



HAL
open science

Réalisation de transistors bipolaires à double hétérojonction (DHBT) GaAlAs/GaAs pour circuits intégrés I2L

J.P. Bailbé, Thierry Camps, A. Cazarre, J. Jamai, A. Martins, A. Marty, G.
Rey, Josiane Tasselli, J.P. Vannel

► **To cite this version:**

J.P. Bailbé, Thierry Camps, A. Cazarre, J. Jamai, A. Martins, et al.. Réalisation de transistors bipolaires à double hétérojonction (DHBT) GaAlAs/GaAs pour circuits intégrés I2L. *Revue de Physique Appliquée*, 1989, 24 (2), pp.171-176. 10.1051/rphysap:01989002402017100 . jpa-00246038

HAL Id: jpa-00246038

<https://hal.science/jpa-00246038>

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
72.80E

Réalisation de transistors bipolaires à double hétérojonction (DHBT) GaAlAs/GaAs pour circuits intégrés I²L

J. P. Bailbé, T. Camps, A. Cazarre, J. Jamai, A. Martins, A. Marty, G. Rey, J. Tasselli et J. P. Vannel

Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes du CNRS, 7, avenue du Colonel Roche, 31077 Toulouse Cedex, France

(Reçu le 1^{er} juillet 1988, révisé le 11 octobre 1988, accepté le 17 octobre 1988)

Résumé. — Dans cet article, nous montrons l'intérêt du transistor bipolaire à double hétérojonction (DHBT) pour la filière logique rapide I²L (logique à injection). En effet l'interchangeabilité entre l'émetteur et le collecteur et la liberté de conception résultant de l'utilisation de deux hétérojonctions donnent aux DHBT un grand intérêt dans le domaine des circuits intégrés rapides à grande intégration tels que la logique à injection I²L. L'accent est mis sur le comportement en régime statique de dispositifs d'étude, réalisés par les techniques d'épithaxie par jets moléculaires et d'implantation ionique de magnésium. Les résultats les plus intéressants sont l'obtention de dispositifs symétriques présentant un gain en courant en régime de fonctionnement inverse de 40 pour un gain de 280 en régime normal et de tensions de saturation très faibles de l'ordre de 3 mV.

Abstract. — In this paper, we point out the interest of the double heterojunction bipolar transistor (DHBT). The interchangeability between the emitter and the collector and the use of two heterojunctions confer to the DHBT a great interest for the realization of I²L high-speed integrated circuits. The fabrication process and the DC characteristics of the implanted DHBT are described. The experimental DC results show a symmetric operation either on normal or reverse bias. Indeed, a forward current gain of 280 and a reverse current gain of 40 have been measured. On the other hand, our DHBT exhibits a very low offset voltage $\Delta V_{CE} \approx 3$ mV.

1. Introduction.

Dans le domaine des circuits intégrés logiques, le transistor bipolaire à hétérojonction GaAlAs/GaAs pourrait bien être le dispositif qui exploite au mieux la rapidité de fonctionnement qu'autorise l'arséniure de gallium et les propriétés nouvelles qu'apporte l'hétérojonction [1, 4].

A l'heure actuelle, la plupart des équipes ont engagé une intense activité de recherche sur la seule filière ECL qui ne privilégie que la vitesse, aussi peut-on espérer une percée de l'autre famille bipolaire qu'est l'I²L (logique à injection intégrée). En effet, celle-ci se prête, comme pour le silicium, à une très large intégration (grande compacité et faible consommation) et devrait retrouver, grâce aux propriétés du GaAs et aux possibilités offertes par le transistor symétrique à double hétérojonction DHBT [5], de bonnes potentialités en vitesse. Texas Instruments a rapporté des résultats concernant des réseaux de portes I²L-4K [6].

Dans ce contexte, nous avons opté pour l'étude de cette deuxième filière et l'objet de ce travail est une contribution à la démonstration de faisabilité, au laboratoire, des premières structures élémentaires pour l'I²L.

Dans cet article, nous présentons d'abord la technologie utilisée pour la réalisation de transistors bipolaires à double hétérojonction ainsi que les principaux critères de conception qui en assurent le fonctionnement dans les régimes direct et inverse.

Nous donnerons ensuite des résultats de caractérisation en régime statique de nos dispositifs, l'accent sera mis sur le fonctionnement en régime inverse et sur la faible tension de saturation obtenue.

2. Réalisation du DHBT.

La figure 1 montre une vue en coupe du DHBT implanté ; les principales étapes technologiques de fabrication sont schématisées sur la figure 2.

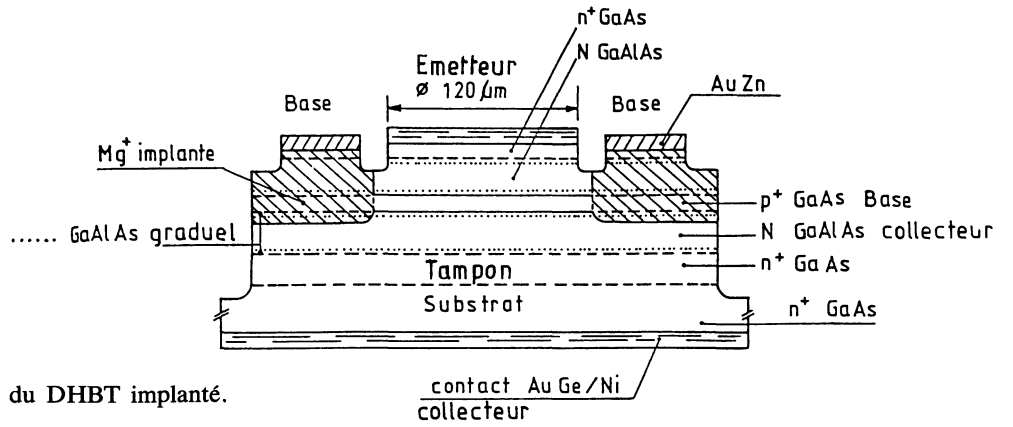


Fig. 1. — Vue en coupe du DHBT implanté.

[Cross sectional view of the implanted DHBT.]

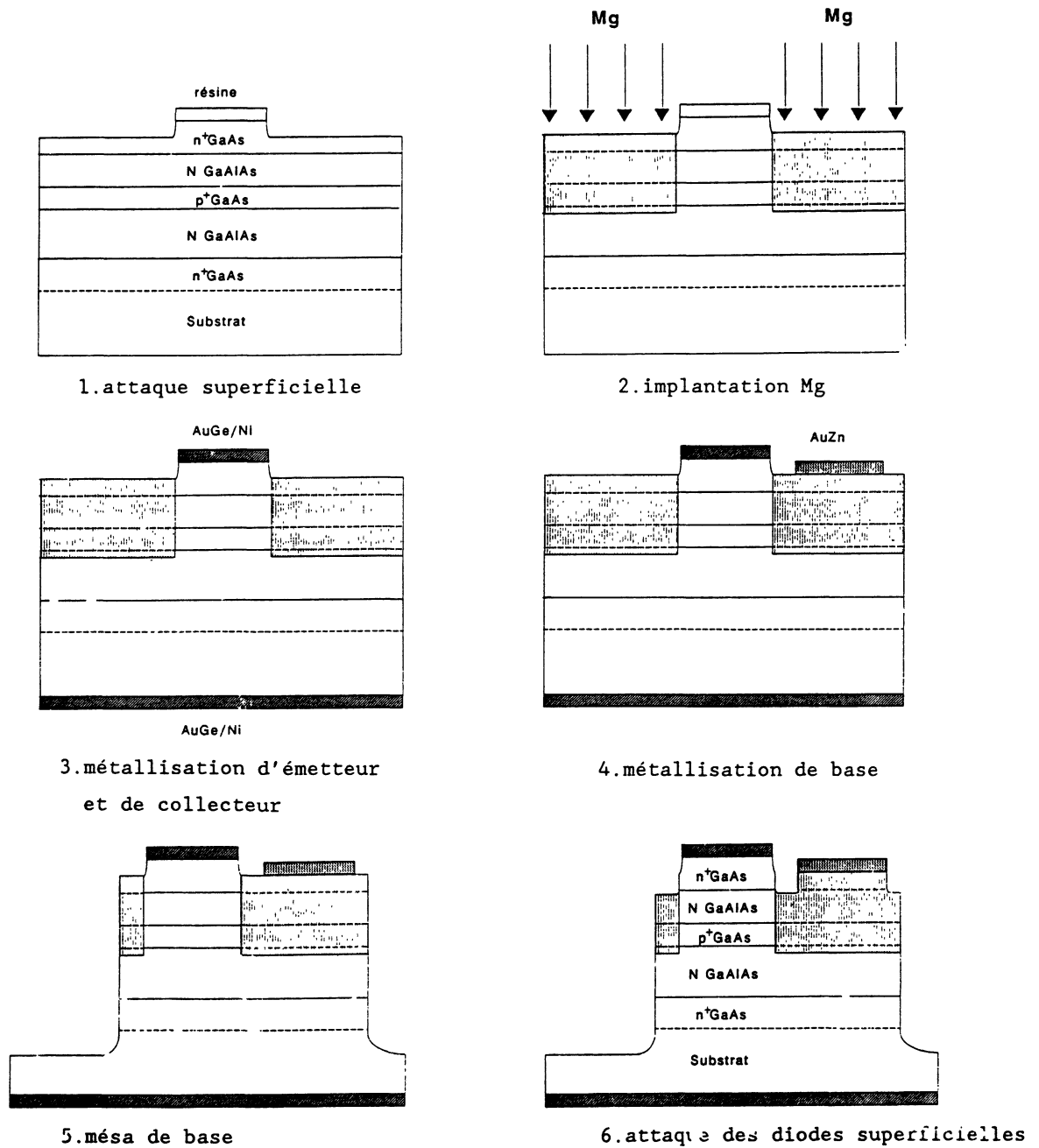


Fig. 2. — Principales étapes de réalisation d'un DHBT implanté.

[Cross sectional views of the DHBT along the fabrication process.]

— Les couches actives sont réalisées par épitaxie par jets moléculaires sur un substrat GaAs dopé silicium orienté 100 ;

— Les hétérojonctions émetteur-base et base-collecteur sont graduelles en composition d'aluminium comme le montre la figure 3. Cette possibilité, offerte par la technique d'EJM, permet d'éliminer les effets de barrière de potentiel dues aux « spikes » des bandes de conduction (Fig. 4). Ceci permet d'obtenir des efficacités d'injection élevées pour l'ensemble des deux hétérojonctions du dispositif. Le taux d'aluminium dans les zones de collecteur et d'émetteur a été fixé à 40 % dans un premier temps [7] afin de pouvoir bénéficier de la sélectivité dans l'attaque chimique des couches. Par la suite, l'utilisation de la gravure sèche (RIE) au laboratoire, a autorisé une diminution du taux d'aluminium. La valeur optimale a été fixée à 25 % [8].

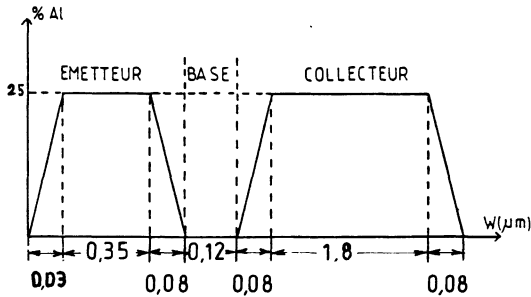


Fig. 3. — Composition en Al de la structure à double hétérojonction graduelle.

[Al composition profile of the graded heterojunctions in the DHBT.]

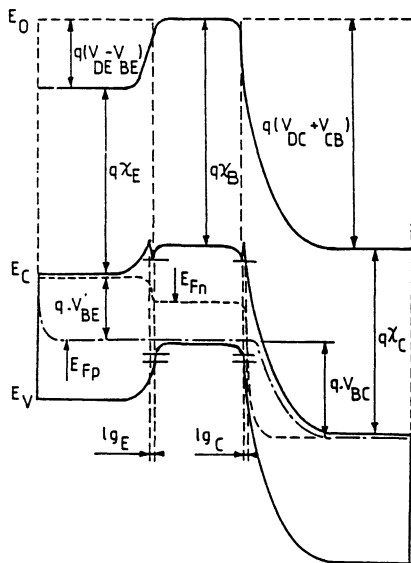


Fig. 4. — Diagramme d'énergie du DHBT.

[Band diagram of the DHBT structure.]

— Le choix de l'épaisseur et du dopage de base qui sont respectivement de 1 000 Å et $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ assure un bon compromis gain en courant-résistance intrinsèque. Afin d'assurer la symétrie du transistor, la région de base extrinsèque est formée par une multi-implantation de magnésium dont la profondeur dépasse la jonction base-collecteur. Ainsi, l'homojonction GaAlAs(N)/GaAlAs(P⁺), de tension de seuil élevée, empêche pratiquement l'injection des électrons dans les zones latérales du dispositif. Le dépassement dans le collecteur, de la zone P⁺ implantée, n'est critique que par l'affaiblissement de la tension de claquage de la jonction base-collecteur.

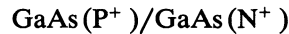
L'implantation ionique de Mg est suivie d'un recuit rapide de quelques secondes à 900 °C.

— Les couches actives d'émetteur et de collecteur présentent une concentration en atomes dopants Si de 10^{16} cm^{-3} . Cette valeur assure de faibles valeurs de capacité de transition.

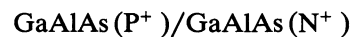
— Les contacts ohmiques sont obtenus par dépôt d'alliage AuGe/Ni pour l'émetteur et le collecteur et d'AuZn pour la base.

— La zone active du composant est délimitée par une attaque chimique de type méso.

— La dernière étape nécessaire au bon fonctionnement du transistor consiste à éliminer par gravure chimique la zone semiconductrice comprise entre les contacts d'émetteur et de base (Fig. 1). En effet, cette région constitue deux homojonctions



et



dont la mise en conduction altère très sévèrement le gain en régime direct du dispositif.

3. Caractérisation en régime statique du DHBT.

3.1 GAIN EN COURANT. — La figure 5 montre les caractéristiques de sortie d'un transistor de test réalisé selon le processus d'implantation ionique de Mg, en régime direct et en régime inversé.

L'analyse de ces caractéristiques démontre un fonctionnement quasiment symétrique du DHBT. En effet, ce dernier présente un gain en courant en régime inverse de 40 et un gain maximum de 280 en régime direct. Ces performances sont à attribuer à la mise en œuvre d'hétérojonctions GaAlAs(N)/GaAs(P) à faible taux d'aluminium et présentant une transition graduelle ($X_{Al} = 25 \%$ - $L_g = 800 \text{ Å}$).

Ainsi, la non-injection de trous de la région de base en GaAs dans les régions d'émetteur et de collecteur confère aux deux hétérojonctions du dispositif des efficacités d'injection importantes conduisant à un gain en courant élevé.

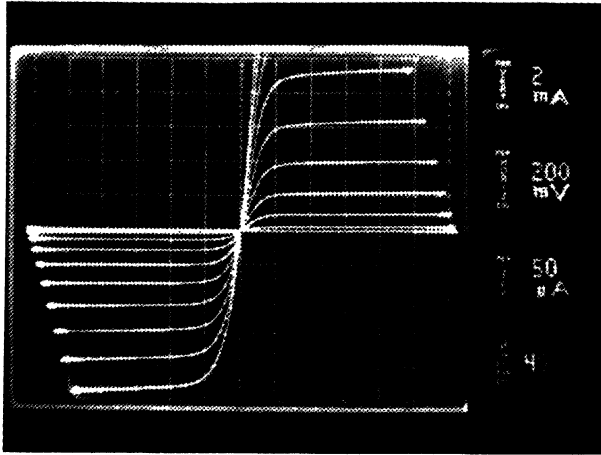


Fig. 5. — Caractéristiques de sortie en régime direct et inverse.

[Normal and reverse characteristics of a DHBT sample.]

En ce qui concerne la corrélation entre le gain h_{FE} en régime direct et h_{RC} en régime inverse, les valeurs mesurées sont en accord avec les valeurs théoriques calculées à partir du modèle du DHBT implanté qui a été largement étudié [7, 8].

La relation gain direct-gain inverse est directement liée à la géométrie du dispositif par la relation ci-dessous :

$$h_{RC} = \frac{h_{FE}}{1 + \frac{2(A_C - A_E)}{A_E}} \quad \text{avec ici} \quad \frac{A_C}{A_E} \approx 5$$

où A_C et A_E désignent respectivement les surfaces de collecteur et d'émetteur. Pour le dispositif présenté ici, le rapport $h_{FE}/h_{RC} \approx 7.5$.

3.2 TENSION DE SATURATION. — La tension de saturation V_{CEO} est un critère de qualité qui doit être considéré pour un transistor bipolaire destiné à la logique à injection.

Celle-ci est définie, à courant collecteur nul, selon la relation $V_{CEO} = U_T \ln \left(\frac{1}{\alpha_I} \right)$ où α_I désigne le gain inverse du dispositif.

De nombreuses études ont été menées sur ce point en vue de minimiser la valeur de ce paramètre [9].

En ce qui concerne nos transistors, des tensions de saturation aussi faibles que 3 mV ont été relevées (Fig. 6) ; ce qui confirme l'obtention de gains en mode inversé élevés. On notera cependant que dans cette gamme de valeurs, les tensions de saturation sont en partie données par la chute de tension dans les résistances séries.

Ces résultats mettent bien en évidence l'intérêt du DHBT dans une filière logique où l'entrée en saturation doit se produire pour des niveaux de tension aussi faibles que possible.

3.3 CARACTÉRISTIQUES DE TRANSFERT DU DHBT IMPLANTÉ. — Les relevés de la figure 7 montrent que nos dispositifs présentent un comportement tout à fait symétrique en ce qui concerne le transport des électrons dans la double hétérostructure.

Ces caractéristiques de transfert direct

$$(I_C(V_{BE}))_{V_{CB}=0} \quad \text{et inverse} \quad (I_E(V_{CB}))_{V_{BE}=0}$$

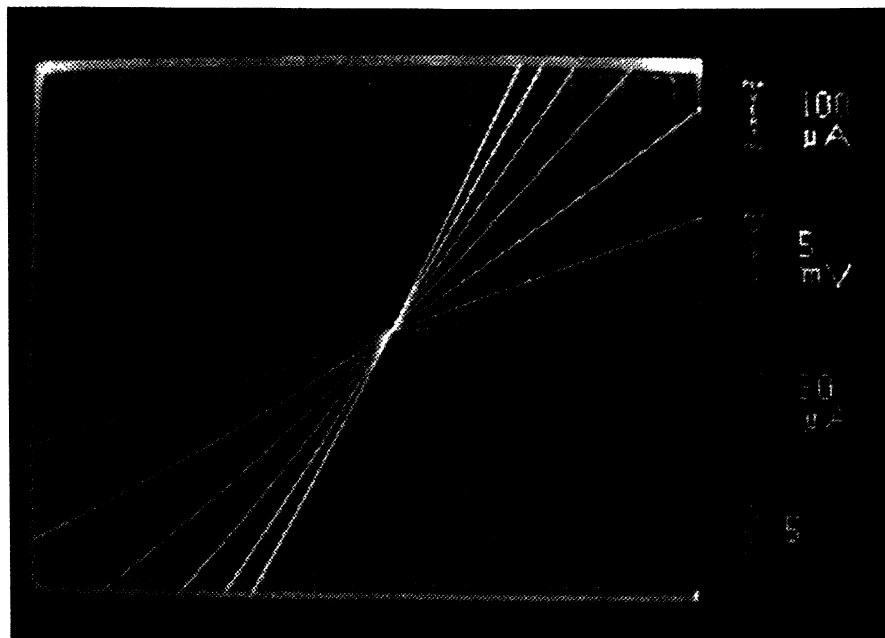


Fig. 6. — Tension de saturation du DHBT réalisé.

[Offset voltage of a DHBT sample.]

se superposent parfaitement avec un coefficient d'idéalité très proche de l'unité dans toute la gamme des courants pour laquelle l'influence des résistances séries parasites reste négligeable.

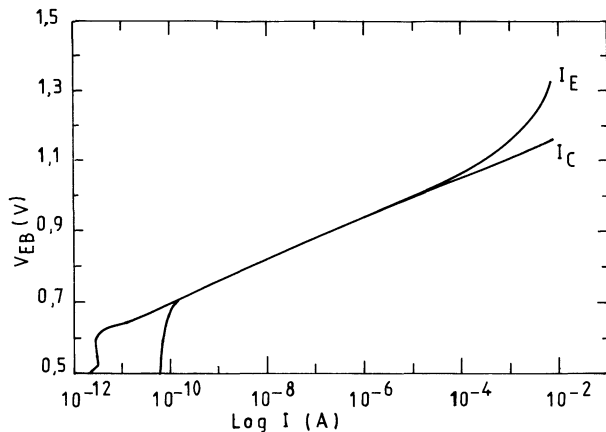


Fig. 7. — Caractéristiques de transfert bas niveau $I_C(V_{BE})_{(V_{CB}=0)}$ et $I_E(V_{CB})_{(V_{BE}=0)}$ du DHBT réalisé.

[Transfert characteristics

$$I_C(V_{BE})_{(V_{CB}=0)} \text{ and } I_E(V_{CB})_{(V_{BE}=0)}$$

of the DHBT sample.]

Ceci confirme la non-influence du « spike » des deux hétérojonctions sur le transfert des porteurs pour les taux d'aluminium faibles (25 %) et pour des transitions graduelles (800 à 1 000 Å).

Ainsi, le modèle utilisé pour étudier ces dispositifs conduit à conclure que la limitation du courant principal est imposée par le mécanisme de diffusion des électrons dans la base qui s'exprime par la relation classique :

$$I_{C,E} = \frac{A_E q n_{iB}^2 D_{nB}}{N_{AB} W_B} \exp \left[\frac{V_{BE,C}}{U_T} \right]$$

où A_E est la surface d'émetteur (diamètre 120 μm) et N_{AB} et W_B les dopages et épaisseurs de base respectivement.

4. Conclusion.

Cet article a été centré sur la réalisation et la caractérisation en régime statique de transistors bipolaires à double hétérojonction

$$\text{GaAlAs(N)/GaAs(P)/GaAlAs(N)}$$

en vue de leur application dans la filière I²L GaAs.

Nous avons d'abord présenté le processus technologique mis en œuvre pour conduire les premiers essais de démonstration de faisabilité à partir des techniques d'épitaxie par jets moléculaires et d'implantation ionique de Mg.

Nous avons en particulier souligné la nécessité de transitions métallurgiques GaAlAs/GaAs graduelles et symétriques permettant un fonctionnement du dispositif en régime direct et inverse. Ainsi, grâce à sa topologie inversée le DHBT trouve tout un intérêt dans le cadre des circuits I²L de grande intégration.

En ce qui concerne la caractérisation électrique des échantillons d'étude, nous avons mis l'accent sur les caractéristiques en régime statique. Les résultats obtenus (gains en courant maximum de 280 en régime direct et de 40 en régime inverse — tension de saturation de 3 mV) semblent indiquer que les propriétés des structures à double hétérojonction réalisées devraient satisfaire d'ores et déjà au fonctionnement d'un circuit intégré I²L simple tel qu'un diviseur par deux.

Dès lors, les prolongements immédiats de nos travaux seront orientés vers des essais d'intégration I²L.

Remerciements.

Nous remercions le CNET Bagneux pour les implantations effectuées sur nos échantillons.

Bibliographie

- [1] KROEMER H., Heterostructures bipolar transistors and integrated circuits, *Proc. IEEE* **70** (1982) 13.
- [2] EDEN R. C. *et al.*, The prospects of Ultra High Speed VLSI GaAs digital logic, *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **ED 26**, n° 4 (1979).
- [3] CASTAGNE R., Nouvelles orientations dans le domaine des circuits intégrés rapides sur semiconducteur III-V, *Onde Electr.* **64** (1984) pp. 61-78.
- [4] REY G., La filière bipolaire sur GaAs : Résultats actuels et perspectives, 2^e Symposium Electron. Telecom., Lisbonne (Mai 1986).
- [5] BAILBE J. P., MARTY A., REY G., TASSELLI J., BOUYAHYAOU A., Electrical behavior of double heterojunction Npn GaAlAs-GaAs-GaAlAs bipolar transistors, *Solid State Electron.* **28** (1985) pp. 627-638.
- [6] YUAN *et al.*, SSCC Proceedings (Février 1986).
- [7] MARTY A., JAMAI J., VANEL J. P., FABRE N., BAILBE J. P., DUHAMEL N., DUBON-CHEVALIER C., TASSELLI J., Fabrication and DC characterisation of GaAlAs/GaAs double heterojunction bipolar transistors, *Solid State Electron.* **31** (1988) pp. 1375-1382.

- [8] MARTY A., TOUAHNI R., VANEL J. P., JAMAI J., BAILBE J. P., REY G., Modeling and performance of double heterojunction GaAlAs-GaAs integrated injection logic, article accepté pour parution dans *Solid State Electron*.
- [9] BOUYAHYAOUÏ A., Etude et réalisation de transistors bipolaires sur arséniure de gallium. Dispositifs à double homojonction et à double hétérojonction, thèse de Docteur 3^e Cycle, No. 2904, Université Paul Sabatier, Toulouse (1983).
-