



HAL
open science

Photodétecteurs à base de Ga $_{1-x}$ Al $_x$ Sb dans la gamme 1,3-1,6 μm

L. Gousskov, M. Boustani, G. Bougnot, C. Gril, A. Joullié, P. Salsac, F. de
Anda

► **To cite this version:**

L. Gousskov, M. Boustani, G. Bougnot, C. Gril, A. Joullié, et al.. Photodétecteurs à base de Ga $_{1-x}$ Al $_x$ Sb dans la gamme 1,3-1,6 μm . *Revue de Physique Appliquée*, 1983, 18 (12), pp.781-788. 10.1051/rphysap:019830018012078100 . jpa-00245147

HAL Id: jpa-00245147

<https://hal.science/jpa-00245147>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
 Physics Abstracts
 73.40 — 86.30

Photodétecteurs à base de $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ dans la gamme 1,3-1,6 μm (*)

L. Gousskov, M. Boustani, G. Bougnot, C. Gril,

Centre d'Electronique de Montpellier (CEM), Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 34060 Montpellier Cedex, France

A. Joullie, P. Salsac,

Equipe de Microoptoélectronique de Montpellier (EM²), Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 34060 Montpellier Cedex, France

et F. de Anda

Institut Polytechnique, Mexico, Mexique

(Reçu le 25 juillet 1983, révisé le 9 septembre, accepté le 19 septembre 1983)

Résumé. — Deux types de photodétecteurs à $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ ($x \sim 0,17$) ont été fabriqués et caractérisés : des diodes méso diffusées Zn p^+/n et des hétérojonctions oxyde d'indium dopé étain (ITO)/ $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ n. L'alliage ternaire $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ était fabriqué par épitaxie en phase liquide sur des substrats de GaSb. Pour les diodes p^+/n le courant inverse peut être attribué à l'effet tunnel assisté par des pièges, il a pour valeur $6 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ à -1 V ($N_d - N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). La sensibilité de ces diodes dépend fortement de la profondeur de la jonction, elle est voisine de 0,32 A/W pour une profondeur de 0,5 μm . Les diodes ITO/ $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ sont très analogues à des diodes Schottky. Le claquage se situe vers -15 V à 300 K pour $N_d - N_a = 7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $J_{\text{inv}}(-1 \text{ V}) = 1,7 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$. L'efficacité quantique est de 0,5 juste au-dessus du gap, le maximum de réponse spectrale se situe dans le visible. La discussion de ces résultats conduit à conclure que l'amélioration de ces dispositifs implique la diminution du niveau de dopage de la zone active.

Abstract. — Two types of photodetectors involving the ternary alloy $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ ($x \sim 0.17$) have been fabricated and characterized : Zn diffused p^+/n $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ mesa diodes and Sn doped indium oxide (ITO)/ $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ n heterojunctions. The $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ ternary alloy was grown by liquid phase epitaxy on GaSb substrates. For p^+/n diodes the reverse current can be attributed to tunnelling through traps, it is about $6 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ at -1 V for $N_d - N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. The sensitivity of these diodes is strongly dependent on the depth of the junction, it is near 0.32 A/W for a 0.5 μm deep junction.

ITO/ $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ diodes are very similar to Schottky diodes. The breakdown occurs near -15 V at 300 K for $N_d - N_a = 7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $J_{\text{inv}}(-1 \text{ V}) = 1.7 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$. The spectral response of the quantum efficiency is about 0.5 just below the gap, its maximum appears in the visible range. The discussion of the results leads to the conclusion that these devices may be improved by a decrease of the doping level of the active region.

1. Introduction.

Plusieurs matériaux semiconducteurs retiennent actuellement l'attention en vue de l'élaboration de photodétecteurs dans le proche infrarouge. 1,3 et 1,55 μm , gamme de longueurs d'onde intéressant la

transmission par fibre optique. Parmi eux, les alliages III-V GaInAsP épitaxiés sur InP sont les plus développés et présentent de très bonnes performances [1]. Cependant le rapport des coefficients d'ionisation des trous et des électrons β/α dans ces matériaux est faible (0,83) d'où une valeur élevée du facteur d'excès de bruit et par suite un faible rapport signal/bruit en régime d'avalanche [2].

(*) Travail soutenu par la DAI et la D.G.R.S.T.

L'intérêt de l'alliage ternaire III-V $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ réside dans le fait qu'il associe une bande interdite à transition directe pour $0 < x < 0,165$ d'énergie comprise entre 0,73 et 0,92 eV (soit 1,7 à 1,35 μm) et un rapport β/α présentant un maximum égal à 20 [3-4] provenant d'un effet résonnant lorsque l'énergie de l'éclatement spin-orbite Δ_0 est égale à celle de la bande interdite directe E_0 . La figure 1 présente les variations des bandes interdites Γ , L et X et du rapport Δ_0/E_0 en fonction de la composition x en aluminium de $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ à 300 K [5]. Hildebrand *et al.* [3-4] fixent à 0,065 la valeur de x à la résonance alors que la figure 1 la situerait plutôt vers $x = 0,02$.

L'alliage II-VI CdHgTe présente un effet de résonance analogue dans la gamme de longueur d'onde 1,3-1,6 μm . C'est la raison pour laquelle il constitue également un matériau intéressant pour la photodétection en régime d'avalanche.

Nous décrivons ici nos premiers résultats concernant deux types de structures photodétectrices utilisant l'alliage ternaire $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$. Ces deux structures sont élaborées à partir de couches de GaAlSb épitaxiées en phase liquide sur des substrats de GaSb . Dans la gamme de composition correspondant à une bande interdite à transition directe, le désaccord de maille de l'alliage par rapport à GaSb n'excède pas $1,1 \times 10^{-3}$ ce qui autorise une très bonne épitaxie. Les deux structures étudiées sont les suivantes :

- photodiode mesa à homojonction p^+n à GaAlSb
- photodiode à hétérojonction $\text{In}_2\text{O}_3(\text{Sn})/\text{GaAlSb}$.

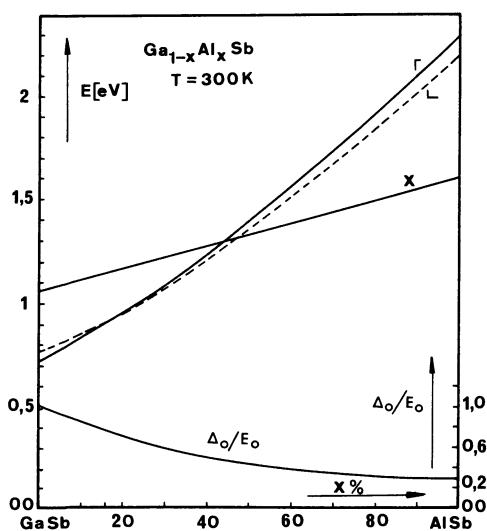


Fig. 1. — Variations des diverses énergies de bandes interdites en fonction de la composition x en aluminium de $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$. Variation du rapport Δ_0 (énergie de l'éclatement spin-orbite)/ E_0 (énergie de bande interdite directe) en fonction de x .

[Band gap energies versus Al composition x in $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$. Δ_0/E_0 versus x ; Δ_0 spin orbit splitting energy; E_0 : direct band gap energy.]

2. Photodiodes mesa p^+n à GaAlSb .

En régime d'avalanche, le facteur de bruit minimum est associé aux porteurs dont le coefficient d'ionisation est maximum. Pour GaAlSb où $\beta > \alpha$, il importe que la multiplication intéresse les trous d'où le choix d'une structure p^+n .

2.1 ELABORATION. — Le substrat de GaSb , d'orientation (111) B, est fortement dopé au tellure : $n = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

La couche n ternaire est réalisée par épitaxie en phase liquide (EPL) à 550 °C avec $x \leq 0,17$ et avec, dans certains cas, une couche tampon n^+ . Le dopage n de la couche est produit par introduction de tellure dans la solution par l'intermédiaire de GaSb dopé Te; le tellure doit assurer la compensation des accepteurs résiduels et un dopage n optimum pour la photodétection. La concentration en tellure dans la solution est évaluée à partir du coefficient de ségrégation $k \simeq 12$ du tellure dans GaAlSb ($x \simeq 0,2$, T épitaxie = 550 °C) [6-7-8] afin d'obtenir un dopage n voisin de 10^{16} cm^{-3} . L'épaisseur des couches est comprise entre 5 et 10 μm . La couche p^+ est ensuite formée par diffusion de zinc à partir d'une source gazeuse, en ampoule scellée, à 510 °C. Elle présente une densité d'accepteurs très élevée, évaluée par analyse à la microsonde ionique à 10^{20} cm^{-3} . La profondeur de jonction peut être ajustée à des valeurs supérieures ou égales à 0,5 μm en agissant sur la durée de diffusion. Les contacts ohmiques avant et arrière sont réalisés respectivement par évaporations d'alliages Au-Zn et Au-Ge, suivies de recuit à 350 °C. Les mesas de diamètres 300, 220 ou 150 μm sont réalisées par photolithographie et gravure au KCl (2 HCl , 1 CH_3COOH , 2 H_2O_2).

La base est soudée sur un boîtier TO5 et le contact supérieur est assuré par collage d'un fil d'or à la résine epotek.

2.2 CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES ET PHOTOÉLECTRIQUES. — Les caractéristiques capacité-tension montrent que les jonctions sont abruptes avec des valeurs $N_d - N_a$ variant entre 10^{16} et $1,2 \times 10^{17}$ et des potentiels de diffusion V_d voisins de 0,75 V. La figure 2 montre une dispersion non négligeable des mesures pour des diodes d'une même plaquette épitaxiée. Les caractéristiques $I - V$ à l'obscurité en direct sont données sur la figure 3. La variation du courant suit la loi exponentielle $I = I_0 e^{qV/nkT}$ sur environ trois modules avec n voisin de 2.

Les caractéristiques inverses font apparaître un claquage doux pour des tensions variant entre - 2 et - 5 V. Les densités de courant inverse observées à - 1 V sont de 10^{-2} A/cm^2 pour $N_d - N_a = 1,2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ et de $6 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ pour $N_d - N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (Fig. 4).

Pour un dopage voisin de 10^{17} cm^{-3} , le transport inverse a pu être attribué à un effet tunnel assisté par

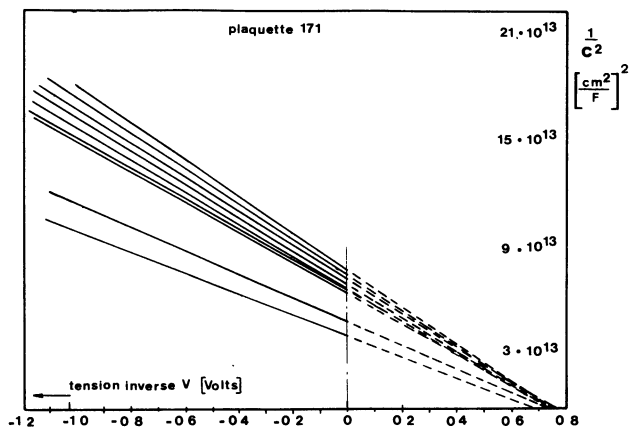


Fig. 2. — Caractéristiques $C^{-2} = f(V)$ pour des diodes à homojonction p^+/n tirées d'une même plaquette épitaxiée.
 [$C^{-2} = f(V)$ for p^+/n homojunctions made on the same $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ epitaxial layer.]

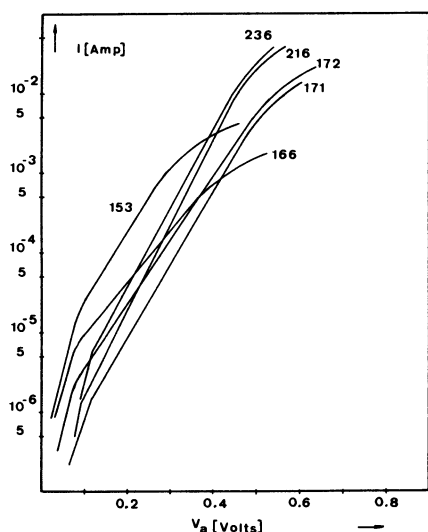


Fig. 3. — Caractéristiques directes $I - V$ à 300 K pour des diodes à homojonction tirées de plusieurs plaquettes épitaxiées.
 [Direct $I - V$ characteristics at 300 K of homojunctions made on various epitaxial layers.]

pièges [9]. Le courant inverse varie alors suivant la loi

$$I = AK_1 E_t^{-1/2} V'^{3/2} \exp - \frac{K_2 E_t^{3/2}}{V'^{1/2}}$$

où E_t désigne la hauteur de la barrière tunnel au niveau du piège assurant la transition tunnel, $V' = V_d + V$; K_1 et K_2 sont des coefficients dépendant du dopage, obtenus en admettant les mêmes expressions que pour l'effet tunnel bande à bande. La

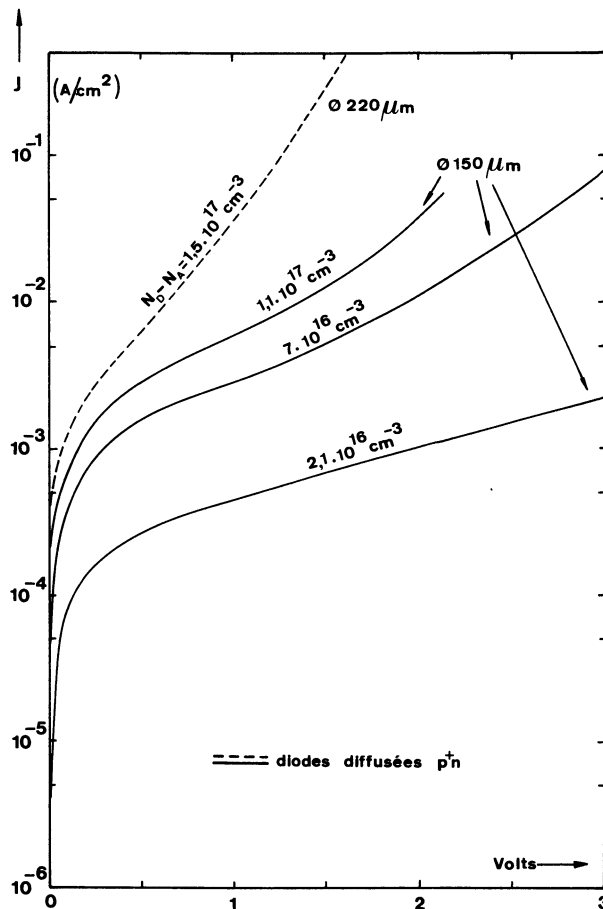


Fig. 4. — Caractéristiques inverses d'homojonctions p^+/n pour divers dopages n .
 [Reverse $I - V$ characteristics of p^+/n homojunctions with various n doping level.]

figure 5 montre le bon accord des résultats expérimentaux avec la loi ci-dessus à deux températures 77 et 300 K. Pour une énergie de piège présentant un coefficient de température α

$$E_t(T) = E_t(77) - \alpha(T - 77).$$

La figure 5 permet de déterminer $\alpha/E_t(77) = 1,94 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, valeur comparable à la valeur $3,68 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ déterminée par Tabatabaie [9] sur des jonctions $p^+ n$ implantées Be.

A très faible polarisation inverse, le courant n'est pas dominé par cet effet tunnel assisté par pièges, il est probablement dû à des fuites en surface car les diodes n'ont subi aucune passivation.

Les réponses spectrales de diverses diodes $p^+ n$ sont représentées sur la figure 6. Ces réponses sont identiques à polarisation nulle et à -1 V . Après un flanc abrupt correspondant au seuil d'absorption, le maximum de sensibilité est atteint; on observe un plateau suivi à haute énergie d'une décroissance. La hauteur maximum varie exponentiellement avec la profondeur

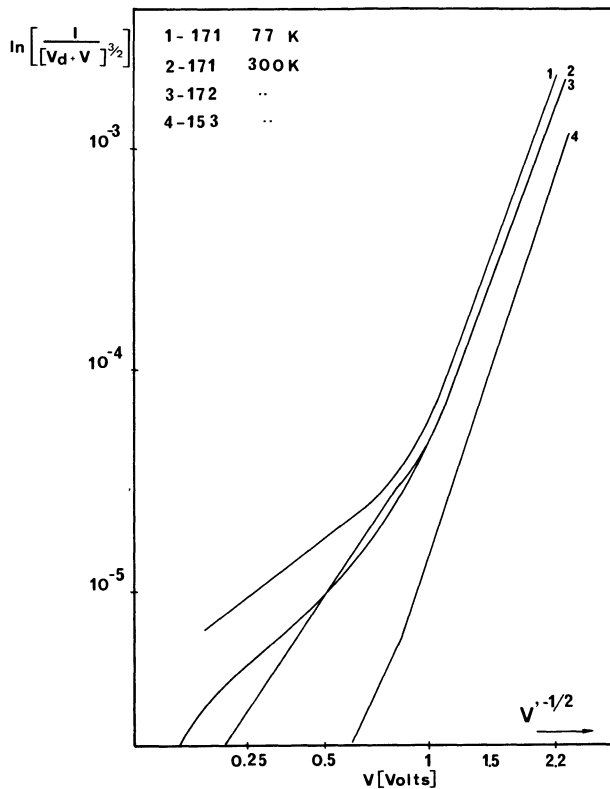


Fig. 5. — Variations de $I_{inv}/V^{3/2}$ en fonction de $V'^{-1/2}$ d'une diode p⁺/n GaAlSb. $V' = V_d + V$; V : tension inverse appliquée.

[Variations of $I_{reverse}/V^{3/2}$ versus $V'^{-1/2}$ for a p⁺/n GaAlSb diode. $V' = V_d + V$; V : reverse applied voltage.]

de la jonction en accord avec un modèle dans lequel tous les photoporteurs seraient générés dans la zone de charge d'espace et dans la base, la couche p⁺ ne jouant qu'un rôle de filtre. La figure 7 montre la variation relative du rendement maximum en fonction de cette profondeur de jonction x_j . Le coefficient d'absorption α qui s'en déduit est de 10^4 cm^{-1} à $1,3 \mu\text{m}$ pour $x = 0,17$ (ce qui est du même ordre de grandeur que les évaluations déduites d'interpolation des courbes d'absorption optique).

3. Hétérojonctions In₂O₃ dopé Sn(ITO)/GaAlSb.

Les hétérojonctions mettant en œuvre l'oxyde métallique conducteur In₂O₃ dopé Sn ont été largement développées dans le domaine de la conversion photovoltaïque solaire [10-11]. L'intérêt de l'ITO réside dans le fait qu'il réalise simultanément la zone n de la jonction et l'électrode conductrice, transparente et antireflet. Cependant l'absorption par porteurs libres qui devient dominante dans l'infrarouge peut diminuer les qualités optiques des couches d'ITO dans le

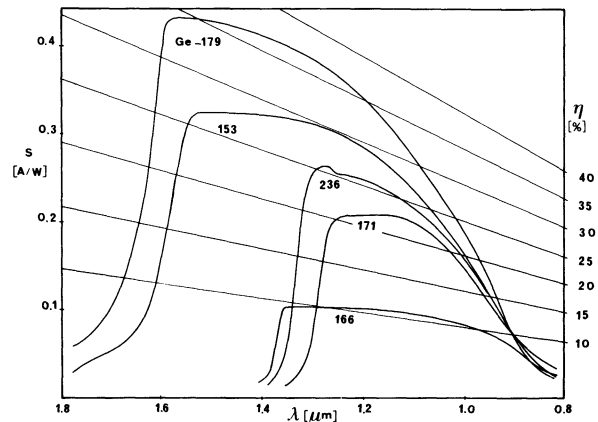


Fig. 6. — Réponses spectrales de diverses diodes mesa p⁺/n. η : rendement quantique externe; S : sensibilité; Ge 179 : Photodétecteur Ge (CGE)

Diodes GaAlSb	x	Durée de diffusion (min.)
153	0,07	15
236	0,15	15
166	0,15	120
171	0,17	30

[Spectral responses of various mesa p⁺/n diodes. η : external quantum efficiency; S : sensitivity; Ge 179 : Ge photo-detector (CGE).]

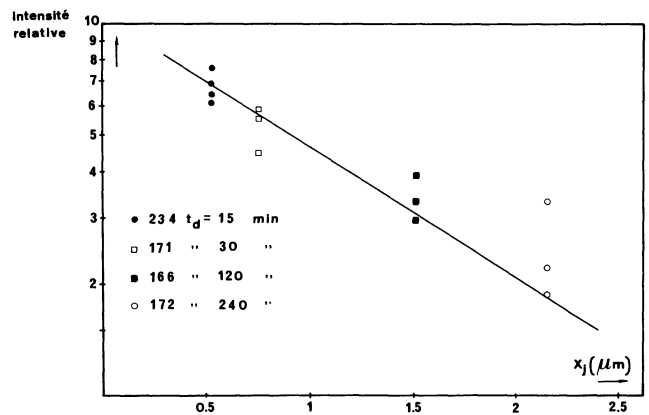


Fig. 7. — Variation relative du rendement de photodétecteurs p⁺/n à GaAlSb en fonction de l'épaisseur x_j de la couche p⁺

[Variation of the efficiency of p⁺/n GaAlSb photodetectors versus the depth x_j of the p⁺ layer (arbitrary unit).]

domaine qui intéresse les communications par fibres optiques à $1,3 \mu\text{m}$. Il faut donc optimiser ces couches et examiner si un compromis conduction-transparence peut être réalisé.

3.1 ELABORATION DES DIODES. — Deux techniques de dépôt d'ITO ont été mises en œuvre :

- la pulvérisation chimique réactive ou « spray » dans laquelle la couche de GaAlSb est portée à 400 °C.
- la pulvérisation cathodique ⁽¹⁾ dans laquelle la couche n'est pas chauffée.

Dans les deux méthodes il est possible, en jouant sur les paramètres expérimentaux, d'ajuster le dopage et donc les propriétés optiques des couches à 1,3 μm . Cependant le dépôt par « spray » conduit à une réflexion anormalement élevée de la structure ITO/GaAlSb probablement due à la formation d'une couche d'interface d'indice inférieur à l'indice de l'ITO. Seul le dépôt par pulvérisation cathodique a donc été retenu. Des dépôts uniformes ont été réalisés sur substrat GaSb ou GaAlSb et sur pyrex afin d'étudier les propriétés optiques de la structure ITO/GaAlSb. Les dépôts ont été réalisés à travers un masque percé d'ouvertures de diamètre $\varnothing = 300 \mu\text{m}$ afin de former les photodétecteurs. Le contact arrière est réalisé à l'aide d'Au-Ge comme pour les jonctions p⁺n, les prises de contact sur la diode se font à la laque d'argent.

3.2 ETUDE OPTIQUE DE LA STRUCTURE ITO/GaAlSb.

— Cette étude montre que les propriétés optiques des structures ITO « sputtering »/GaAlSb sont convenablement décrites dans le proche infrarouge par celles d'une couche, dont les indices réel et imaginaire n_c et k_c sont donnés par le modèle de Drude-Lorentz [12], déposée sur un substrat GaAlSb dont les indices n_s et k_s sont donnés par Seraphin [13] et Ance [14]. Cela nous a conduit à une évaluation du dopage de la couche d'ITO assurant :

1. une transmission T supérieure à 66 % (les pertes optiques sont dans ce cas égales aux pertes par réflexion sur un substrat nu de GaAlSb).
2. une résistance série r_s inférieure à 1/10 de la résistance de charge couramment utilisée en photodétection (50 Ω).

Dans le cas d'une collection par anneau circulaire, Wyeth [15] a montré que r_s est reliée à la résistance carrée R_{\square} de la couche par la relation $r_s = R_{\square}/8\pi$. Pour $r_s \leq 5 \Omega$, on a alors $R_{\square} \leq 126 \Omega$.

Le modèle de Drude-Lorentz permet le calcul de n_c et k_c à 1,3 μm en fonction du dopage de l'ITO (on s'est fixé $\epsilon'_{\text{réseau}} = 3,61$; $m_n^*(\text{ITO}) = 0,2 m_0$; $\mu_n = 40 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$). L'épaisseur e de la couche antireflet est donnée par $\lambda/4 n$ soit $1,3/4 n$. La résistance carrée de la couche est ensuite calculée. La transmission de cette couche est donnée par Berning [16] en fonction de n_c , k_c , n_s , k_s et e . La figure 8 montre que, dans la gamme de dopage $7 \times 10^{19} \leq N \leq 1,9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, les couches d'ITO peuvent assurer une bonne transmission et une résistance série suffisamment faible pour la réalisation d'un photodétecteur ITO/GaAlSb.

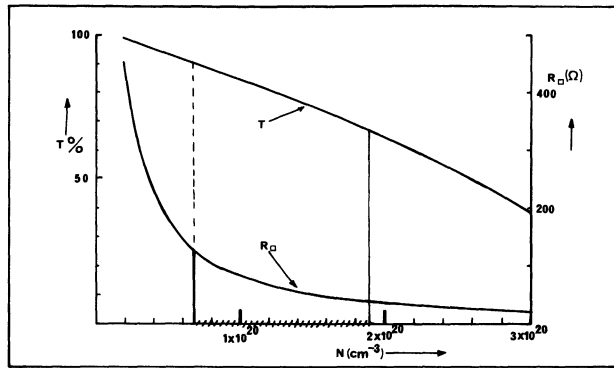


Fig. 8. — Transmission T et résistance carrée R_{\square} calculées de couches antireflets d'ITO déposées sur GaAlSb à $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$.

[Calculated transmission T and square resistance R_{\square} of antireflecting ITO coatings on GaAlSb ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$).]

3.3 PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES ET PHOTOÉLECTRIQUES.

— Les caractéristiques électriques des diodes ITO/GaAlSb ont été très améliorées par un recuit de 30 min. à 200 °C à l'air. Par contre, les réponses spectrales sont peu affectées par ce recuit. Nous discuterons ici les caractéristiques électriques après recuit des meilleures diodes obtenues sur une couche $\text{GaAl}_{0,2}\text{Sb}$ dopée à $7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

— La figure 9 présente les variations $I - V$ en direct en fonction de la température. Dans le domaine exponentiel, le coefficient de qualité est voisin de 1,3 entre 190 et 300 K puis augmente quand la température baisse. Dans ce domaine de température la variation du courant I_0 (extrapolation de I direct pour $V = 0$) en fonction de T obéit à la loi

$$I_0 = AT^2 e^{-\Delta E/kT}$$

et la valeur de la barrière ΔE déterminée expérimentalement est égale à 460 meV.

Ces caractéristiques directes sont très proches de celles obtenues sur des diodes Schottky Au/GaAlSb pour lesquelles le coefficient de qualité était égal à 1,4 et la hauteur de barrière 500 meV.

— La figure 10 montre que le courant inverse suit une loi quasi exponentielle en fonction de la polarisation, avant le claquage aux environs de -15 V à 300 K. A -1 V la densité de courant inverse est de $1,7 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$, elle est inférieure à celle mesurée sur les diodes mesa réalisées sur la couche n dopée à 10^{16} cm^{-3} : $6 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$. La tension de claquage par ionisation, donnée par la loi semi-empirique,

$$V_B = 60 \left(\frac{E_g}{1,1} \right)^{3/2} \left(\frac{N_d - N_a}{10^{16}} \right)^{-3/4} \quad [2] \text{ vaut } -12 \text{ V};$$

Cette estimation est en assez bon accord avec la valeur expérimentale. D'autre part le coefficient de température positif de V_B semble indiquer que, au-delà de -15 V , le phénomène d'ionisation par impact est présent dans la jonction.

(1) Réalisée au C.E.R.T., Toulouse par M. J. Bernard.

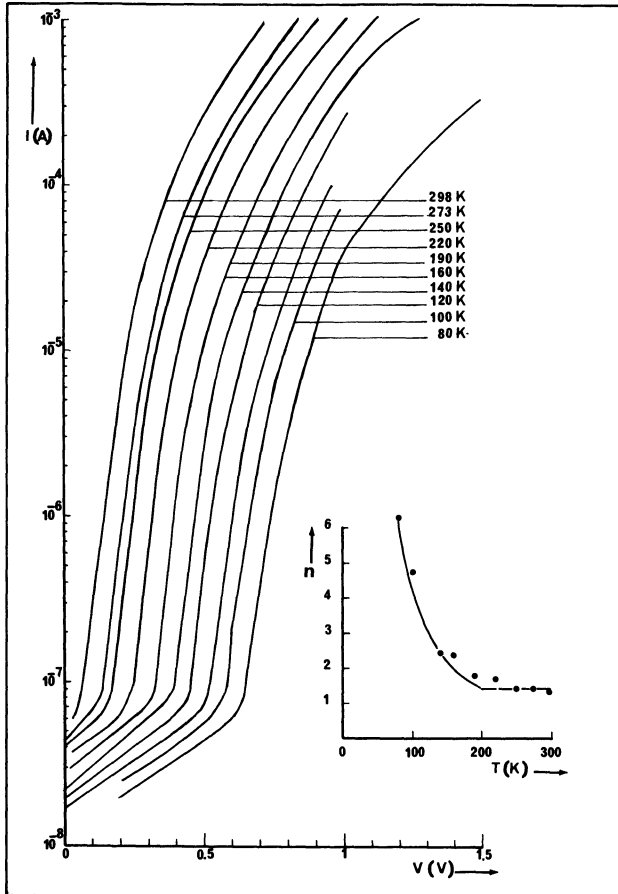


Fig. 9. — Caractéristiques directes $I - V$ en fonction de T des diodes ITO/GaAlSb 157 après recuit.

[Direct $I - V$ characteristics at various temperatures for the heat annealed ITO/GaAlSb 157 diode.]

A polarisation inverse moyenne (-4 V), le courant suit une loi exponentielle $I_{inv} = I' e^{-E_a/kT}$ avec $E_a = 253$ meV pour $190 \leq T \leq 300$ K. Le régime de transport en inverse n'est pas dû à la génération-recombinaison puisque le courant n'est pas proportionnel à $(V_d + V)^{1/2}$; cependant la forte variation observée en fonction de T ne semble pas non plus compatible avec un régime tunnel.

— Les spectres du rendement quantique externe η_{ext} mesurés sur trois diodes réalisées sur des couches épitaxiées de compositions différentes sont présentées sur la figure 11. On note le décalage du seuil de réponse associé aux valeurs différentes des bandes interdites. Le maximum de réponse ne se situe pas au niveau de la fréquence de coupure $\lambda = 1,24/E_g$, mais est très décalé vers le visible.

Nous avons essayé de rendre compte de ces réponses spectrales par une modélisation simple :

• Modèle de l'hétérojonction

Les caractéristiques électriques ayant montré la grande analogie entre les structures ITO/GaAlSb et Au/GaAlSb, nous avons pris un modèle Schottky pour le calcul du rendement.

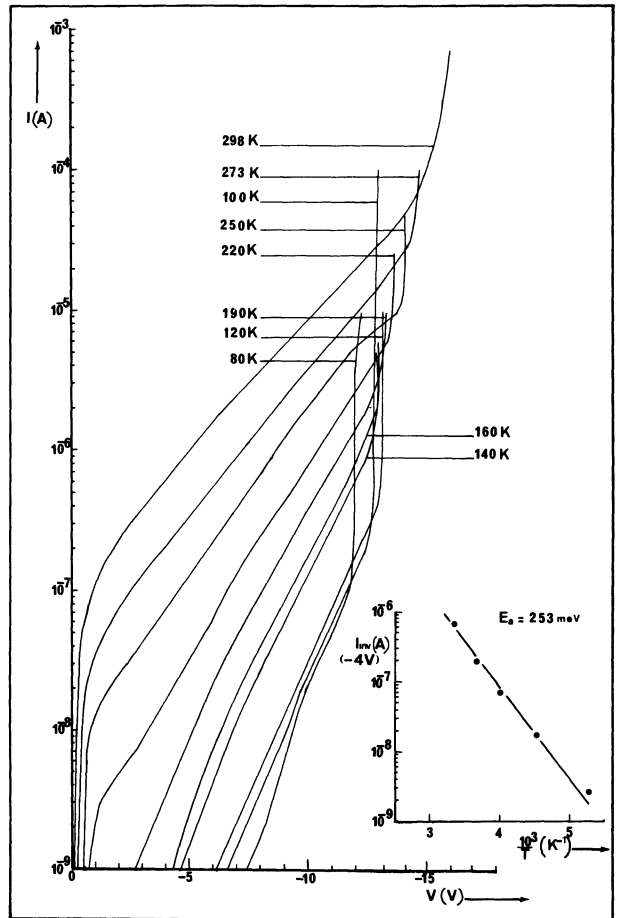


Fig. 10. — Caractéristiques inverses $I - V$ en fonction de T des diodes ITO/GaAlSb 157 après recuit.

[Reverse $I - V$ characteristics at various temperatures for the heat annealed GaAlSb 157 diode.]

• Choix du spectre de α

La figure 12 montre les spectres du coefficient d'absorption α de $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ pour $x = 0$ et $x = 0,24$ d'après Seraphin [13] et Ance [14]. Le seuil du rendement mesuré pour l'échantillon 157 permet de déterminer la position du flanc d'absorption. A plus courte longueur d'onde nous avons interpolé les résultats donnés par Ance et Seraphin.

La figure 13a présente les spectres calculés du rendement interne η_{int} en fonction de α pour une largeur de zone de charge d'espace $W = 0,33 \mu\text{m}$ (-2 V), une épaisseur de la couche de GaAlSb $d = 5 \mu\text{m}$ et une recombinaison à l'interface GaAlSb-

GaSb telle que $\xi_p = \frac{s_p \tau_p}{L_p} = 10^3$, pour des valeurs de la

longueur de diffusion L_p variant entre 1 et $5 \mu\text{m}$; s_p et τ_p représentent respectivement la vitesse de recombinaison à l'interface GaAlSb/GaSb et la durée de vie des porteurs minoritaires dans GaAlSb(n). Ces spectres sont comparés au spectre expérimental de η_{int} déduit de $n_{ext} = \eta_{int} \times \frac{T_{ITO}}{100}$ puis normalisé à 1.

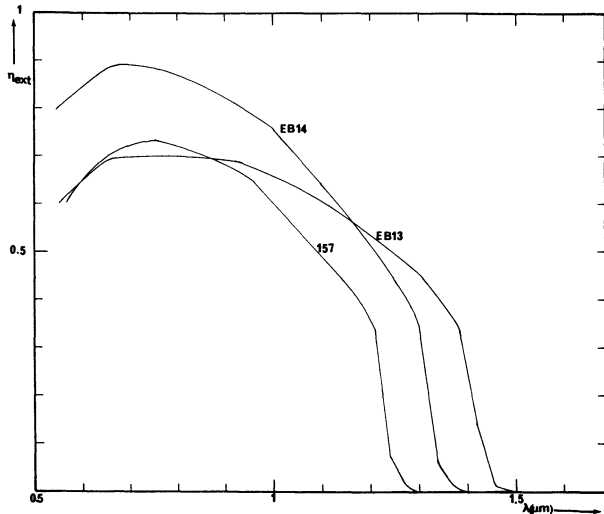


Fig. 11. — Réponses spectrales de η_{ext} à $-1 V$ pour trois photodiodes ITO/GaAlSb. La valeur absolue de η est donnée par comparaison à la réponse à un flux de $4,1 \times 10^{14}$ photons/cm².s à $\lambda = 0,63 \mu m$.

[External spectrum response η_{ext} at $-1 V$ for three ITO/GaAlSb photodiodes. η has been determined by an absolute measurement at $\lambda = 0,63 \mu m$ with a photon flux of 4.1×10^{14} photons/cm².s.]

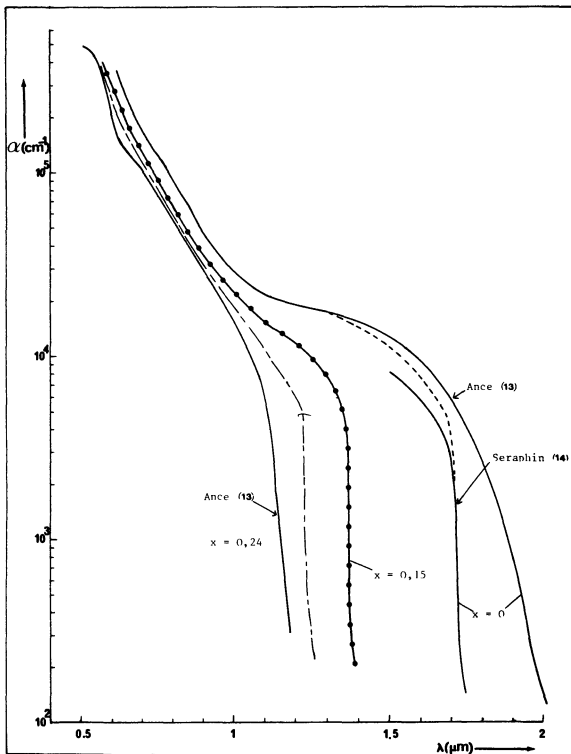


Fig. 12. — Spectres du coefficient d'absorption α de GaAlSb ——— échantillon 157 ($x = 0,20$); ——— $x = 0,15$.

[Absorption coefficients α spectra of $Ga_{1-x}Al_xSb$. ——— sample 157 ($x = 0.20$); ——— $x = 0.15$.]

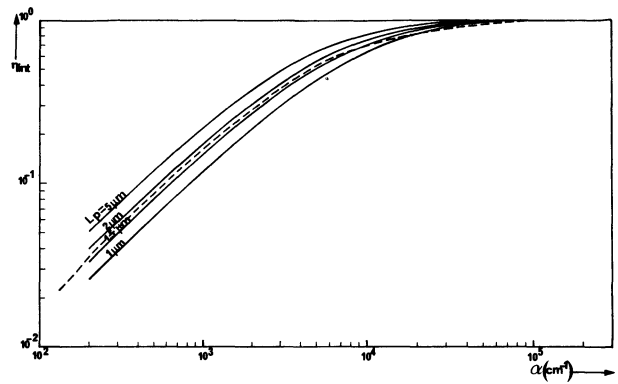


Fig. 13a. — Rendement interne $\eta_{int} = f(\alpha)$ pour : $W = 0,33 \mu m$, $d_{GaAlSb} = 5 \mu m$, $\xi_p = 10^3$, $L_p = 1; 1,5; 2; 5 \mu m$; ——— expérim.; ——— calcul.

[Internal quantum efficiency spectra η_{int} for $W = 0,33 \mu m$, $d_{GaAlSb} = 5 \mu m$, $\xi_p = 10^3$, $L_p = 1, 1.5, 2, 5 \mu m$. ——— experiment; ——— calculation.]

Le meilleur accord est obtenu pour $L_p = 1,5 \mu m$.

La figure 13b compare dans ce cas les réponses spectrales $\eta = f(\lambda)$ expérimentale et calculée.

Le coude observé après le seuil sur le spectre de η_{int} correspond au coude du spectre d'absorption vers $\alpha = 5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$. Cette valeur de α n'est pas assez élevée pour assurer une collection optimale si W est aussi faible que $0,33 \mu m$ et si L_p ne vaut que $1,5 \mu m$.

L'amélioration du photodétecteur passe par l'accroissement de W (réduction du dopage, augmentation de la polarisation inverse) afin d'assurer le rendement maximum dans cette région où les porteurs sont accélérés par le champ électrique. Nous avons estimé $\eta_{int} = 0,95$ pour $N_d - N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ à $V = -10 V$ au point du spectre où $\alpha = 5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$.

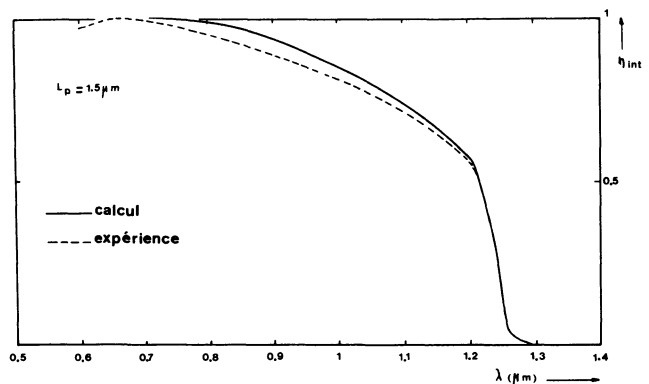


Fig. 13b. — Comparaison $\eta_i = f(\lambda)$ expérimental et calculé $L_p = 1,5 \mu m$.

[Comparison between experimental and calculated $\eta_i = f(\lambda)$; $L_p = 1.5 \mu m$.]

4. Conclusion.

Deux types de photodétecteurs utilisant une couche active de GaAlSb ont été réalisés.

Pour des dopages équivalents, les photodiodes à hétérojonction présentent un courant inverse plus faible (120 nA à -1 V soit $1,7 \times 10^{-4}$ A/cm²) et une tension de claquage plus élevée (-15 V).

La sensibilité des photodétecteurs est fortement liée à la profondeur de la jonction, elle est donc supérieure dans le cas des diodes ITO/GaAlSb.

L'amélioration des dispositifs implique :

— un raffinement de la technologie afin de réduire les courants de fuite en inverse ;

— une réduction du dopage de la couche active afin que les photoporteurs soient tous créés dans la zone de charge d'espace dès la fin du seuil d'absorption ;

— une réduction de la profondeur de la jonction dans le cas des homojonctions en faisant appel par exemple à la technique d'implantation ionique ;

— l'élaboration d'une hétérojonction avec fenêtre GaAlSb de x plus élevé.

Remerciements.

Nous adressons nos remerciements à M. Gouskov (CEM) pour la fourniture des substrats de GaSb et à M. J. Bernard (CERT) pour la réalisation des dépôts d'ITO.

Bibliographie

- [1] POULAIN, P., HIRTZ, P., BLONDEAU, R., RENAUD, J. C., DE CRÉMOUX, B., 8th European Conference on Optical Communication, Cannes 21-24 septembre 1982.
- [2] SZE, S. M., *Physics of Semiconductor devices*, 2nd Ed. (John Wiley and Sons, New York) 1981.
- [3] HILDEBRAND, O., KUEBART, W., PILKUHN, M. H., *Appl. Phys. Lett.* **37** (1980) 801.
- [4] HILDEBRAND, O., KUEBART, W., BENZ, K. W., PILKUHN, M. H., *IEEE J. Quantum Electronics* **17** (1981) 284.
- [5] ALIBERT, C., JOULLIÉ, A., JOULLIÉ, A. M., ANCE, C., *Phys. Rev. B* **27**, 8 (1983) 4946.
- [6] CAPASSO, F., PANISH, M. B., BONNER, W. A., SUMSKI, S., *Inst. Phys. Conf. Ser.* N° **56** (1981) 125.
- [7] ANDERSON, S. J., SCHOLL, F., HARRIS, J. S., *Inst. Phys. Conf. Ser.* N° **33b** (1977) 346.
- [8] GAUTIER, P., Thèse 3^e cycle, USTL Montpellier 1978.
- [9] TABATABAIE, N., STILLMAN, G. E., CHIN, R., DAPKUS, P. D., *Appl. Phys. Lett.* **40** (1982) 415.
- [10] CALDERER, J., MANIFACIER, J. C., SZEPESSY, L., DAROLLES, J. M., PEROTIN, M., *Revue Phys. Appl.* **14** (1979) 485.
- [11] GOUSKOV, L., LUQUET, H., GRIL, C., OEMRY, A., SAVELLI, M., *Revue Phys. Appl.* **17** (1982) 125.
- [12] SMITH, R. A., *Semiconductors* (Cambridge Univ. Pub. London) 1978, p. 291.
- [13] SERAPHIN, B. O., BENNETT, H. E., *Semiconductors and Semimetals V3*, Ed. RK Willardson, AC Beer (Academic Press, New York-London) 1967, p. 499.
- [14] ANCE, C., Thèse d'Etat, USTL Montpellier, 24 mars 1980.
- [15] WYETH, N. C., *Solid State Electron.* **20** (1977) 629.
- [16] BERNING, H., *Physics of thin films V1* (Acad. Press London) (1963) 69.