circ C$ et $430^\circ C$ pendant quelques minutes. On constate que la caractéristique $I(v)$ entre deux plots de contact est linéaire après recuit eutectique (Fig. 79).

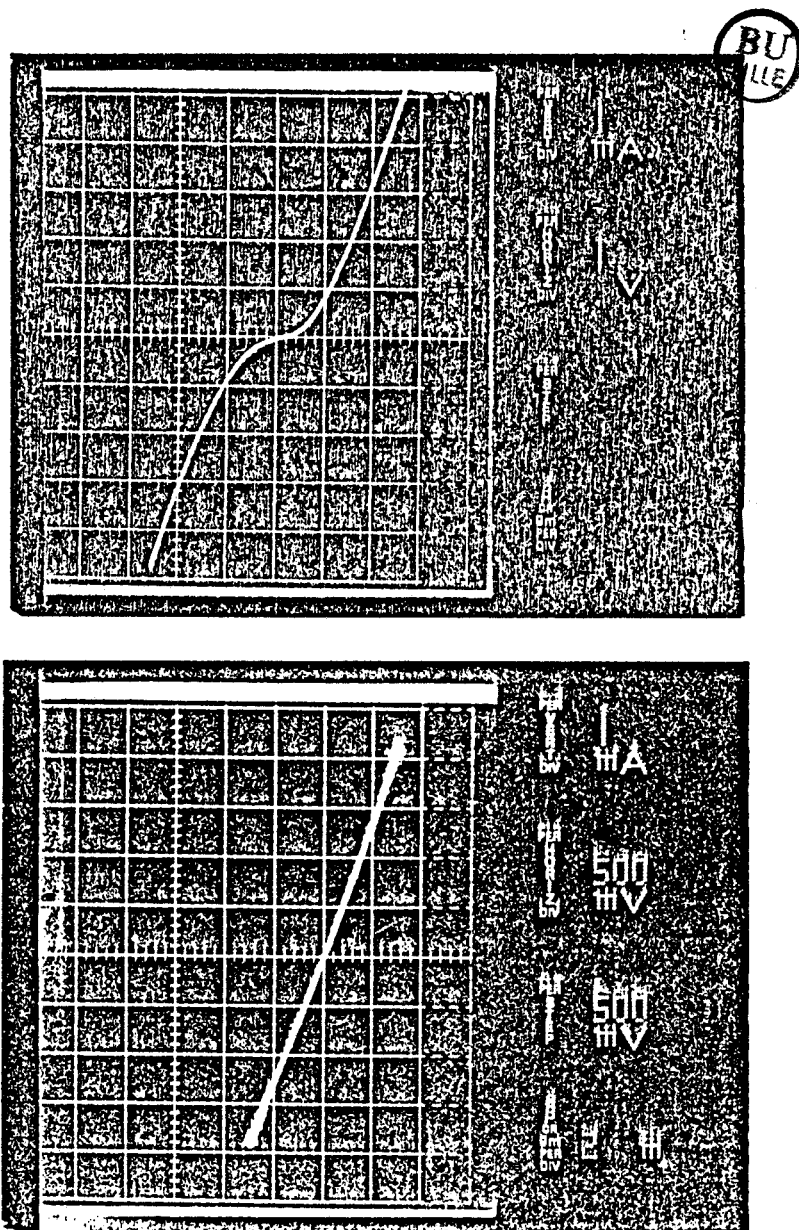


Fig.79 - Caractéristiques $I(v)$ avant et après recuit

IV.1.2.3. Gravure Mesa de l'hétérostructure

Nous voulons obtenir une gravure de l'hétérostructure GaInAs/InP :

- suffisamment profonde
- exempte de sous gravure au niveau du GaInAs ou de l'InP
- présentant un courant de fuite superficiel minimal.

Pour cela, deux approches différentes ont été explorées :

- 1 - gravure chimique
- 2 - gravure ionique.

IV.1.2.3.1. Gravure chimique

La voie chimique est délicate à mettre en oeuvre. Il faut en effet éviter les sous-gravures résultant d'une différence de vitesse d'attaque du GaInAs et d'InP. Deux cas de figure limites peuvent se présenter (Fig. 80 et 81).

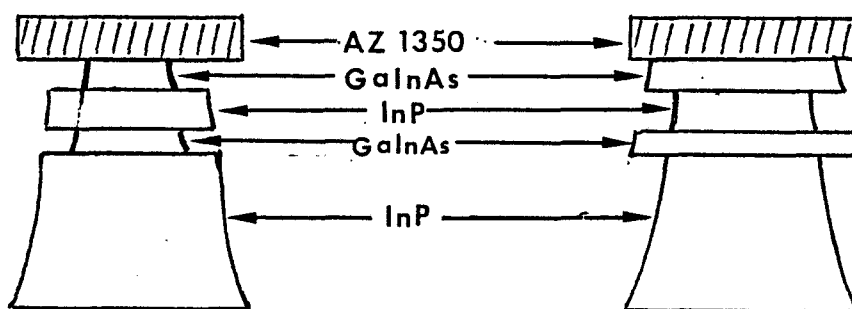


Fig.80 - Sous gravure au niveau
du GaInAs

$$(V_{\text{GaInAs}} > V_{\text{InP}})$$

Fig.81 - Sous gravure au niveau
d'InP

$$(V_{\text{InP}} > V_{\text{GaInAs}})$$

De nombreux essais d'attaque chimique ont été réalisés car c'est apparemment la seule possibilité de gravure profonde pour la structure Mesa inversée. Différentes solutions et concentrations ont

été essayées. Nous ne citons que celles donnant une gravure homogène et suffisamment rapide. Il s'agit de solutions :

- d'attaque non sélective à base de brome

Br - HBr

Br - CH₃OH

- d'attaque sélective à base de H₂SO₄ et de HCl

H₂SO₄ - H₂O₂ (GaInAs)

HCl - HNO₃ (InP)

IV.1.2.3.2. Gravure ionique

L'attaque ionique permet une gravure anisotrope qui exclut tout risque de sous gravure. Toutefois, ce procédé n'est applicable que pour la structure Mesa normale compte-tenu des faibles profondeurs d'attaque possible.

IV.1.2.3.3. Réduction du courant de fuite superficiel

Après gravure Mesa et rinçage abondant à l'alcool isopropylique, un contrôle sous pointes de la caractéristique I(v) montre souvent la présence de courants de fuite importants. Il est donc nécessaire, s'il s'agit d'un courant superficiel, de trouver un système de nettoyage et éventuellement un procédé de passivation approprié.

Différentes solutions ont été testées :

HCl

H₂SO₄

HF

H₃PO₄

CH₃COOH

HCl-HNO₃

H₂SO₄-H₂O₂

+ alcool isopropylique

Les résultats obtenus sont peu convaincants. Seuls les systèmes HCl : HNO₃, H₂SO₄ : H₂O₂ et H₂SO₄, HF, alcool isopropylique améliorent nettement les résultats.

IV.1.2.4. Etapes de réalisation du composant

1 - Réalisation de contact ohmique sur InP(N)

* préparation de surface

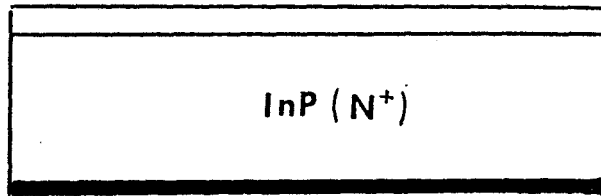
- tétrachlorure de carbone, toluène, acétone, propanol
- HCl : HNO₃ : H₂O (3:2:6), HCl, HF.

* métallisations

- Evap. d'AuGe (88 : 12) : 2000Å
- Pulvé de Ni : 350 Å

* recuit eutectique

- T° ~ 460°C, 30", sous N₂ + H₂ (90% + 10%)



← AuGe-Ni
(2000-350) Å

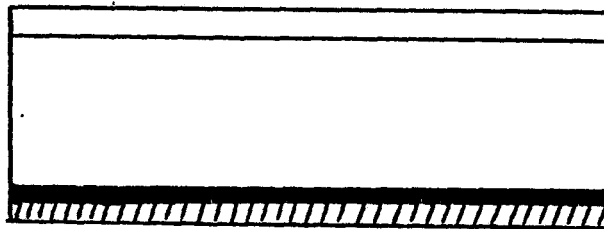
2 - Epaisseur du contact

* métallisations

- pulvés de Ti (300Å) Pt (1000Å) Ti (300Å)
- Evap. d'Au 2000 Å

* recuit

- T° ~ 200°C, 15' sous N₂ + H₂



← Ti - Pt - Ti - Au
(300-1000-300-2000) Å

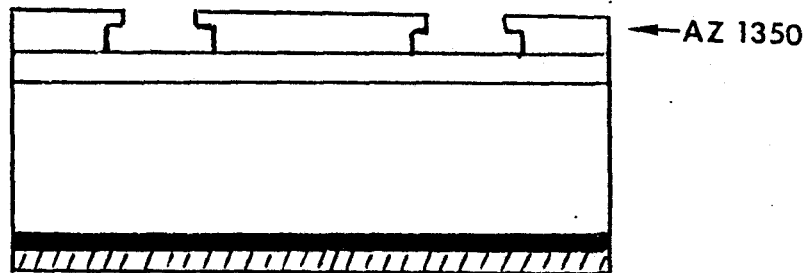
3 - Réalisation du contact ohmique sur InP(P) ou GaInAs (P)

* préparation de surface

- tétrachlorure de carbone, toluène, acétone, propanol
- HCl : HNO₃ : H₂O (3:2:6), HCl, HF pour InP
- H₂SO₄ : H₂O₂ : H₂O (5:1:100), HCl, HF pour GaInAs

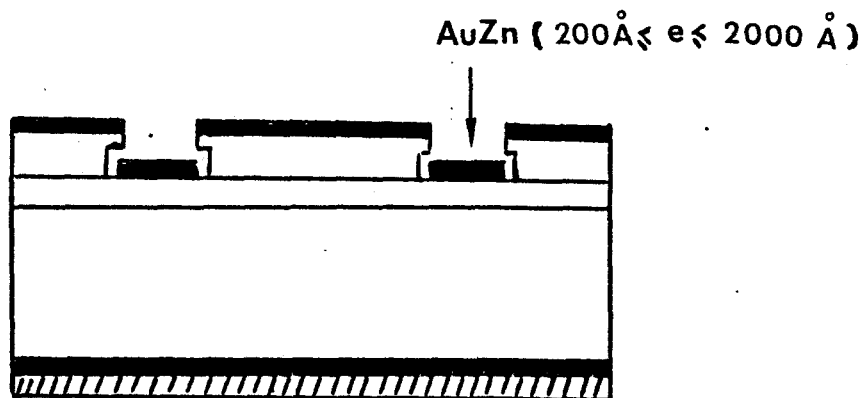
* photogravure des motifs

- résine AZ 1350 séchage 70°C, 20'
- traitement au chlorobenzène 5'
- insolation UV : 25"
- révélation AZ developper 50%, 40"
- HCl, HF, dilué



* Métallisation

- Evap. d'AuZn (90:10) : 200 Å $\leq e \leq$ 2000 Å
- suisant les séries

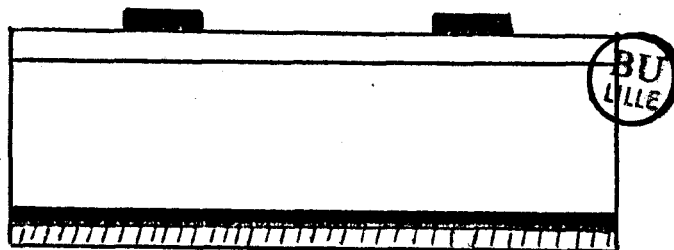


* Lift-off

- acétone + agitation ultrasonique (US)

* Recuit thermique

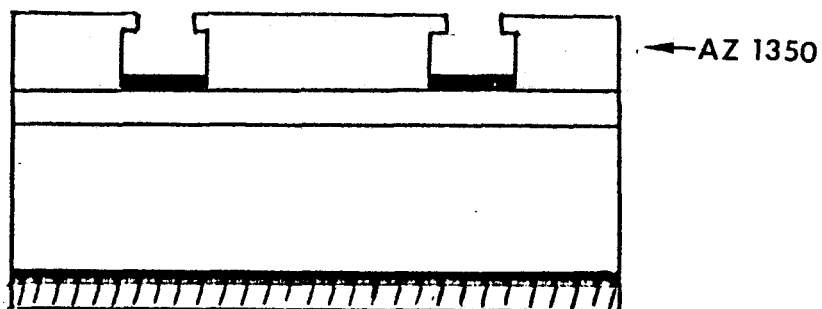
- $400^{\circ}\text{C} < T^{\circ} < 430^{\circ}\text{C}$, $2' < t < 5'$, sous $\text{N}_2 + \text{H}_2$,
suivant les séries



4 - Epaisseur du contact

* Photogravure de motifs

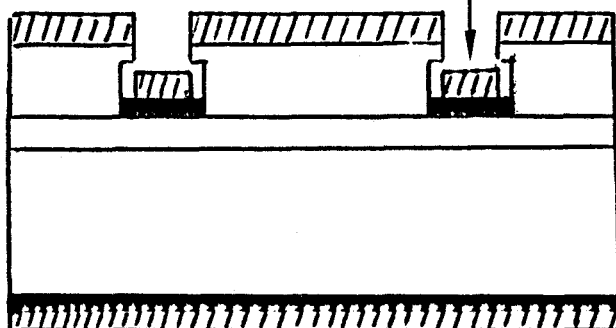
- idem



* Métallisations

- idem

Ti - Pt - Ti - Au
(300-1000-300-2000) Å

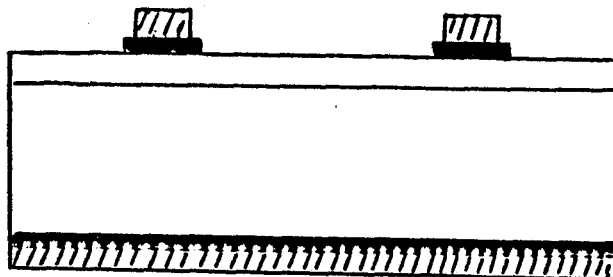


* Lift-off

- idem

* Recuit

- idem

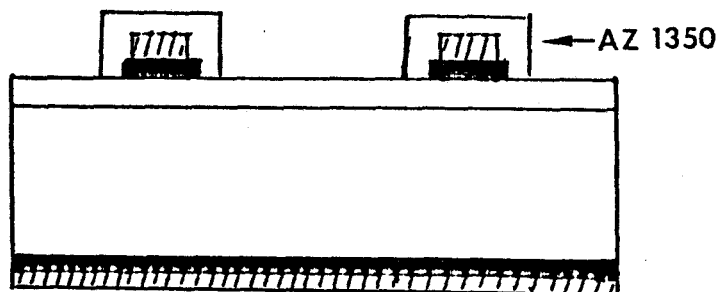


5 - Gravure Mesa

* photogravure de masques de protection

- idem (pas de traitement au chlorobenzène)

- cuisson de la résine 120°C, 30'



* Gravure Mesa

- solutions chimiques

H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O (5 : 1 : 40) pour GaInAs

HCl : HNO_3 : H_2O (3:2:6) pour InP

ou :

* Br : HBr : H_2O (1:17:35 ou 1:34:70)

Remarque :

La gravure doit être rapide avec la solution

Br : HBr : H_2O à la concentration 1 : 34 : 70.

Avec de longues expositions, l'attaque tend à sous graver et à devenir préférentielle pour le GaInAs.

ou :

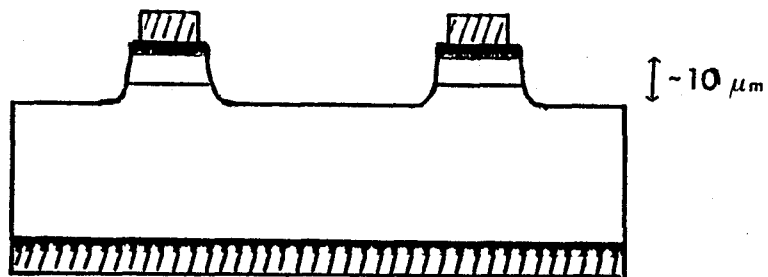
* Br : CH₃OH (1%)

- gravure ionique Ar⁺

- profondeur - 5 à 10 μm

* Réduction du courant de fuite superficiel

- H₂SO₄, HF, Alcool isopropylique



6 - Découpe des échantillons

- Scie à disque diamanté

- dimension (500 x 500) μm

7 - Encapsulation des échantillons

- Boîtier S₄

- Montage non inversé

- soudure : colle conductrice à Ag ou "Préforme" AuSn

US = 2 fils d'Au de 25 μm

- passivation SiO₂ ou polyimide DUPONT

**IV.2. TECHNOLOGIE DES DIODES IMPATT A HETEROSTRUCTURE GaInAs/InP en
STRUCTURE MESA INVERSEE.**

IV.2.1. STRUCTURE INVERSEE

La diode IMPATT à hétérostructure $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}/\text{InP}$ en structure mesa inversée a la configuration suivante :

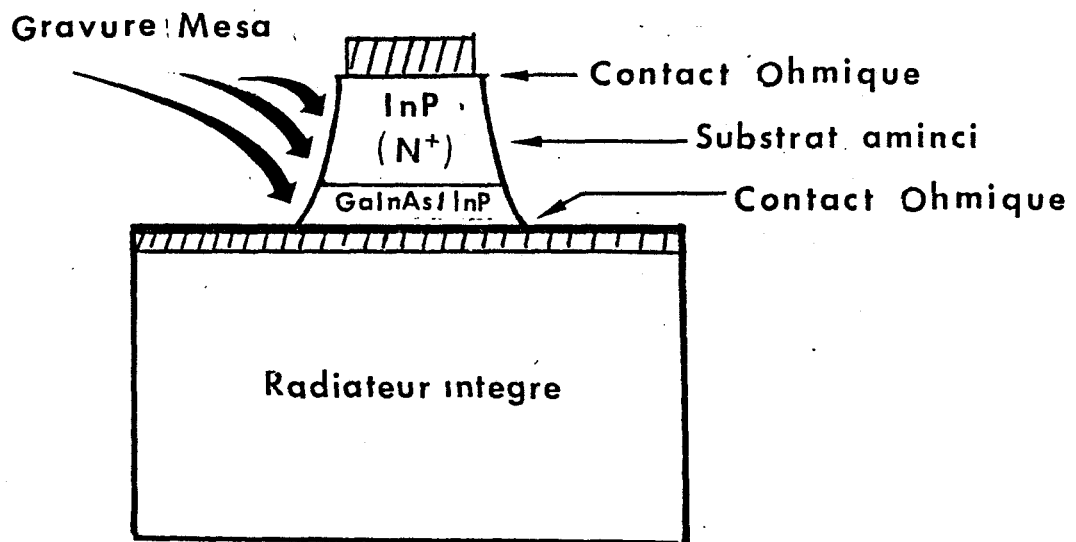


Fig.82 - Composant hétéro IMPATT en structure Mesa inversée

IV.2.2. ELABORATION DES COMPOSANTS

Pour élaborer les diodes à hétérostructure GaInAs/InP en structure inversée, nous complétons les éléments de technologie mis au point lors de la structure mesa normale, par :

- l'implantation du radiateur intégré
- l'amincissement du substrat InP

IV.2.2.1. Implantation du radiateur intégré

Elle est effectuée de la même manière que pour les diodes IMPATT GaAs, par un dépôt électrolytique d'or de 60 μm .

IV.2.2.2. Amincissement du substrat InP

En raison de la fragilité mécanique du matériau InP, nous adoptons pour l'amincissement du substrat les solutions suivantes :

- polissage mécano-chimique
- réajustement final du substrat par attaque chimique

α) Polissage mécano-chimique

Le polissage mécano-chimique de l'InP est effectué de façon similaire à celui du GaAs.

Les solutions chimiques utilisées sont constituées de :

- Br- CH_3OH en raison de 1% en volume
- gel de silice dilué à 50%

Avec cette technique, nous obtenons d'excellents résultats en planéité (± 1 à 3 μm) et en état de surface. Cependant, compte tenu de la fragilité du matériau, nous arrêtons cette phase à environ 40 μm .

β) Attaque chimique

L'attaque chimique finale est assurée par la solution Br : HBr : H_2O (1 : 34 : 70) qui donne une attaque homogène et un bel aspect de surface.

L'épaisseur finale est de l'ordre de 30 μm .

Remarque : Gravure Mesa

Compte tenu de la profondeur de la gravure Mesa, nous envisageons de la réaliser par voie chimique. Suivant les solutions utilisées, les masques de résine jusqu'alors employés doivent être consolidés ou remplacés par d'autres masques plus résistants. Comme solutions de gravure, nous pouvons utiliser les solutions suivantes :

B_r : HBr : H_2O

B_r : CH_3OH

Dans le premier cas, on peut utiliser les masques de résine positive. Dans le second cas, les résines étant solubles dans l'alcool, on utilise de préférence les masques de polyimide. Notons enfin qu'une légère attaque ionique du Mesa après gravure chimique pourrait être très favorable pour la minimisation des courants de fuite superficiel (Voir Vème Partie).

IV.2.2.3. Etapes de réalisation du composant

1 - Réalisation de contact ohmique sur GaInAs(P)

* préparation de surface

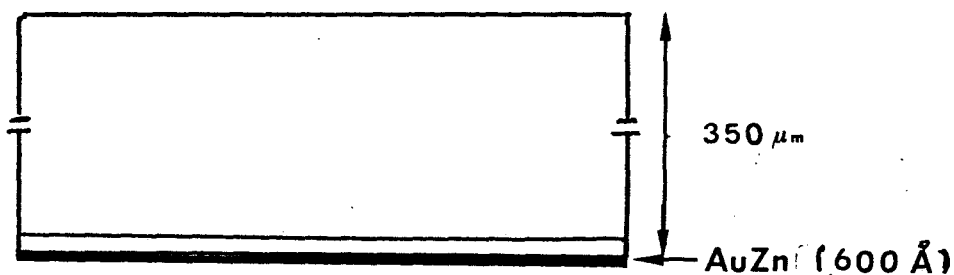
- voir structure normale

* Métallisation

- Evap d' $AuZn = 600 \text{ \AA}$

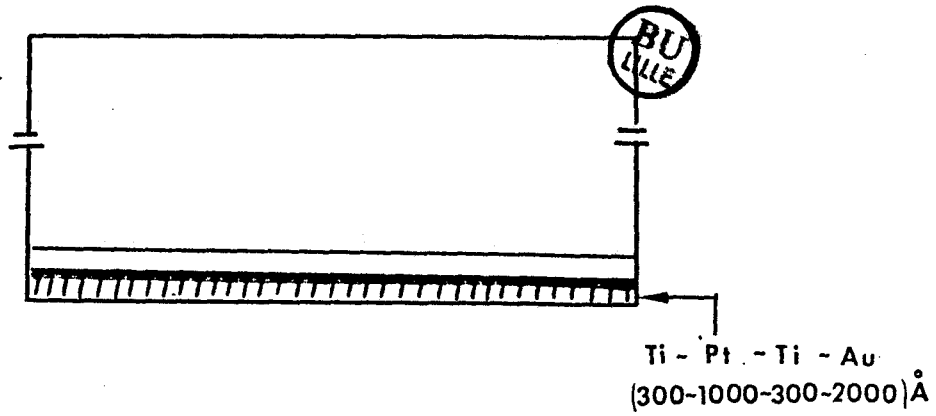
* Recuit thermique

- Te - $410^\circ C$, 5', sous $N_2 + H_2$



2 - Epaisseur du contact

- voir structure normale



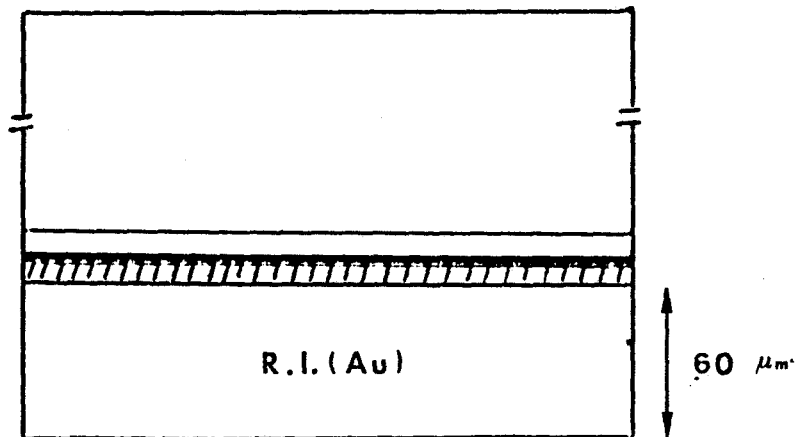
3 - Implantation du radiateur intégré

* Dépôt électrolytique

- bain de cyanure double d'Au et de K

- $J = 2 \text{ mA/cm}^2$, $v = 8 \text{ } \mu\text{m/h}$

- $e = 60 \text{ } \mu\text{m}$



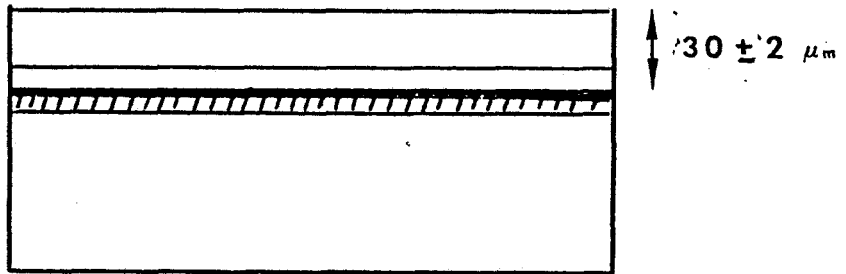
4 - Amincissement du substrat

* polissage mécano-chimique

Br - CH₃OH (1%)
Bains
gel de silice (50%)
- e = 40 ± 2μm

* attaque chimique

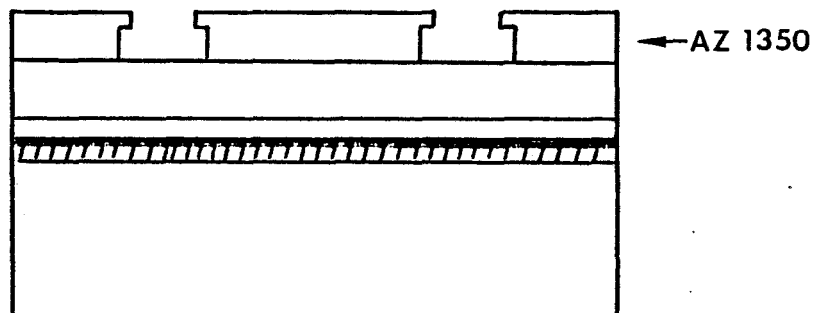
- solution Br : HBr : H₂O (1 : 35 : 70)
- e = 30 ± 2μm



5 - Réalisation de contacts ohmiques sur InP(N)

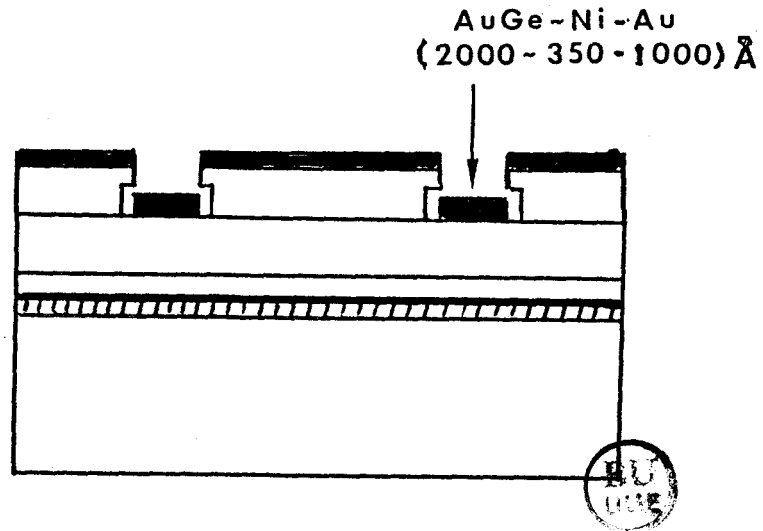
* Préparation de surface

- voir structure normale
- photogravure de motifs
voir structure normale



* métallisations

- évap : d'AuGe : 2000 Å
- pulvé de Ni = 350 Å
- pulvé d'Au = 1000 Å

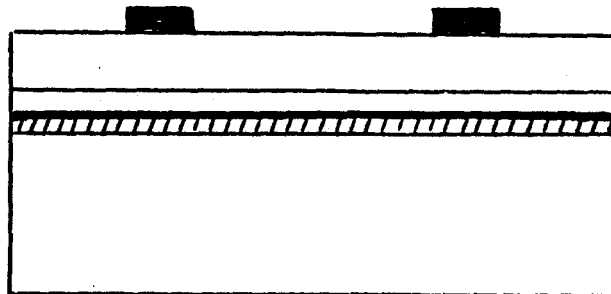


* lift-off

- acétone + US

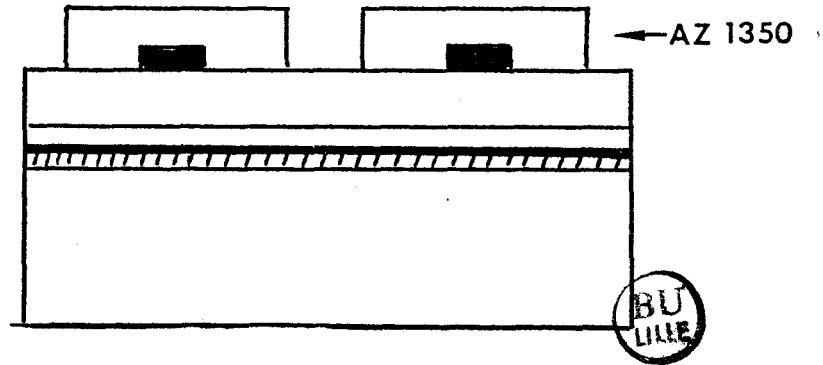
* traitement thermique

- ultérieur



6 - Gravure Mesa

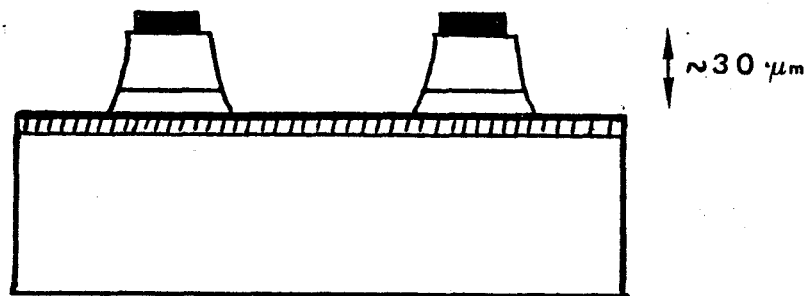
- * photogravure des masques de protection
- voir structure normale



* Gravure Mesa

- solution d 'attaque Br : HBr : H₂O (1 : 34 : 70)
- attaque jusqu'au radiateur

- * réduction du courant de fuite superficiel
- voir structure normale



7 - Découpe du radiateur

- massicot de laboratoire
- dimension (500 X 500) μm

8 - Montage des diodes

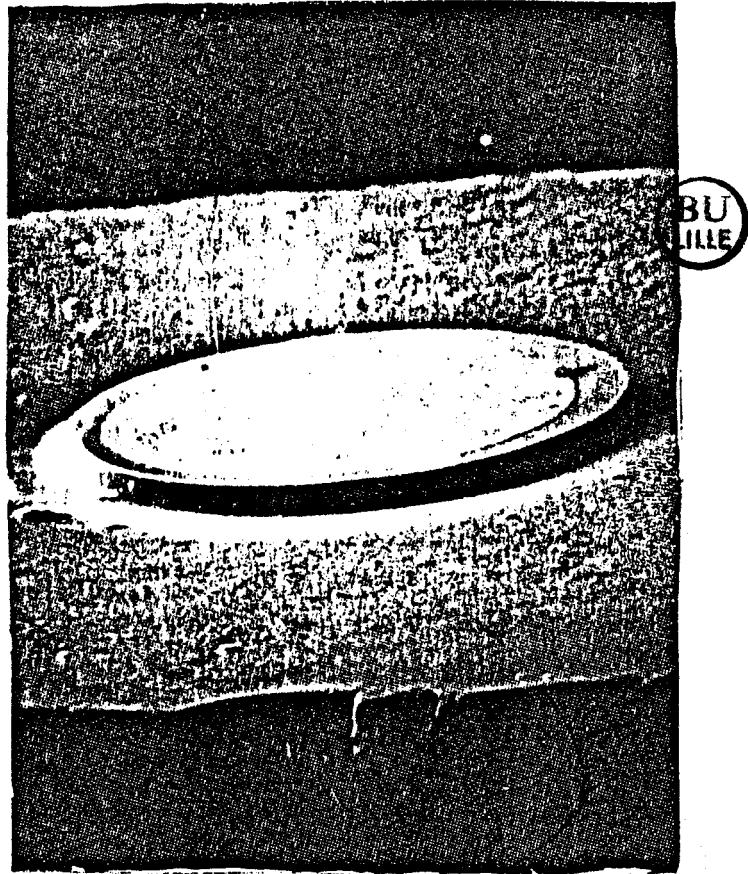
- traitement thermique de contact ohmique
T° = 300°C pd 15' sous N₂ + H₂
- Boîtier S₄
- soudure : préforme AuSn
Us = 2 fils d'Au de 25 µm
- passivation : SiO₂ ou polyimide

CONCLUSION

Dans cette partie, l'approche de la technologie du composant IMPATT à hétéro-structure GaInAs/InP a été abordée de façon indirecte. Il s'agissait, en effet, dans un premier temps, en liaison avec l'équipe menant l'étude théorique de caractériser le plus complètement possible l'hétéro-structure et sa conformité avec les prévisions théoriques. C'est pourquoi, tout en réalisant de nombreux composants pour les études expérimentales, nous avons essayé comme pour l'IMPATT GaAs de dégager la technologie la mieux adaptée aux matériaux constitutifs de l'hétéro-structure.

De nombreuses difficultés, en plus des problèmes d'approvisionnement en hétéro-épitaxies, sont apparues pratiquement à chaque étape technologique, difficultés dans la gravure, la qualité des contacts ohmiques sur les matériaux de type P, l'amincissement du substrat InP.

Malgré cela, la faisabilité technologique a été démontrée.

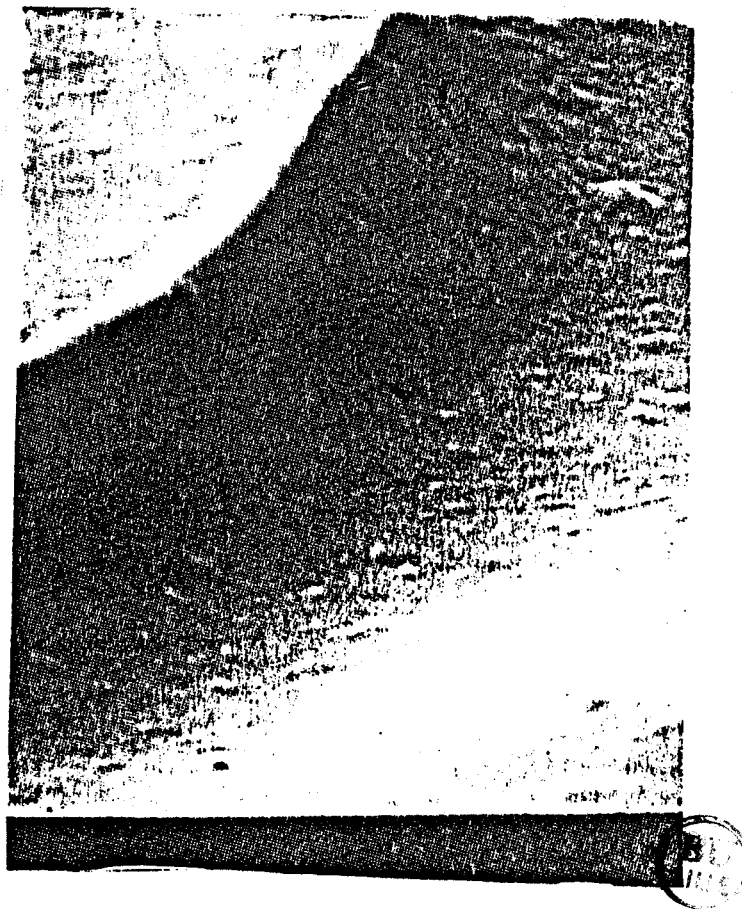


Vue d'une diode à hétérostructure
GaInAs/InP

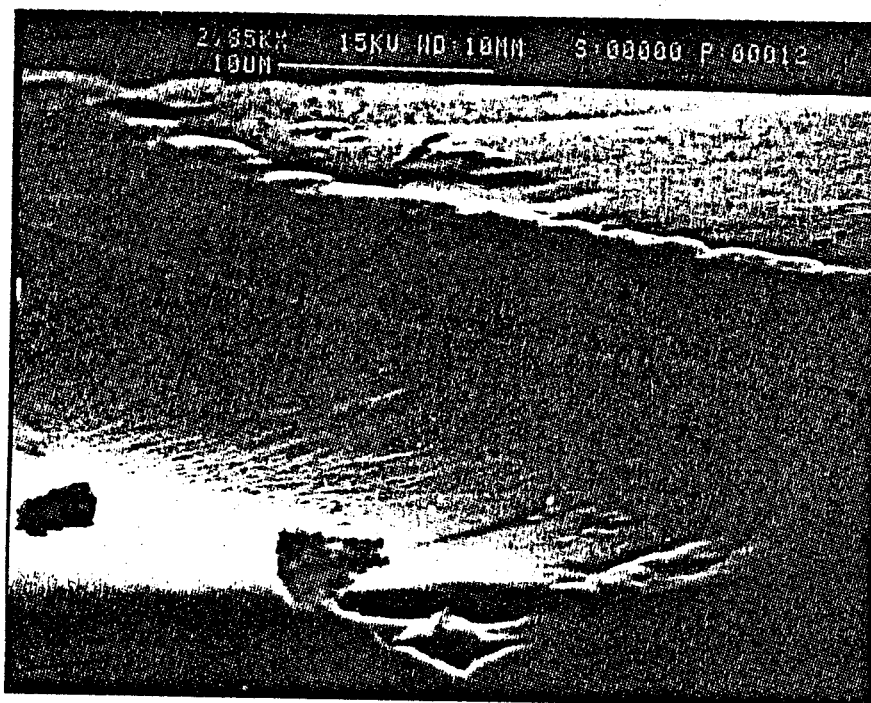
Profil Mesa obtenu avec une solution HCl-HNO₃



Profil Mesa obtenu avec une solution Br-HBr



Profil Mesa obtenu avec une solution Br-CH₃OH



V ème PARTIE

V.1. CARACTERISATION DES RESISTIVITES DE CONTACT

SUR InP (N), InP (P) ET GaInAs (P).....

V.2. CARACTERISATION DES HETEROSTRUCTURES.....

INTRODUCTION

Dans cette dernière partie, nous présentons les résultats de caractérisation des contacts ohmiques sur InP et GaInAs suivis des caractérisations des différentes hétérostructures étudiées.

VI.1. CARACTERISATION DES RESISTIVITES DE CONTACT SUR InP (N)

InP (P) ET GaInAs (P)

Il s'agit d'estimer la qualité des contacts ohmiques sur les matériaux InP(N⁺), InP(P⁺) et GaInAs(P⁺).

Les résistances et résistivités de contact évaluées à partir de la méthode à 2 ou 3 contacts ou de la résistance série totale sont données dans le tableau XVI.

TABLEAU XIV

MATERIAUX	InP (N ⁺)	InP (P ⁺)	GaInAs (P ⁺)		
			572	806,819	1131
Plaquette Th	toute	1959, 587	AuZn	AuZn	AuZn
Alliage	AuGe-Ni	AuZn	1000	200	600
Epaisseur (A)	2000 - 350	1500 < <2000	405°C	425°C	410°C
Recuit T°	-460°C	415°C	5'	1'	2'
t	30"	5'	5'	1'	2'
ρ_c (Ωcm^2)	10^{-5}	$2,7 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}		10^{-4}

En comparant nos valeurs avec celles rencontrées dans la littérature (Fig.83) [33 à 38], on peut constater d'une part que nos contacts ohmiques sur InP (N⁺) sont de qualité satisfaisante et d'autre part que, si les résistivités de nos contacts sur InP (P⁺) restent élevées, les meilleurs résultats obtenus sur GaInAs (P⁺) sont comparables aux valeurs trouvées par d'autres auteurs sur GaInAsP(P⁺).

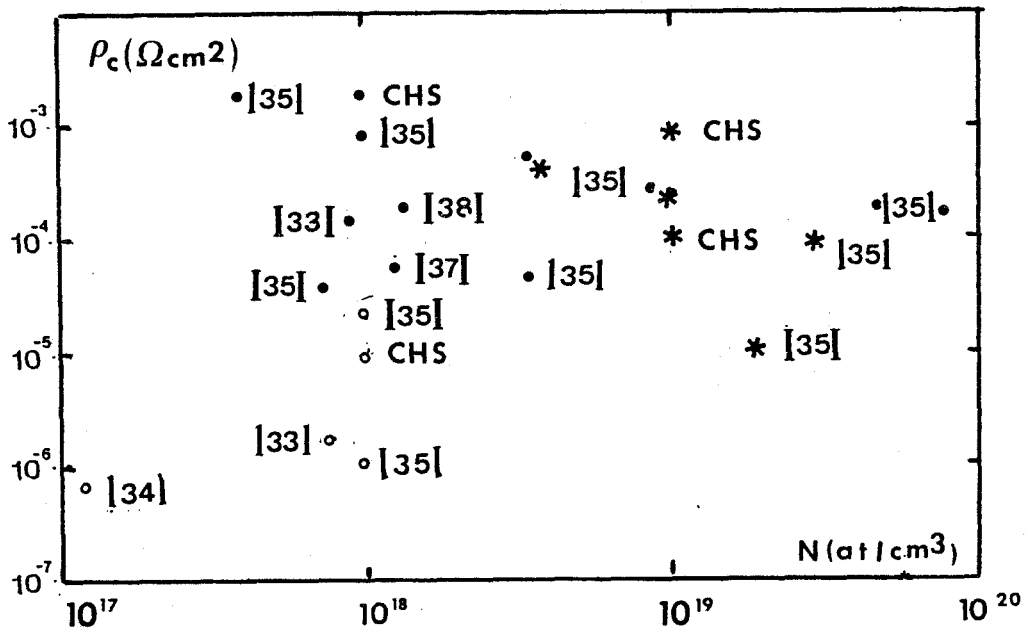


Fig.83 - Résistivité du contact en fonction du dopage pour des matériaux InP, GaInAs, GaInAsP de type N ou P

Remarque : Nous n'avons pas effectué d'études systématiques pour améliorer ces paramètres car la qualité des contacts est suffisante pour permettre les études expérimentales des hétérostructures

V.2. CARACTERISATION DES HETEROSTRUCTURES

L'étude expérimentale des hétérostructures vise à résoudre les problèmes spécifiques de courant de fuite et à mettre en évidence l'avalanche dans les matériaux GaInAs/InP. Pour cela, nous nous limitons à des caractérisations quasi-statiques, $C(v)$ et $I(v)$ des diodes élaborées en structure normale.

V.2.1. CARACTERISTIQUES $C(V)$, $N(x)$, $E(x)$

Les variations de la capacité avec les tensions appliquées ainsi que les profils de dopage et de champ électrique sont représentées pour différentes séries sur les figures 84 à 101.

Certaines séries sont destinées à des études spécifiques de divers problèmes qui se sont posés en particulier :

- la série CHS.H22D dont la zone active est composée uniquement de GaInAs est destinée à l'étude du "claquage" de ce matériau,
- la série CHS.H30D avec l'association GaInAsP/InP permet une étude comparative avec l'hétérostructure GaInAs/InP,
- la série CHS.H36D à hétérostructure GaInAs/InP dont la zone d'avalanche est non intentionnellement dopée, est destinée à l'étude du claquage.

A noter pour les hétérostructures IMPATT GaInAs/InP :

- la série CHS.H39D est caractérisée par un niveau de dopage très largement supérieur à celui prévu initialement,
 - les séries CHS.H30D, H32D, H36D présentent un dopage faible pour la zone de transit : les champs électriques sont déjà confinés à des tensions très inférieures aux tensions de claquage,
 - la série CHS.H40D présente un profil de dopage se rapprochant le plus de l'hétérostructure théorique. A partir de la caractéristique $N(x)$, on peut distinguer :
 - * la zone d'avalanche d'InP (N) dopé à $qq \cdot 10^{16}$ at/cm³, situé à $x < 0,2 \mu\text{m}$
 - * la zone d'avalanche de GaInAs (N) dopé à $2 \sim 3 \cdot 10^{15}$ at/cm³ pour x comprise entre $0,2 \mu\text{m}$ et $0,4 \mu\text{m}$.
 - * la zone de transit d'InP (N) dopé à $qq \cdot 10^{15}$ at/cm³ pour x comprise entre $0,4 \mu\text{m}$ et $1,7 \mu\text{m}$.
- Contrairement aux hétérostructures précédentes, le fort confinement du champ électrique n'est pas dû à un dopage faible mais à une longueur insuffisante de la zone de transit.

Série CHS.H22D (Th 1959)

InP p ⁺ 5 10 ¹⁸	InP P 2 10 ¹⁷	GaInAs N qq 10 ¹⁶	InP N ⁺ 10 ¹⁸	InP N ⁺ 10 ¹⁸
---	--------------------------------	------------------------------------	---	---

0.5 μm 1.5 μm 0.4 μm 2 μm

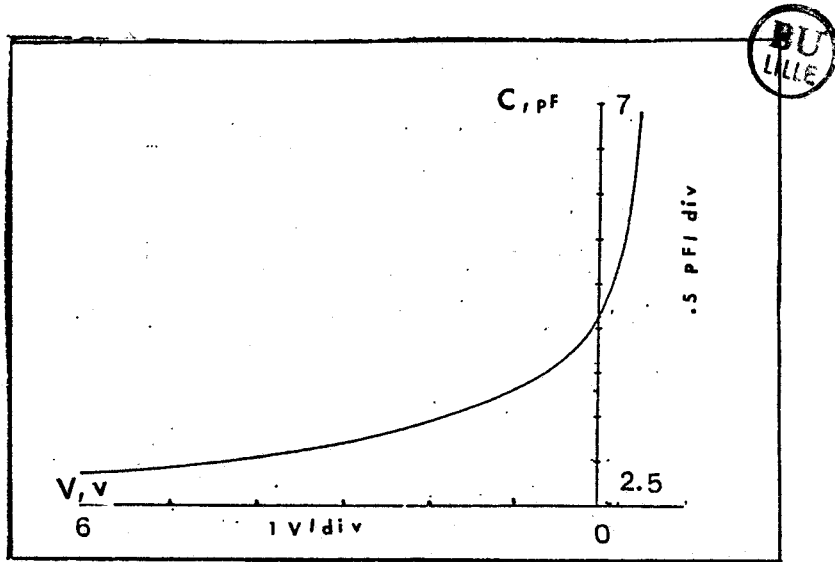


Fig.84

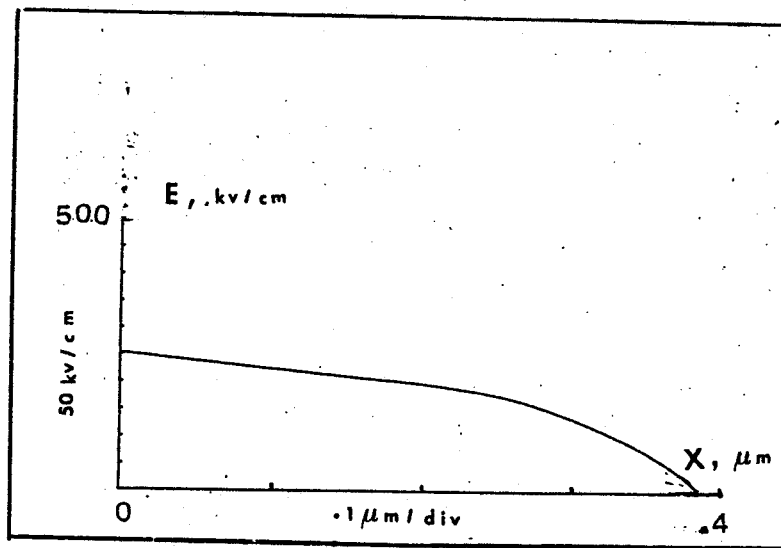


Fig.85

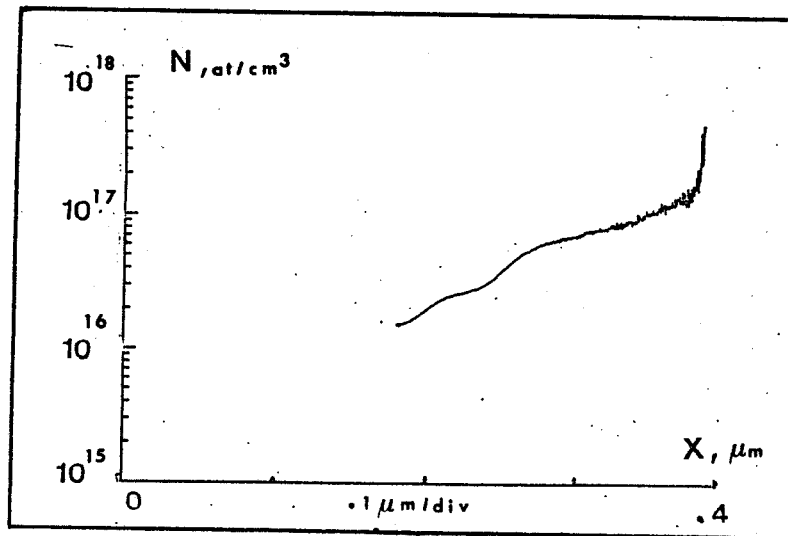


Fig.86

Série CHS.H30D (Th = 587)

InP P ⁺ 10 ¹⁸	InP N 10 ¹⁶	GaInAsP N qq 10 ¹⁶	InP N 3 10 ¹⁵	InP N ⁺ ~ 10 ¹⁸
---	------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------	---

1 μm 0.05 μm 0.15 μm 5 μm

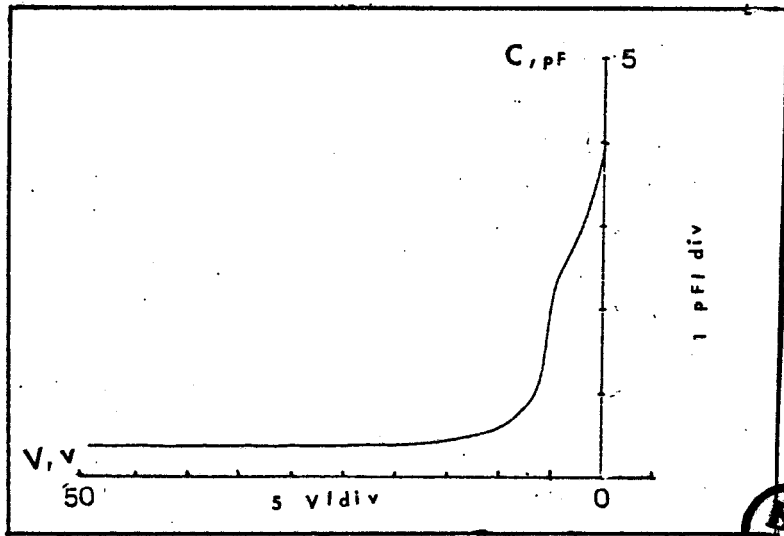


Fig.87

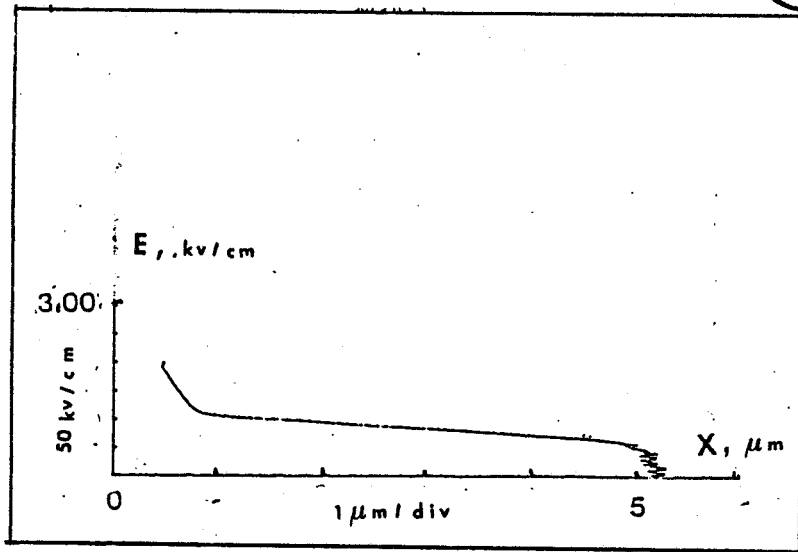


Fig.88

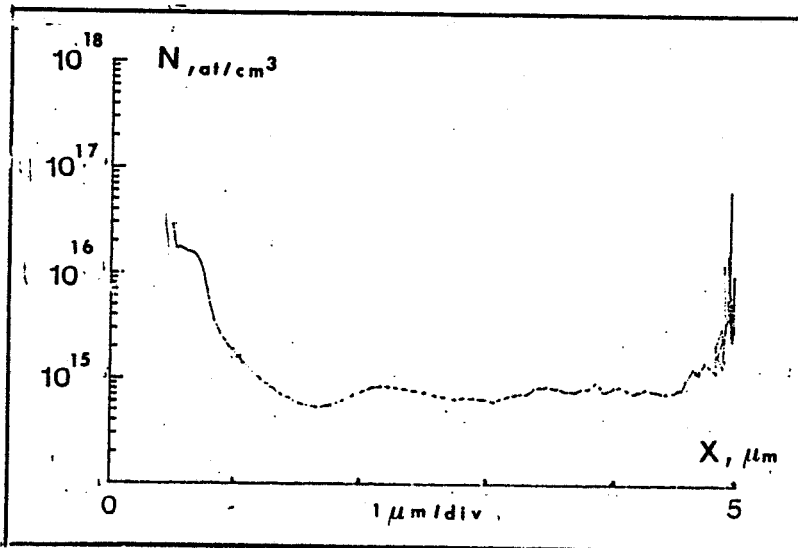


Fig.89



Série CHS.H32D (Th 572)

GaInAs P ⁺ 10 ¹⁹	InP P 10 ¹⁸	InP N 10 ¹⁶	GaInAs N 10 ¹⁵	InP N 3 10 ¹⁵	InP N ⁺ 10 ¹⁸
0.19 μm	1 μm	0.05 μm	0.15 μm	5 μm	

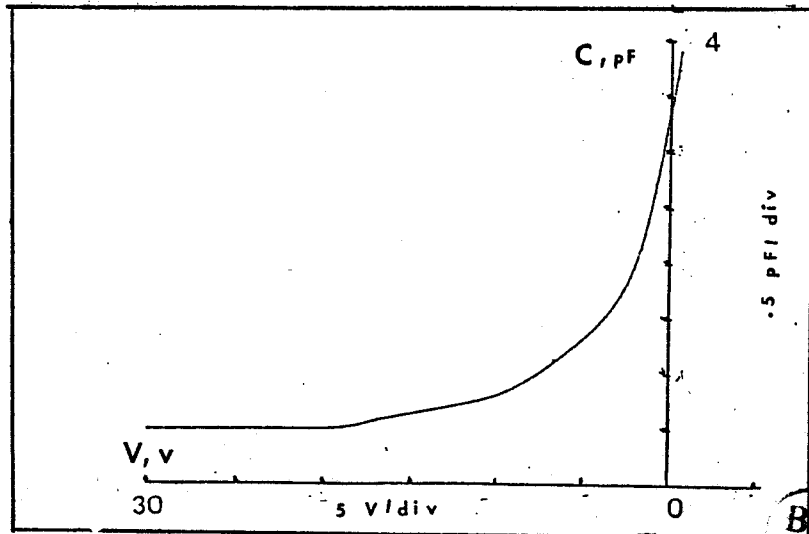


Fig. 90

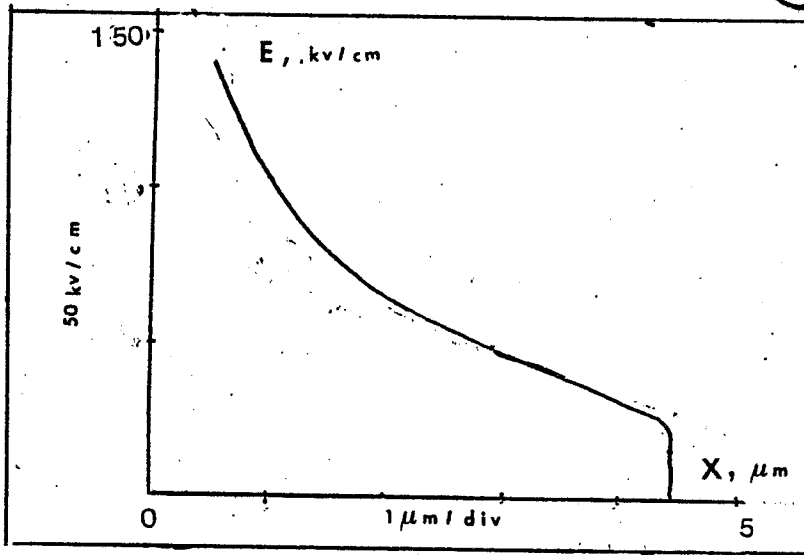


Fig. 91

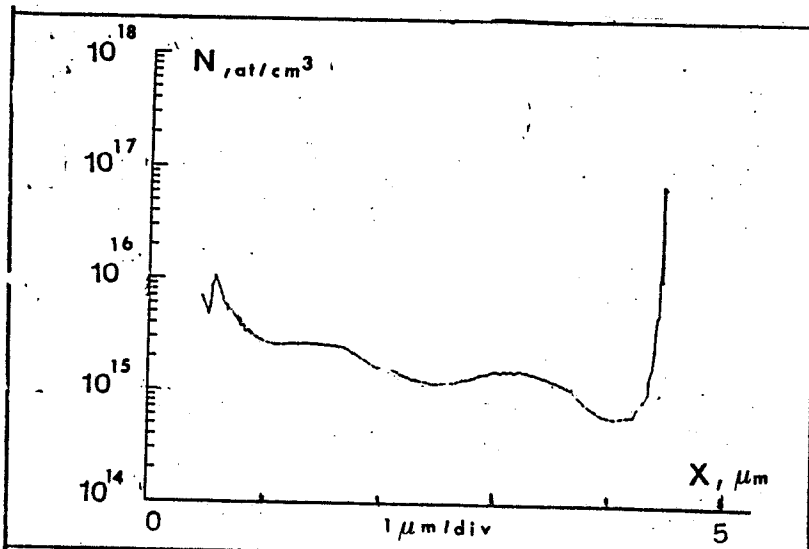


Fig. 92

Série CHS.H36D (Th 806)

GaInAs P ⁺ 10 ¹⁹	InP P ⁺ 5 10 ¹⁷	InP N NID	GaInAs N NID	InP N 10 ¹⁵	InP N ⁺ 10 ¹⁸
--	---	-----------------	--------------------	------------------------------	---

0.2 μm 1.3 μm 0.05 μm 0.16 μm 5 μm

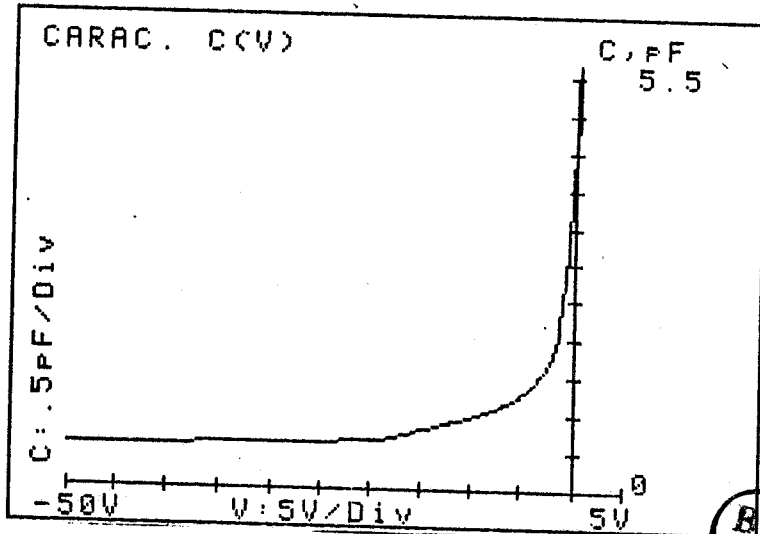


Fig. 93

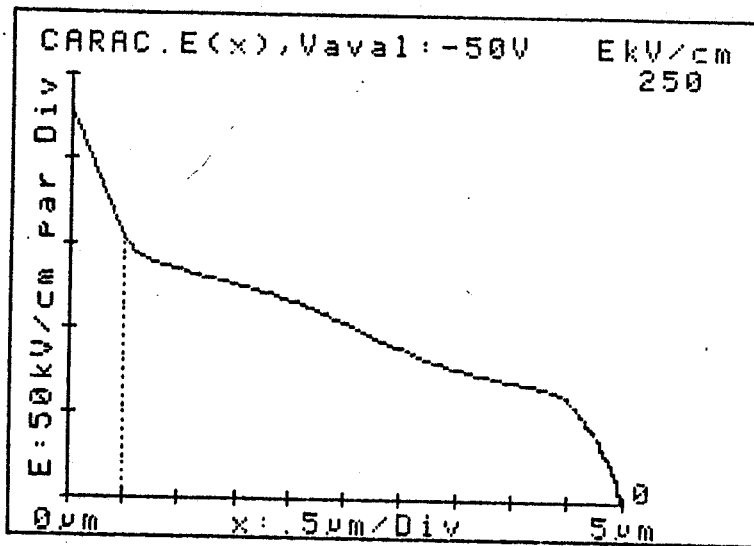


Fig. 94

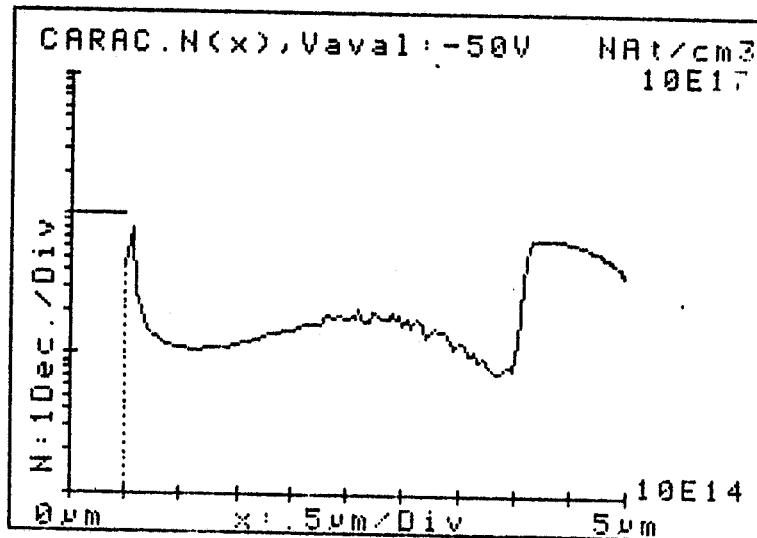


Fig. 95

Série CHS.H39D (Th 816)

GaInAs p ⁺ 10 ¹⁹	InP p ⁺ 3 10 ¹⁷	InP N 10 ¹⁶	GaInAs N 10 ¹⁵	InP N 2 10 ¹⁵	InP N ⁺ 10 ¹⁸	InP N ⁺ 10 ¹⁸
0.3 μm	1 μm	0.1 μm	0.2 μm	4.5 μm	0.5 μm	

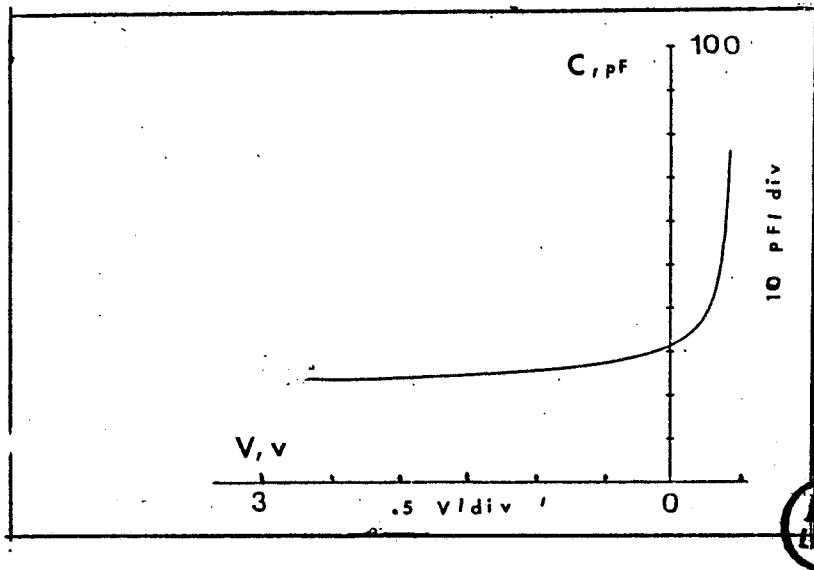


Fig. 96

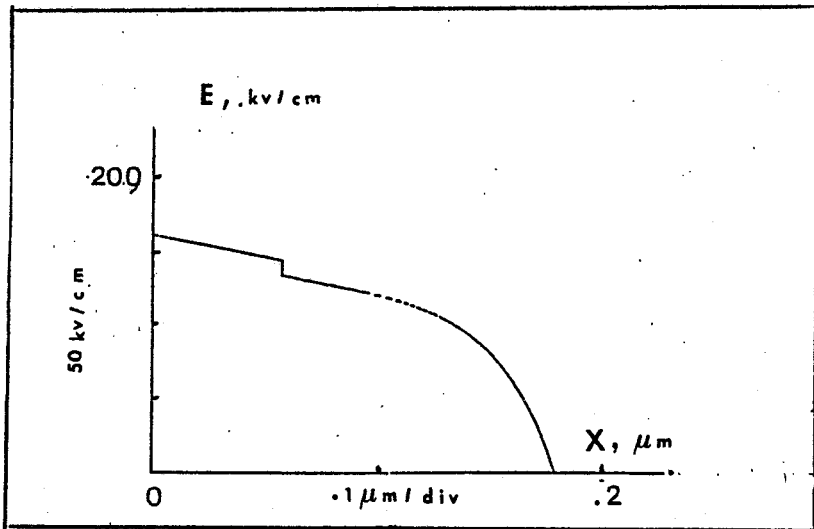


Fig. 97

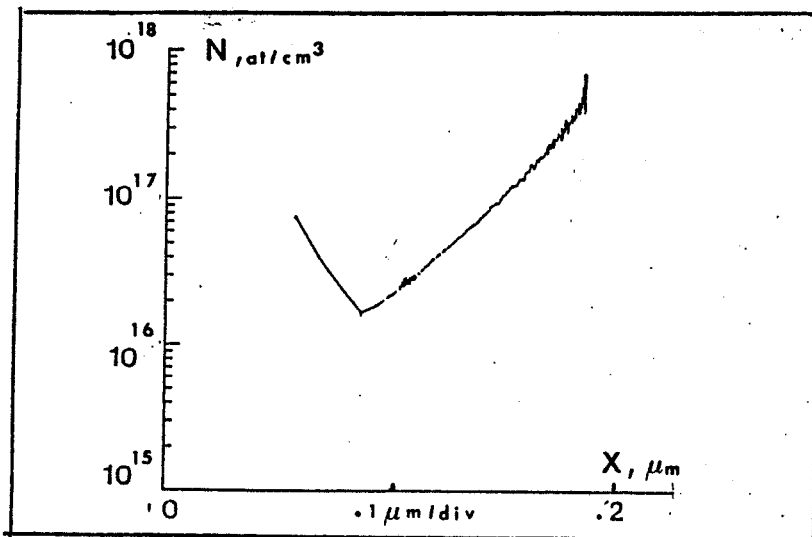


Fig. 98

Série CHS.H40D (Th 1131)

GaInAs	InP	InP	GaInAs	InP	InP
p ⁺	p ⁺	N	N	N	N ⁺
10 ¹⁹	10 ¹⁸	10 ¹⁶	10 ¹⁵	qq 10 ¹⁵	10 ¹⁸
0.6 μm	1.4 μm	0.2 μm	0.2 μm	3 ± 0.2 μm	

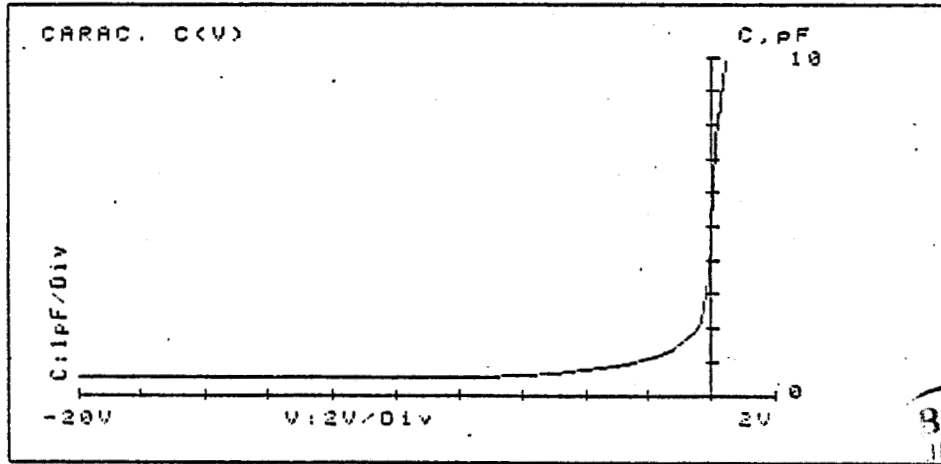


Fig. 99

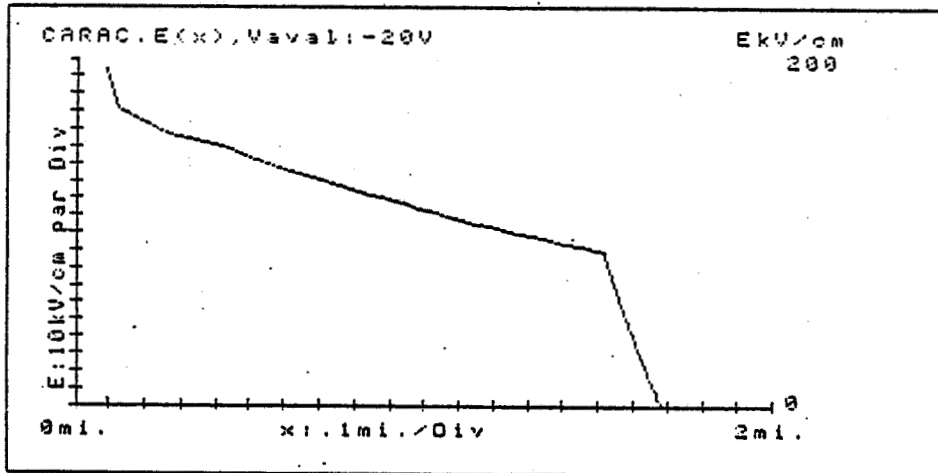


Fig.100

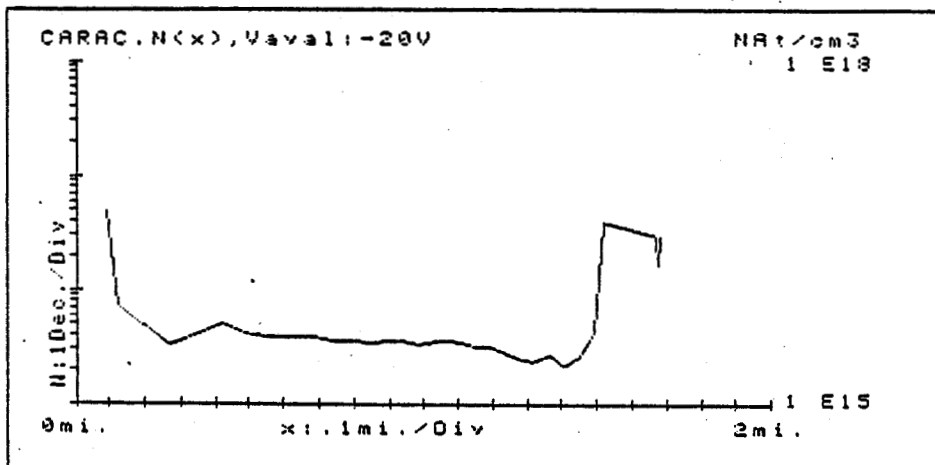


Fig.101

V.2.2. CARACTERISTIQUES I(V)

V.2.2.1. Courant de fuite

Cette partie porte essentiellement sur la maîtrise de courant de fuite particulièrement important et quasi-systématique après attaque mesa de différentes hétéroépitaxies traitées . Un exemple fréquemment rencontré de cette fuite est illustré sur la figure 102 où l'on observe un courant de l'ordre du mA pour une tension de quelques volts.

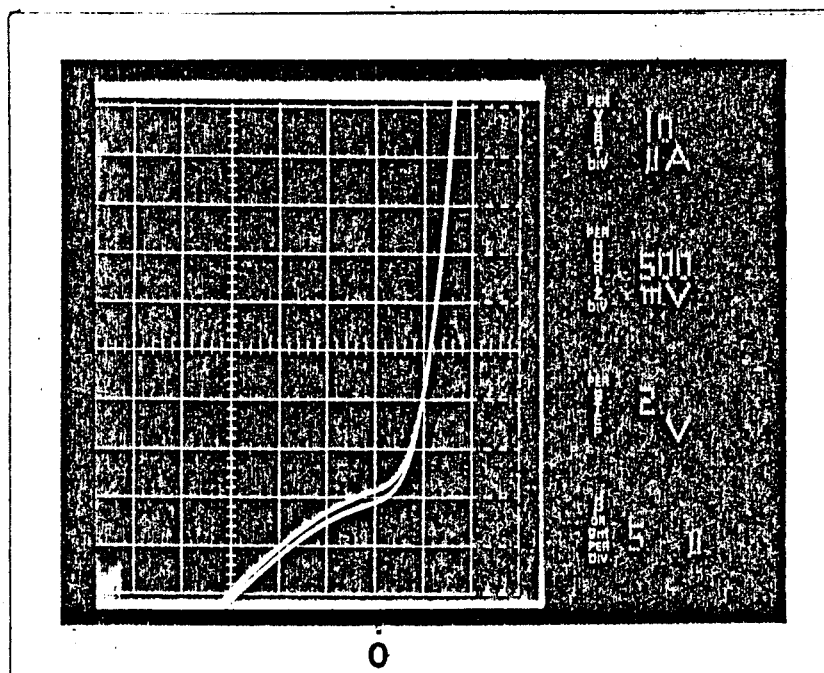


Fig.102 - Caractéristique typique d'un courant de fuite

Les caractéristiques I(V) après réduction de cette fuite superficielle sont représentées pour différentes séries sur la figure 103. Les modes et les solutions de gravure correspondants à chaque série représentative y sont également mentionnés.

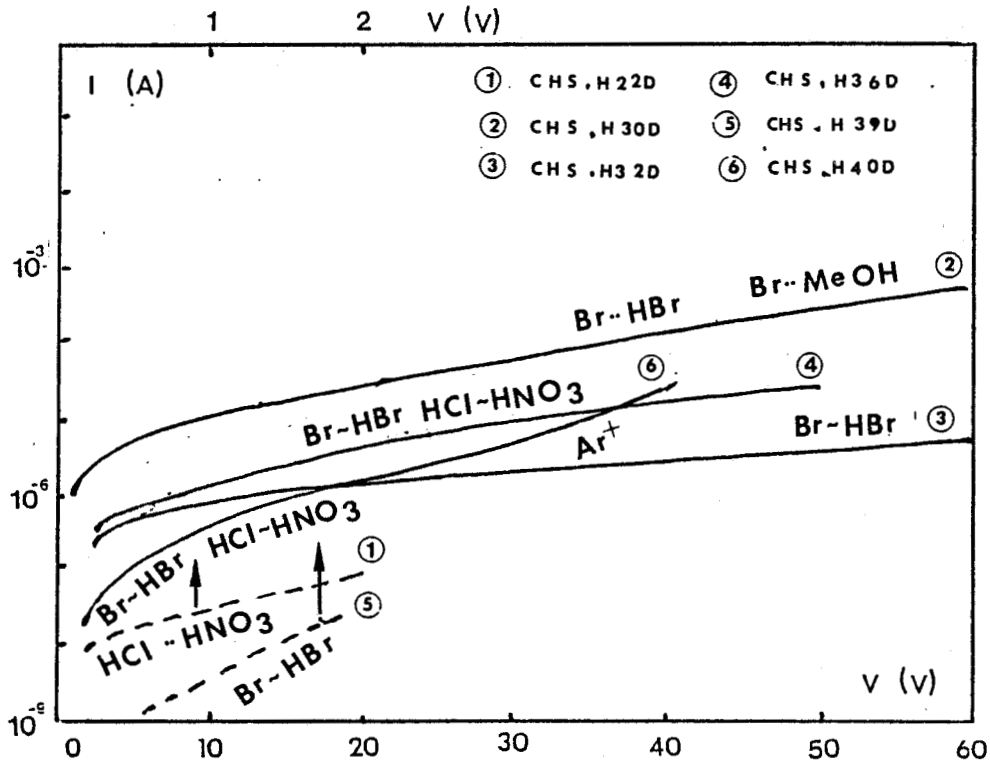


Fig.103 - Caractéristiques $I(v)$ pour différentes séries

On remarque que, si les ordres de grandeur de courant initial dépendent fortement des modes ou des solutions de gravure, les valeurs finales ne dépendent plus que de la structure des épitaxies traitées.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec les épitaxies Laser (Th 1959) et IMPATT (Th 572, (Th 816) et Th 1131).

Remarque :

Au cours de cette étude, nous avons constaté que les diodes à hétérostructure GaInAs/InP sont très sensibles à l'environnement extérieur et que les diodes non passivées présentent un courant de fuite qui croît avec le temps. Nous donnons à la figure 104 deux paliers de

courant relevés pour la même diode de la série CHS.H32D en l'espace de quelques heures. Pour éviter ces évolutions, nous procédons à la passivation systématique des diodes. La silice et le polyimide s'avèrent être efficaces ; un exemple de caractérisation de diodes (série CHS.H40D) passivées (P) et non passivées (NP) est donné sur la même figure.

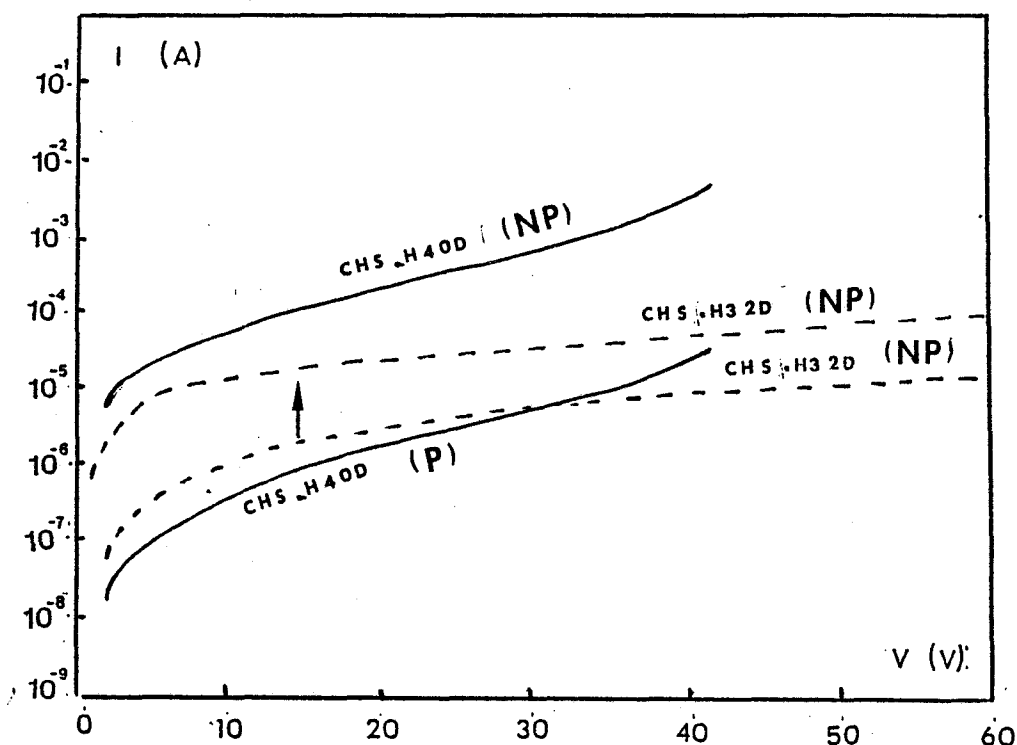


Fig.104 - Evolution des caractéristiques pour des diodes non passivées

V.2.2.2. Dispersion des caractéristiques

Comme on peut le constater sur les figures 105, 106 et 107, la dispersion des caractéristiques $I(v)$ liée à la technologie d'élaboration du composant est relativement peu importante pour des diodes de la même série.

On peut également remarquer que la dispersion liée à hétéroépitaxie (Tableau XV) est assez importante pour obtenir un bon rendement de fabrication.

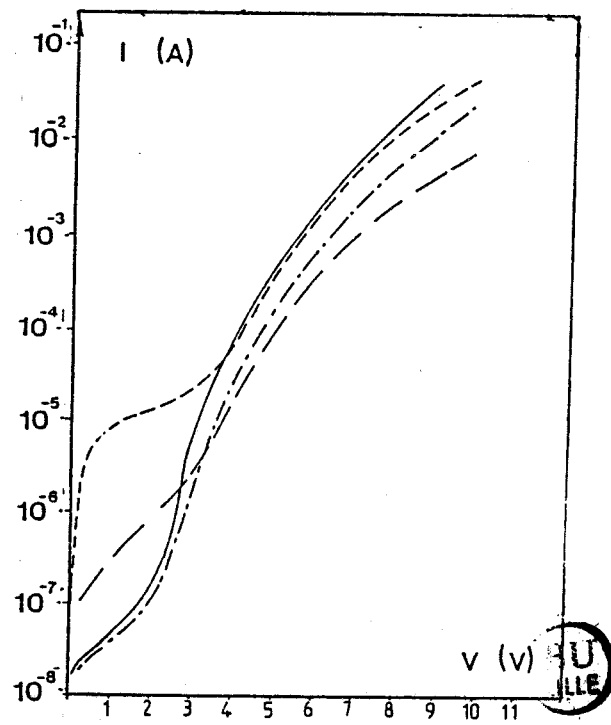


Fig.105 - Caractéristiques $I(v)$ pour différentes diodes de la série CHS.H22D

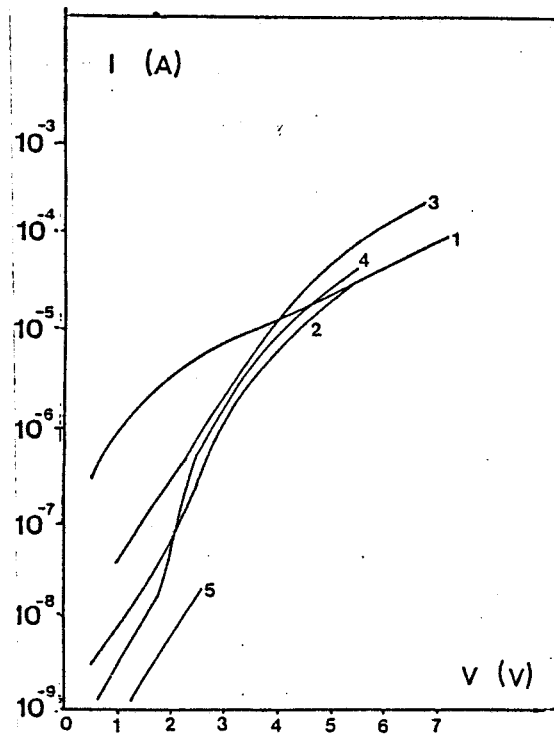


Fig.106 - Caractéristiques $I(v)$ pour différentes diodes de la série CHS.H39D

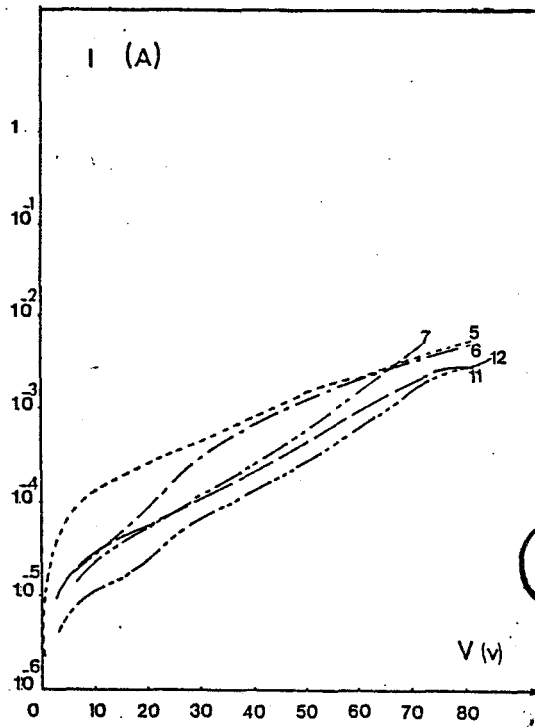
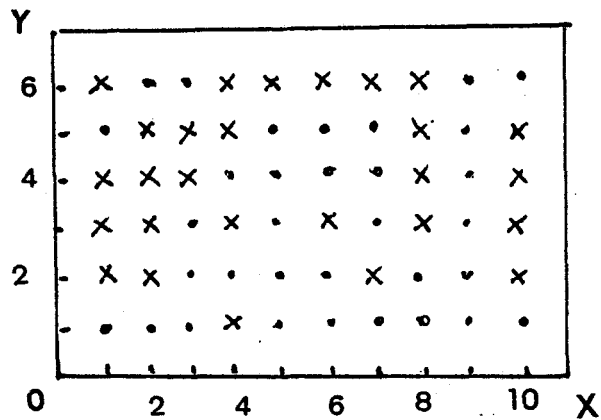


Fig. 107 - Caractéristiques $I(v)$ pour différentes diodes de la série CHS.H30D

TABLEAU XV

Plaquette Th 1131



$\eta \sim 50\%$



DIODES	$S = 0.9 \cdot 10^{-4} \text{cm}^2$	
(X, Y)	V (v)	
	$2 \mu\text{A}$	$10 \mu\text{A}$
(1,1)	25	30
(3,1)	30	36
(5,1)	33	38
(7,1)	29	35
(9,1)	-	56
(1,2)	-	6
(3,2)	30	36
(5,2)	32	36
(7,2)	16	28
(9,2)	31	36
(1,3)	15	22
(3,3)	31	36
(5,3)	28	35
(7,3)	28	35
(9,3)	36	41
(1,4)	6	18
(3,4)	4	15
(5,4)	32	36
(7,4)	23	28
(9,4)	35	41
(1,5)	35	40
(3,5)	5	11
(5,5)	25	30
(7,5)	38	42
(9,5)	34	41
(1,6)	15	20
(3,6)	30	34
(5,6)	2	2
(7,6)	2	5
(9,6)	25	30

DIODES	$S = 2.3 \cdot 10^{-4} \text{cm}^2$	
(X, Y)	V (v)	
	$2 \mu\text{A}$	$10 \mu\text{A}$
(2,1)	30	36
(4,1)	-	5
(6,1)	36	43
(8,1)	23	28
(10,1)	34	41
(2,2)	-	22
(4,2)	34	38
(6,2)	25	35
(8,2)	37	44
(10,2)	14	30
(2,3)	10	28
(4,3)	20	35
(6,3)	-	4
(8,3)	15	20
(10,3)	7	9
(2,4)	5	18
(4,4)	34	35
(6,4)	32	37
(8,4)	17	26
(10,4)	10	17
(2,5)	13	25
(4,5)	1	2
(6,5)	26	35
(8,5)	2	15
(10,5)	1	2
(2,6)	28	38
(4,6)	1	3
(6,4)	-	-
(8,6)	17	25
(10,6)	32	42

V.2.2.3. Etude en fonction de la température

Cette étude permet de mettre en évidence les différentes composantes du courant. Les variations typiques des caractéristiques $I(V)$ avec la température sont représentées pour chaque hétérostructure sur les figures 108 à 112.

Pour la série CHS.H22D, les variations des caractéristiques $I(v)$ en fonction de la température montrent deux composantes de courant bien distinctes :

- un courant de type générateur recombinaison où on constate une variation rapide avec la température pour $V < 3V$,
- un courant purement tunnel dont la variation est très peu sensible avec la température pour $V > 3V$.

L'étude des courants génération-recombinaison et tunnel est effectuée par ailleurs [10], [11]. A signaler simplement que cette forte composante tunnel provient d'un dopage trop élevé du GaInAs.

Pour la série CHS.H39D, on observe une même allure de courbes que pour la série précédente. Toutefois, les composantes génération recombinaison observées pour $V < 2V$ sont moins bien marquées par les variations de température : le masquage serait dû à un courant de fuite résiduelle. Quant aux composantes tunnel, elles sont dûes à un niveau de dopage trop élevé de la zone d'avalanche.

Pour les séries CHS.H30D, H32D et H36D, si les paliers de génération-recombinaison sont bien mis en évidence, les claquages destructifs prématurés des diodes à des "puissances" relativement faibles ($80V < V < 100 V$, $1 mA < I < 5 mA$) ne permettent pas la mise en évidence du phénomène d'avalanche. Des mesures effectuées en impulsions courtes aboutissent au même résultat. On peut donc penser que le claquage destructif n'est pas engendré par un effet thermique mais par un effet de champ électrique dû au confinement de la structure, comme nous l'avons souligné précédemment.

Pour la série CHS.H40D, deux types d'évolutions intéressantes des caractéristiques $I(v)$ avec la température ont pu être notées.

Le premier type d'évolution fait apparaître :

- un courant de type génération recombinaison pour $v < 30V$
- un courant de type tunnel pour $V > 30V$
- un effet de température positif caractéristique du phénomène d'avalanche à la température de $- 170^{\circ}C$

Le deuxième type d'évolution présente :

- un courant uniquement tunnel pour $V < 45V$
- un courant d'avalanche pour $V > 45V$, aux basses températures. A noter que l'effet de température positif est ici beaucoup plus marqué que dans le cas précédent.

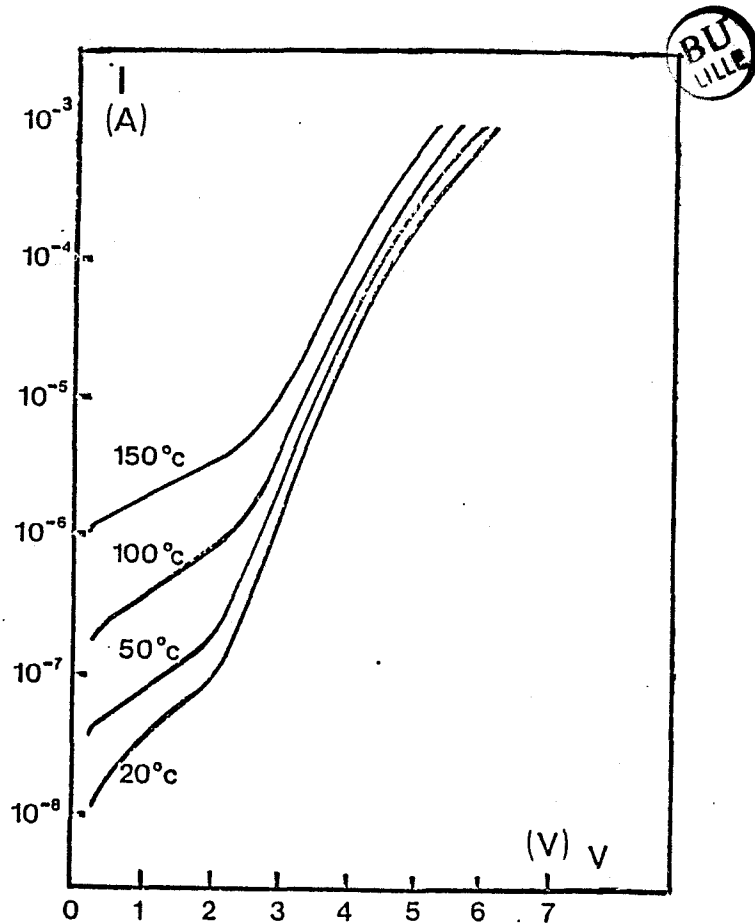


Fig.108 - Série CHS.H22D

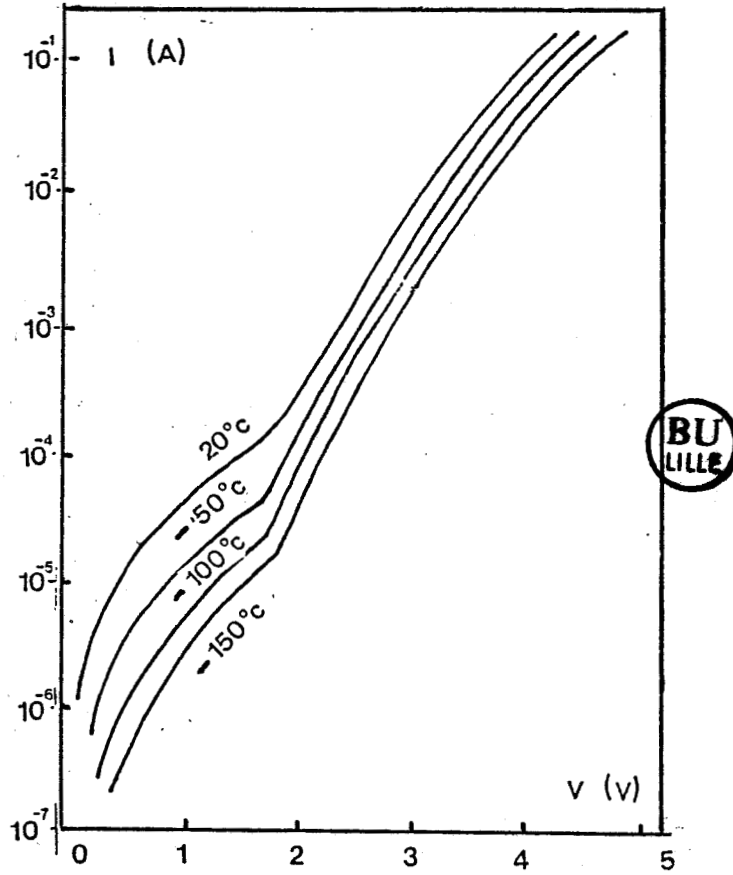


Fig. 109 - Série CHS.H39D

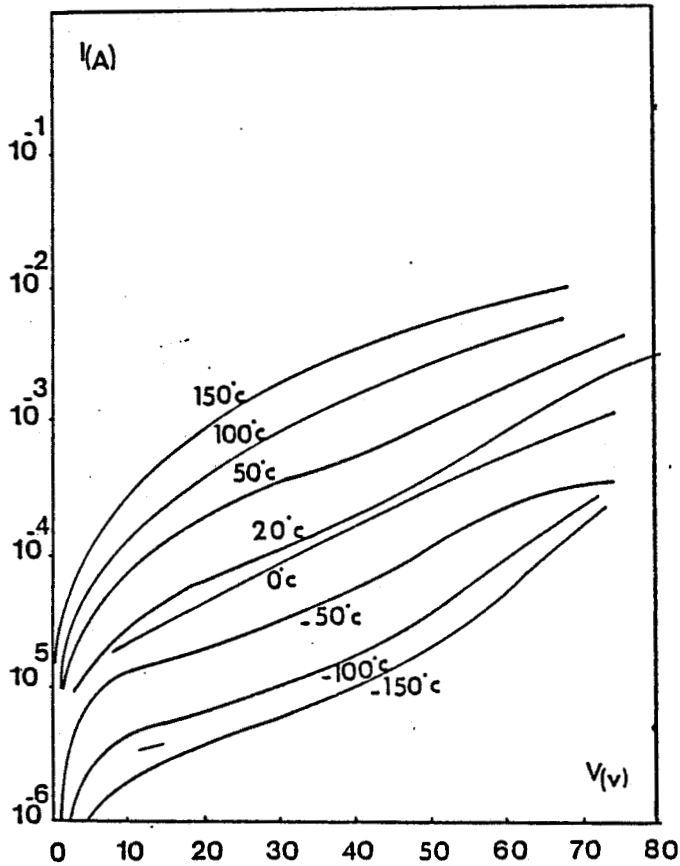


Fig. 110 - Série CHS.H30D

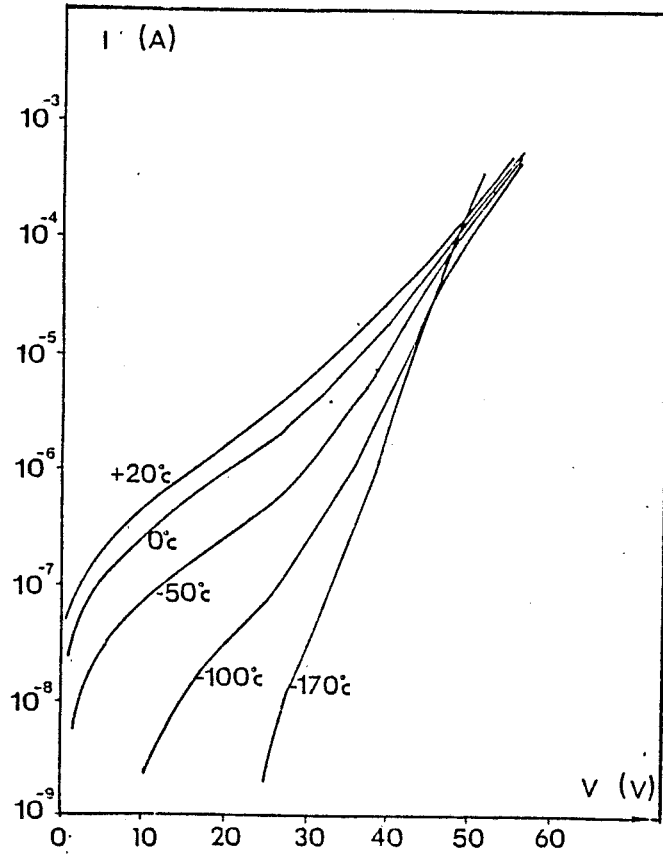


Fig. 111 - Série CHS.H40D

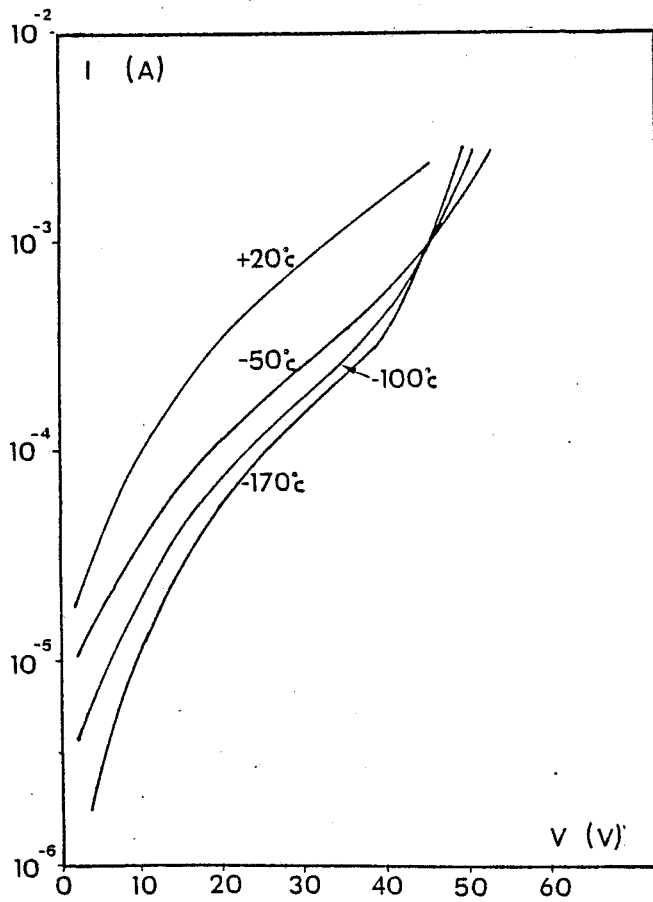


Fig. 112 - Série CHS.H40D

V.2.3. RESISTANCES SERIE ET THERMIQUE

Pour clore cette étude expérimentale sur les diodes à hétérostructure élaborées en structure normale, nous pensons qu'il est utile de connaître les résistances série et thermique qui peuvent servir de paramètres de comparaison pour des éventuelles améliorations ultérieures. Des mesures effectuées sur les séries CHS.H40D et CHS.H22D donnent respectivement des valeurs de 2,6 Ω pour les résistances séries et 90°C/W pour les résistances thermiques. Si ces valeurs sont raisonnables à ce stade d'expérimentation, elles doivent être réduites au moins d'un tiers pour une possible utilisation comme oscillateur, de diodes à hétérostructure.

CONCLUSION

Les études expérimentales, en particulier, les nombreuses caractérisations effectuées sur plusieurs séries de diodes nous ont permis de mettre au point une technologie d'élaboration de composants sur GaInAs/InP en structure Mesa.

Au cours de cette étude, nous avons :

- montré qu'il est possible de réduire notablement les courants de fuite superficiels par l'utilisation de solutions de gravure, de nettoyages et de techniques de passivation appropriées;

- mis en évidence l'existence aux basses températures d'un coefficient de température négatif caractéristique du phénomène d'avalanche;

- estimé l'importance des résistances de contact, série et thermique du composant en structure Mesa normale.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail est relatif d'une part à la mise au point de technologies spécifiques pour élaborer des diodes IMPATT à haut rendement et, d'autre part, à la caractérisation aussi complète que possible de ces diodes en vue d'optimiser les épitaxies nécessaires à leur réalisation.

Pour graduer et bien dégager les problèmes spécifiques de la technologie, nous avons réalisé dans une première étape des diodes IMPATT GaAs à barrière métal-semiconducteur, puis dans une seconde étape des diodes IMPATT à hétéro-jonction du type GaInAs/InP.

En ce qui concerne les diodes IMPATT GaAs, l'étude expérimentale a confirmé la maîtrise des opérations technologiques de base :

- obtention de bons contacts ohmiques sur GaAs de type N
($\rho_c \sim 5 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$)
- obtention de bonnes barrières métal semiconducteur
($0,8 \text{ V} \leq \phi_{Bn} \leq 0,9 \text{ V} - n \sim 1,1$)
- mise en place d'un radiateur intégré et amincissement du substrat
($e \sim 30 \mu\text{m} - 60 \text{ }^\circ\text{C/W} \leq R_{Th} < 100 \text{ }^\circ\text{C/W}$ suivant les surfaces utilisées).
- gravure "Mesa" profonde et homogène.

L'application de cette technologie de montage "inversé" a permis la réalisation de diodes oscillant à 9 GHz et délivrant 200 mW avec un rendement de 8%.

Bien que modestes par rapport aux performances des composants industriels, ces résultats confirment notre maîtrise de la techno-

logie, et ce d'autant plus que les quelques épitaxies dont nous disposions n'étaient pas optimales pour obtenir des résultats spectaculaires en bande X.

En ce qui concerne les hétérostructures GaInAs/InP, nous avons rencontré de nombreuses difficultés liées à l'approvisionnement en matériaux, en imperfections de ces matériaux, dans la mise au point d'une technologie appropriée.

Dans une première étape, nous avons cherché à élaborer des composants tests destinés à caractériser aussi complètement que possible l'hétéro-structure GaInAs/InP et vérifier sa conformité avec les prévisions théoriques. Cette démarche a permis la mise au point des procédures d'attaque des divers matériaux en présence et de réaliser des contacts ohmiques sur les matériaux de type N et P.

Dans la seconde étape, nous avons abordé la réalisation du montage "inversé" en étudiant l'implantation du radiateur intégré et l'amincissement de l'InP.

Les composants réalisés ont permis surtout de préciser les caractéristiques de l'hétérostructure et de mettre en évidence ses imperfections. La réalisation de composants fiables et performants passe donc non seulement par l'amélioration de la technologie de montage (amélioration des contacts ohmiques sur InP-P, meilleur contrôle de la gravure), mais également par une meilleure maîtrise de l'épitanie, notamment en ce qui concerne le plan de la jonction et le dopage des diverses zones de l'hétérostructure.

Ces objectifs sont toutefois réalistes et permettent d'espérer le développement de ces hétérostructures et le développement de la filière InP en ondes millimétriques.

BIBLIOGRAPHIE

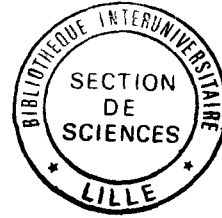
- [1] CHIN R., HOLONYAK N., KOLBAS R.M., ROSSI J.A., KEUNE D.L.
et GROVES W.O.
Single thin-active-layer visible-spectrum $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}_{1-z}\text{As}_z$
heterostructure lasers.
J.A.P. Vol 49, n° 4, pp. 2551-2556, Avr. (1978)
- [2] WIEDER H.H.
Fermi level and surface barrier of $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ alloys
A.P.L. vol. 38, n° 3, pp. 170-171, Fév. (1981)
- [3] NAHORY R.E., POLLACK M.A., JOHNSTON W.D. et BARNS R.L.
Band gap versus composition and demonstration of Vegard's law
for $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ lattice matched to InP
A.P.L., vol. 33, n° 7, pp. 659-661, Oct. (1978)
- [4] NAKAJIMA K., YAMAGUCHI A., AKITA K. et KOTANI T.
Composition dependance of the band gaps of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$
quaternary solids lattice matched on InP substrates.
J.A.P. vol. 49, n° 12, pp. 5944-5950, Déc. (1978)
- [5] NICHOLAS R.J., PORTAL J.C., HOULBERT C. PERRIER P.
PEARSALL J.P.
An experimental determination of the effective masses for
 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ alloys
A.P.L. Vol. 34, n° 8, pp. 492-494, Avr. (1979)
- [6] ADACHI S.
Material parameters of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ and related binaries
J.A.P. vol 53, n° 12, pp. 8775-8792, Déc. (1982)

- [7] FORREST S.R., LEMENY R.F., NAMORY R.E. et POLLACK M.A.
 $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ photodiodes with dark current limited by
 generation-recombinaison and tunnelling
 A.P.L. vol 37, n° 3, pp. 322-325, Août (1980)
- [8] FORREST S.R., KIM O.K. et SMITH R.G.
 Analysis of the dark current and photoresponse of
 $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InP}$ avalanche photodiodes
 S.S.E. vol. 26, n° 10, pp. 951-968, (1983)
- [9] J.C. DEJAEGER
 Structures à hétérojonctions pour la conception de diodes à
 avalanche et temps de transit à très haut rendement.
 Thèse d'Etat, Lille, Juillet (1985)
- [10] R. KOZLOWSKI
 Un nouveau dispositif semiconducteur avalanche et temps de
 transit : l'hétérostructure GaInAs/InP
 Thèse 3ème cycle, Lille, Juillet (1985)
- [11] J.C. DE JAEGER, R. KOLOWSKI, G. SALMER, L. RACZY,
 J. VANBREMEERSCH, BOUN THAO
 Composants IMPATT à hétérostructures GaInAs/InP
 1er rapport partiel contrat DRET N° 81-486 Mai 1982
 2er " " " " " " Juillet 1983
 3è " " " " " " Février 1983
 4è " " " " " " Juin 1983
 5è rapport final.
 Rapport de contrat DRET N° 81-486 (1982)
- [12] READ (WT),
 A proposed high frequency negative resistance diode.
 Bell. Syst. Tech. J., Vol. 37, n° 2, pp. 401-446, Mars (1958)

- [13] MISAWA (T)
Negative resistance in p-n junctions under avalanche breakdown conditions.
IEEE Trans. Electron Devices, ED.13, pp. 137-151 (1966)
- [14] E. CONSTANT, J.M. MARTINACHE, A. VANOVERSCHELDE, A. SEMICHON,
J. MICHEL, R. DESSERT
Etude théorique et expérimentale de l'avalanche dans une structure Métal Semiconducteur. Application à la réalisation de composants actifs en hyperfréquences.
Rapport de contrat DGRST, n° 6801363, 6801364 (1966)
- [15] W. FAWCETT, G. HILL
Temperature dependance of the V(E) characteristic of electron in InP
E.L. Vol., 11 n° 4, pp. 80-81, Fev. 1975
- [16] PEARSALL T.P.
GaInAsP alloys semiconductors
Ed. John Wiley and Sons (1982)
- [17] J. PRIBETICH
Recherche théorique et expérimentale de structure à avalanche et temps de transit à l'arséniure de gallium pour la réalisation d'oscillateurs hyperfréquences à très haut rendement.
Thèse d'Etat, Lille, Janv. (1979)
- [18] E. ALLAMANDO
Etude théorique et expérimentale des dispositifs à avalanche et à temps de transit. Principales applications en hyperfréquences.
Thèse d'Etat, Lille, Déc. (1973)

- [19] A. FARRAYRE, D. MEIGNANT et B. TOURATIER
Fiabilité des diodes à avalanche haut rendement au GaAs.
Symposium sur les composants hyperfréquences au-delà de 6 GHz.
OTAN-BRUXELLES, 23 et 24 janvier 1978
- [20] RAZEGHI M. BEUCHET G., LEGUEN D., THEBAULT P.
et DUCHEMIN J.P.
Etude et caractérisation de l'hétérojonction $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}/\text{InP}$
pour diodes IMPATT.
Rapport final de contrat DRET n° 81-34-552, Avr. (1983)
- [21] T.P. PEARSALL
Impact ionization rates for electrons and holes in
 $\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$
A.P.L. Lett., vol.36, n°3, pp. 218-220, Fév. (1980)
- [22] G.E. STILLMANN, C.M. WOLFE, K.A. ROSSI et A.G. FOYT
Unequal electron and hole impact ionization coefficients
in GaAs.
A.P.L. Vol. 24, n° 10, pp. 471-474, Mai (1974).
- [23] CHUNG-WHEI KAO et C.R. CROWELL
Impact ionization by electrons and holes in InP.
S.S.E., vol. 23 n° 8, pp. 881-891 (1980)
- [24] A.G. MILNES et D.L. FEUCHT
Heterojunctions and Metal-Semiconductor junction
Academic press (1972)
- [25] G. GIBBONS and T. MISAWA
Temperature and current distribution in an avalanching
P-N junction.
S.S.E., Vol: 11 (1968)

- [26] S.M. SZE
Physics of Semiconductor Devices
Ed. John Wiley and Sons, New York, (1969)
- [27] C.Y. CHANG, Y.K. FANG and S.M. SZE
Specific contact resistance of metal semiconductor barriers.
S.S.E., Vol. 14, n° 7-B, pp. 541-550 (1971)
- [28] PATRICE ARSENE-HENRY
Eléments de technologie des transistors à effet de champ
de puissance à l'arséniure de gallium fonctionnant en
hyperfréquences.
Thèse Docteur Ingénieur, Lille, Sept. (1982)
- [29] H.H. BERGER
Contact resistance and contact resistivity
J. Electrochem. Soc. Solid-State Science, 119 pp. 507-514
Avr.(1972).
- [30] LIU CHANG YAN
Technologie des contacts métal semiconducteur. Application à
la réalisation de modulateurs et de limiteurs hyperfréquences
sur arséniure de gallium.
Thèse Docteur de l'Université, Lille, Juil. (1982)
- [31] M. HEIBLUM et al
Characteristics of AuGeNi ohmic contacts to GaAs
S.S.E. 25, pp. 185-195 (1982)
- [32] H.C. NATHANSON et Al.
Future of systems dependant on wafer availability.
M.S.N., pp. 37-56, Juin (1980)



RESUME

Les progrès importants réalisés dans la technologie d'élaboration des matériaux semi-conducteurs, en particulier en ce qui concerne la réalisation d'épitaxies associant des couches alternées de matériaux de nature différente, permettent d'envisager, par la mise en oeuvre d'hétérostructures appropriées, des améliorations notables des performances en puissance et en rendement des diodes à avalanche et temps de transit (IMPATT).

L'hétérostructure GaInAs/InP apparaît potentiellement intéressante de ce point de vue.

Mais si les prévisions théoriques sont encourageantes, il faut noter que l'amélioration effective des performances en puissance et en rendement est conditionnée par la technologie d'élaboration et de montage du composant proprement dit.

C'est essentiellement ce point de vue qui a été abordé par l'auteur dans ce mémoire. Pour graduer et bien dégager les problèmes spécifiques de la technologie, il envisage dans un premier temps la réalisation de diodes IMPATT à barrière métal-semiconducteur en GaAs susceptibles d'osciller en bande X, puis dans une seconde étape la réalisation de diodes IMPATT à hétéro-jonctions du type GaInAs/InP.

Les principaux problèmes technologiques sont abordés et analysés en vue d'établir des protocoles fiables d'élaboration de diodes IMPATT. L'auteur s'intéresse particulièrement à la réalisation de contacts Schottky et ohmiques, à la gravure des matériaux, à l'aminçissement des substrats et à la mise en place de radiateurs intégrés pour améliorer les performances des dispositifs.

Les études expérimentales et les nombreuses caractérisations des composants réalisés permettent de conclure sur la faisabilité des dispositifs, mais de nombreuses difficultés subsistent pour atteindre les performances théoriques.

MOTS CLES : diodes IMPATT - Technologie MESA - GaAs -
Hétérojonctions GaInAs/InP.